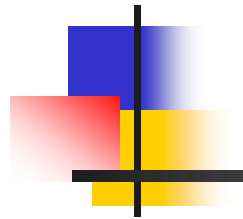




東南大學
Southeast University

电力系统分析





第五章 电力系统的运行与管理

5.1 电力系统的运行与管理问题

5.7 能量管理系统EMS

5.2 电力系统的有功平衡与频率调整

5.3 电力系统的无功平衡与电压调整

5.4 电力系统有功、无功经济分配



5.1 电力系统的运行与管理问题(1)

电力系统运行与管理的主要内容有：

1) 调整系统频率在规定范围内。

系统频率偏移过大的危害：

- 对用户的影响：生产效率下降，产生次品和废品。
- 对发电厂的影响：汽轮机叶片谐振，发电机温度升高，电压下降，辅机功能下降。
- 对系统运行的影响：互联电力系统的解列，发电机解列。



5.1 电力系统的运行与管理问题(2)

2) 监视和控制电压在规定范围内。

系统电压过低或过高都会影响用电设备运行的安全性和经济性。

3) 确保运行调度的经济性。

4) 安全分析和安全控制。

5) 尽可能满足环保要求。

6) 对复杂市场要求所提出的运行方式评估其可操作性



调度员指挥操作的主要内容有：

- (1) 发电厂有功、无功出力的增减，频率、电压的调整（包括调整装置的整定、调整方式的改变、发电机的发电与调相方式的相互转变、调压设备的电压和容量的变化等）；
- (2) 系统与系统间、发电厂与系统间的并列与解列；
- (3) 输电线路和变压器的停送电；
- (4) 网络的合环与解环；
- (5) 母线接线方式的改变；
- (6) 中性点接地方式的改变和消弧线圈补偿度的调整；
- (7) 继电保护和自动装置使用状态的改变；
- (8) 线路检修开工前，线路两侧所有电源端接地线的连接及竣工后的拆除。



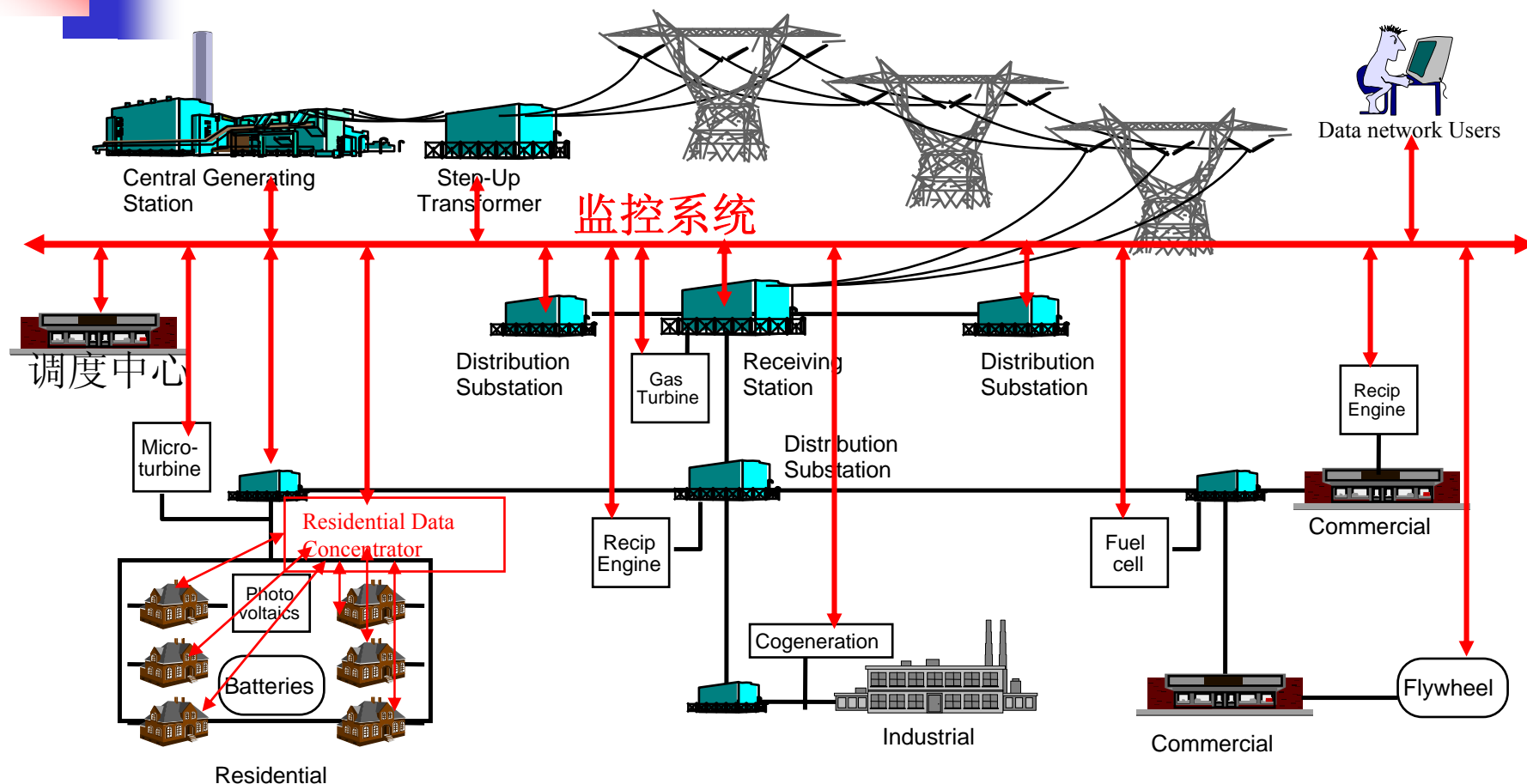
能量管理系统(EMS)-Energy Management System

对电力系统运行进行统一调度的系统称为EMS。
主要包括运行计划编制和实时控制管理。

- 数据采集和监控系统(SCADA系统)
- 自动发电控制(AGC)
- 经济调度控制(EDC)
- 电力系统状态估计(State Estimator)
- 安全分析(Security Analysis)
- 调度员模拟培训系统(DTS)。

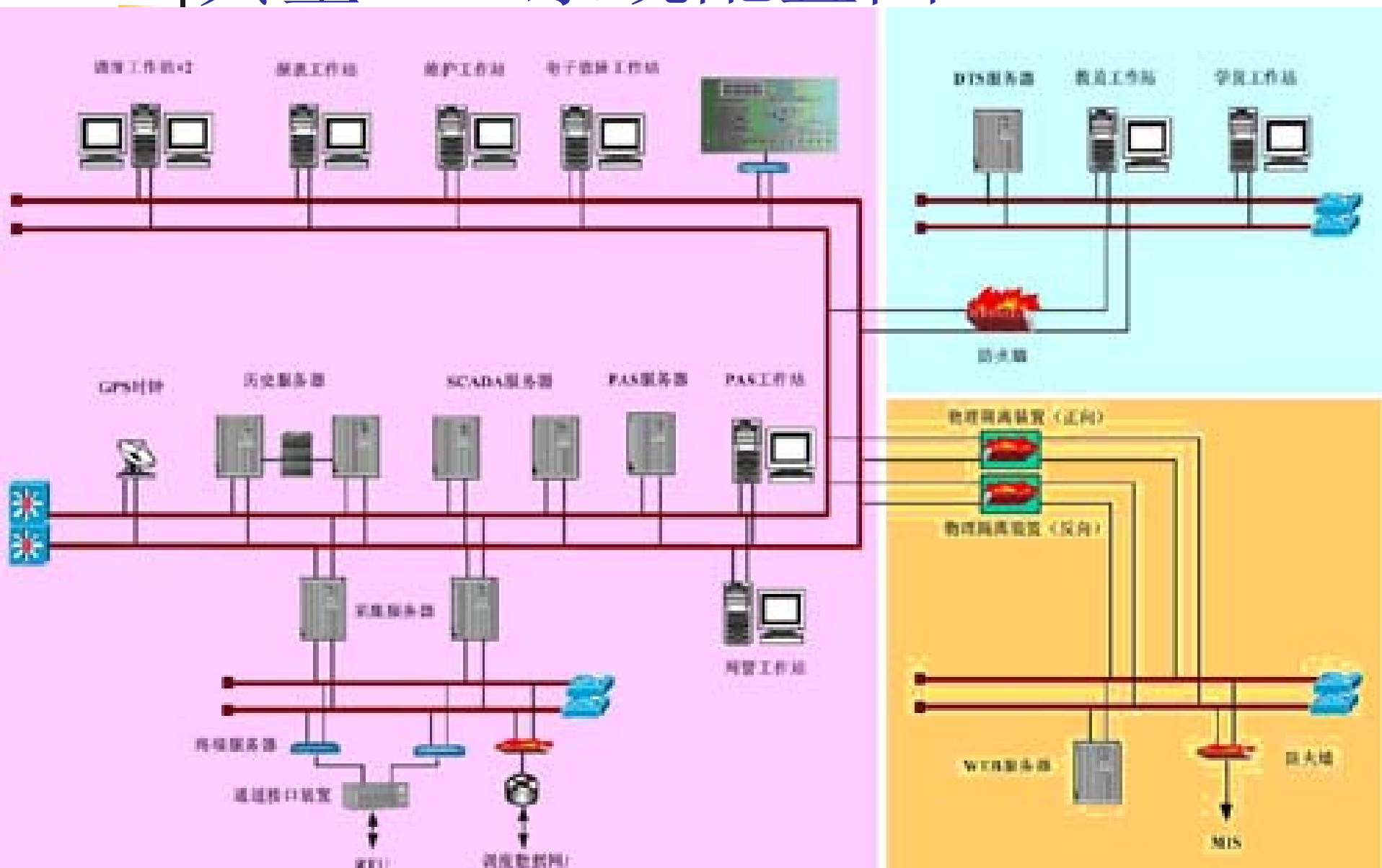


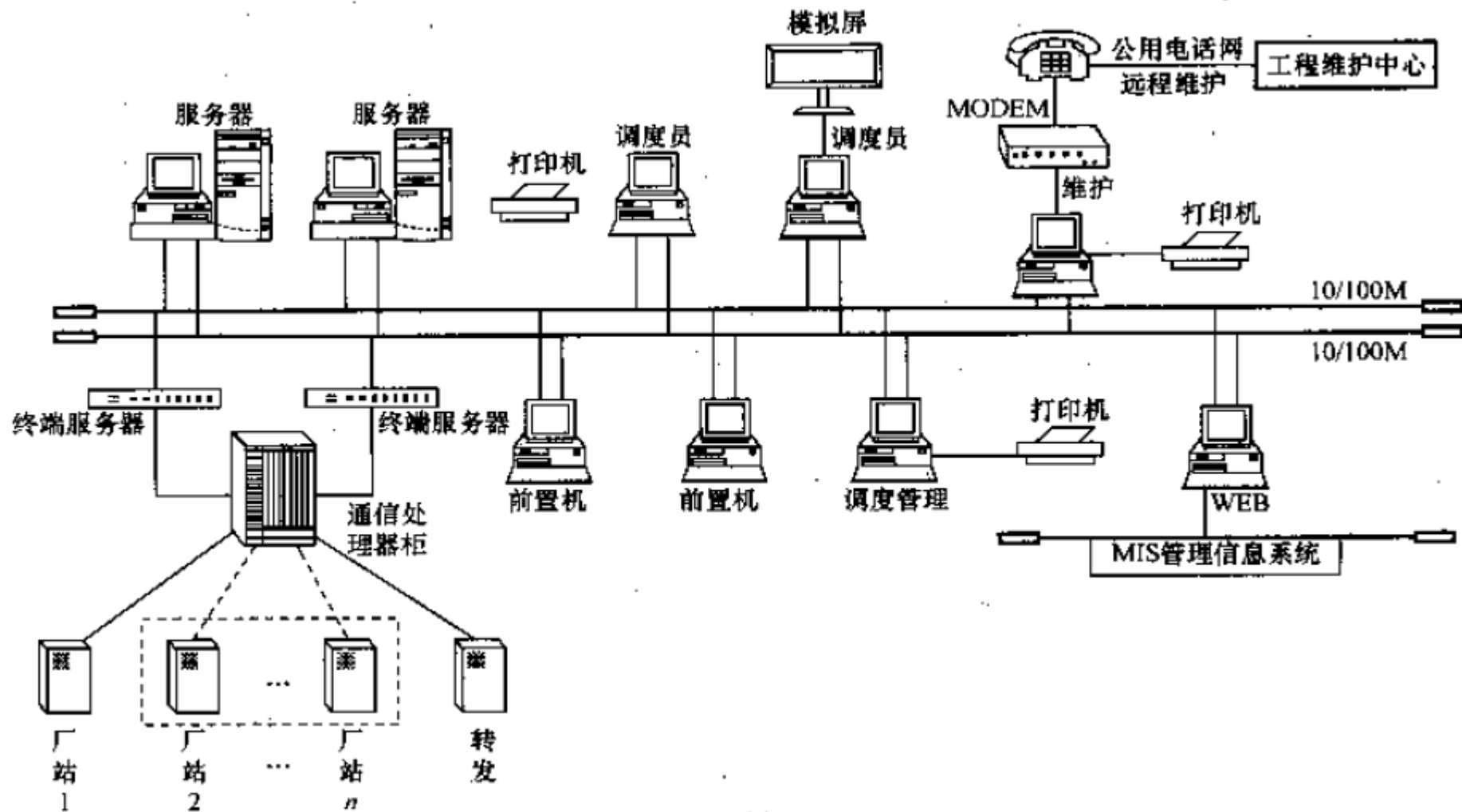
电力一次系统





典型EMS系统配置图







数据采集与监控系统

采集电力系统运行的实时数据的自动化系统。主要功能有：

- **数据采集与数据处理**——由装设在发电厂、变电所内的远动终端RTU(Remote terminal unit)采集数据，通过RTU与调度中心之间的通信通道传送信息。
- **监视和报警**——越限报警、故障报警、故障记录、远方操作等，以协助调度人员进行电力系统的实时运行管理。
- **事件顺序记录及事故追忆**
- **数据管理**

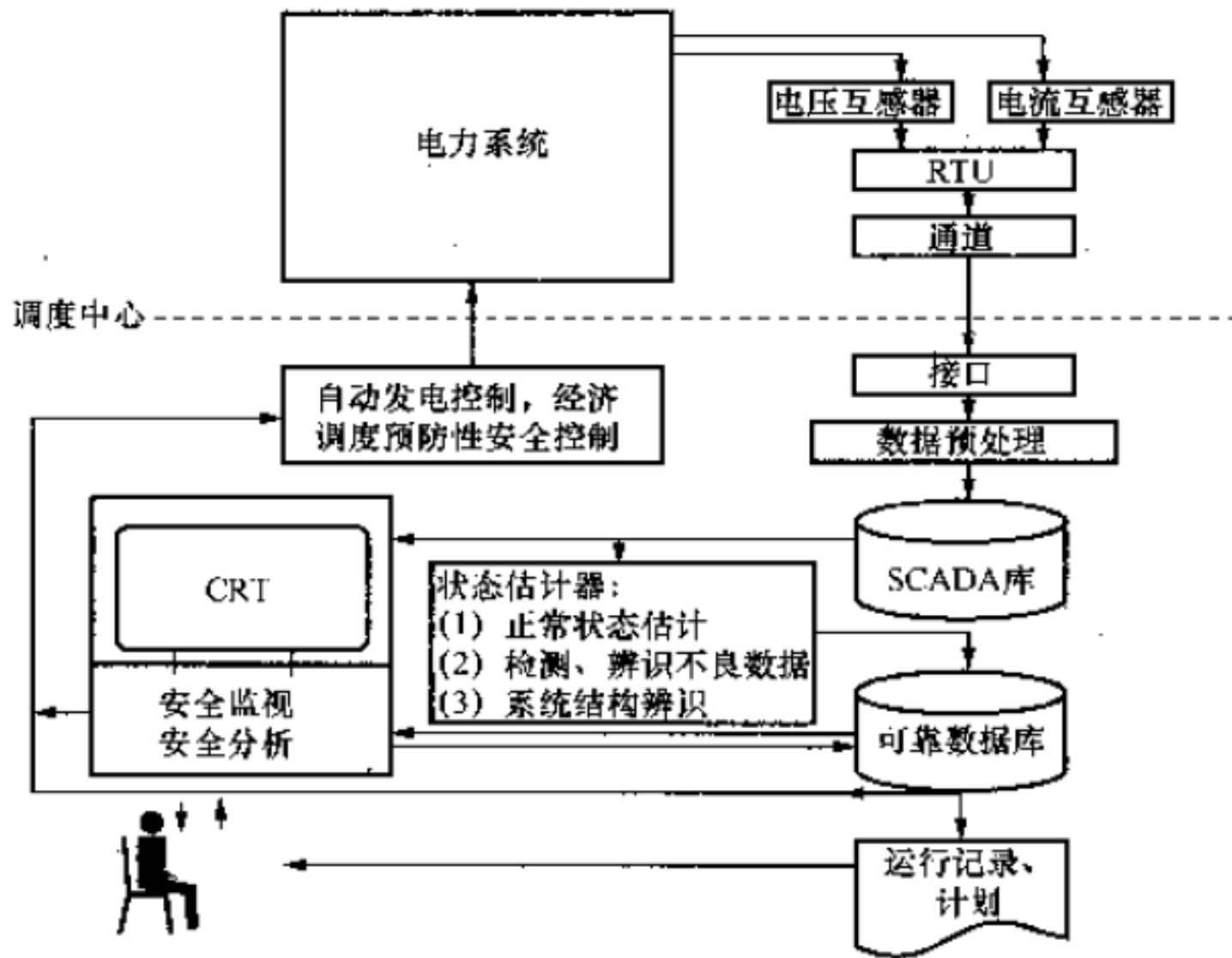


状态估计SE(State Estimator)

- 对系统中某一时间断面的遥测遥信信息进行数据处理。
 - 提高实时数据的精度
 - 剔除不良数据
 - 补充测量的不足以建立高质量的实时数据库



状态估计在电力调度自动化系统中的作用





安全分析SA(Security Analysis)

- 电力系统的安全可以用该系统免遭事故破坏的能力来度量
- 若发生任何一种事故均不会发生用户停电、潮流、电压越限、稳定性破坏，则称此系统处于正常安全状态
- 安全分析的主要内容是对运行中的电力系统进行各种可能发生的预想事故的**预计算**



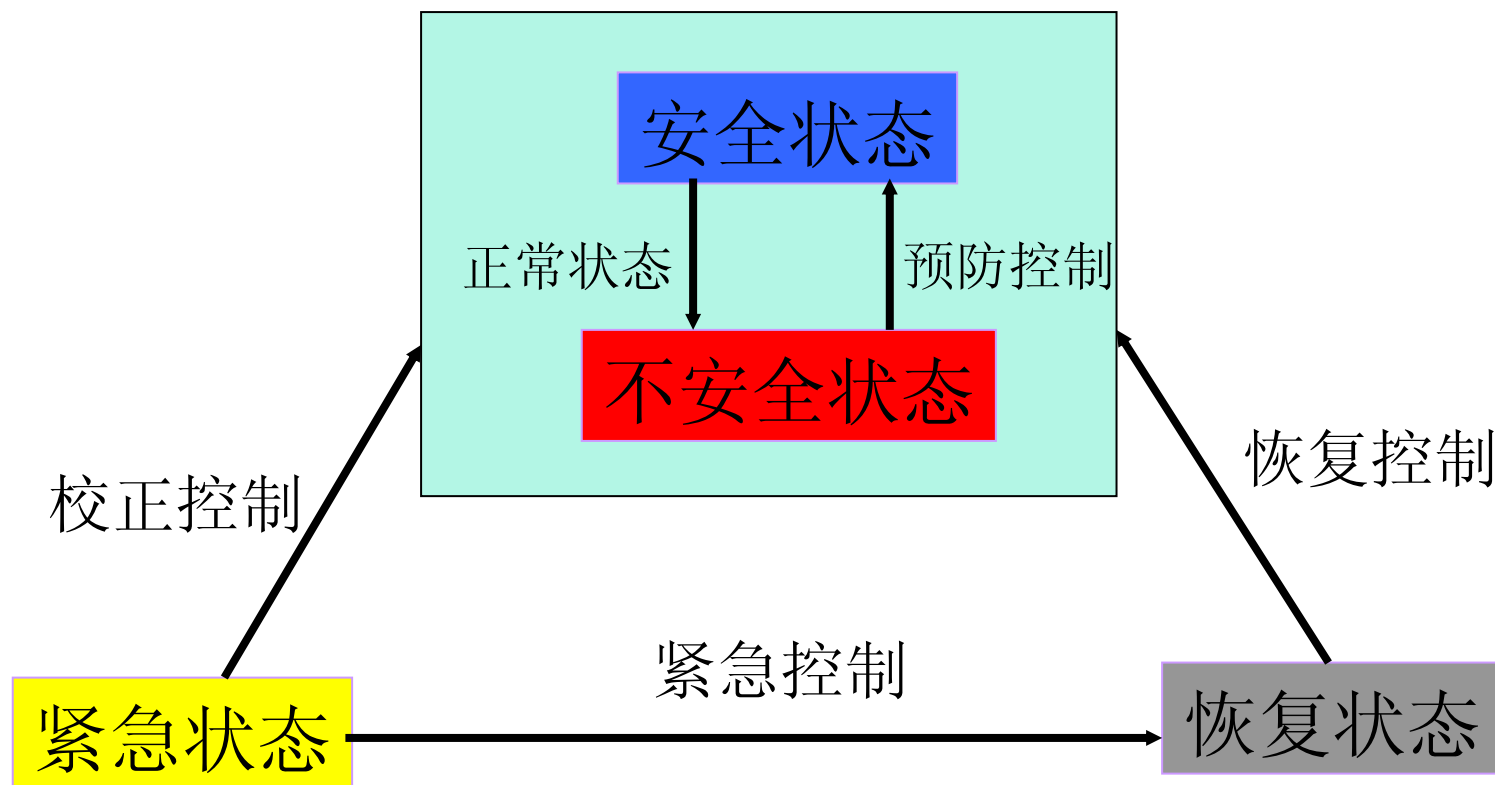
N-1 准则

在电网调度工作中，一般采用 $N-1$ 准则进行安全分析，即在某一种运行方式下，电网中有 N 台运行中的主要发、输、变电设备，要分析其中某一元件故障断开后，电网还能否满足安全运行的要求。为了考虑更严重的事故，还可分析一台最大机组和一条电源线路同时发生故障的情况。在电源备用容量较大的电网中，一般要求 $N-1$ 检验时，电网不会发生电压和频率较大降低，更不应发生稳定破坏等严重事故。



安全控制SC(Security Control)

- 保持电力系统处于安全运行状态的控制





自动发电控制AGC(Automatic Generation Control)

- 跟踪负荷的变化进行一次调频与二次调频
- 对计划性的负荷变化按发电计划调整出力。对于偏离计划的负荷变化实现在线的负荷经济分配，也就是所谓的三次调频
- 监视和调整备用容量以满足系统的安全要求



电压与无功功率控制

- 在线运行时电压与无功功率控制的目的是：
 - 保证用户的电压水平以保证用电设备的高效率运行。
 - 合理利用无功能源使网损最小。
 - 保持系统中枢点电压以满足电压稳定性的要求。
- 在调度中心通过实时数据库中的信息，每隔一定时间进行一次电压——无功优化计算，确定实时情况下为使电压与无功进入最优化方式时各种调节设备(静止补偿器、发电机无功、调相机无功出力、变压器分接头)的调节量，并进行远方自动控制。



自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC)、自动电压控制 (Automatic Voltage Control, AVC) 和自动稳定控制 (Automatic Stability Control, ASC) 被总称为现代电网三大自动控制系统, 也可简称为“3A 系统”。



调度员培训仿真DTS(Dispatcher Training Simulator)

- 培训调度人员使之有能力对电力系统进行运行管理
- 调度员在培训仿真器上工作，与在实际调度中心管理一个实际电力系统一样
- 在仿真器上模拟系统的各种运行方式、事故及操作的全系统场景



电力系统的可调可控点

- (1) 发电机组调速器（调节原动机的进汽量或进水量）——调节发电机有功功率 P ；
- (2) 发电机励磁调节器（调节发电机的转子励磁电流）——调节发电机无功功率 Q ；
- (3) 变压器档位调节开关（改变变压器绕组的匝数比和电压比）——调节变压器二次侧线电压；
- (4) 断路器（控制电路的通/断）——投入/切除发电机、变压器、线路、负荷、电容器、电抗器、制动电阻，以及电网的解列/并网；
- (5) 调相机励磁调节器（调节调相机的转子励磁电流）——调节调相机无功功率 Q ；
- (6) 静止补偿器（调节晶闸管的导通角）——调节其无功功率 Q ；
- (7) 汽轮机组快关汽门——快速减少发电机有功功率 P ；
- (8) 发电机灭磁开关——快速减少发电机定子电压。



5.2 电力系统的有功平衡与频率调整

5.2.1 电力系统的有功平衡

功率平衡关系：

$$\Sigma P_G = \Sigma P_L + \Sigma \Delta P_l + \Sigma \Delta P_g$$

ΣP_G - 电网中所有发电机发出功率的总和。

ΣP_L - 电网用户负荷总和。

$\Sigma \Delta P_l$ - 网络中线路和变压器上的有功功率损耗。

$\Sigma \Delta P_g$ - 网络内发电厂本身厂用电总和。

$$\omega = 2\pi f \quad \Rightarrow \quad P_T \equiv P_G \quad \begin{cases} P_T \geq P_G \\ P_T \leq P_G \end{cases}$$

原动机输入功率 \rightarrow $P_T \equiv P_G$ \rightarrow 发电机输出电磁功率



有功功率负荷的变动及其分类控制

■ 系统负荷可以看作由以下三种具有不同变化规律的变动负荷组成：

(1) 变动周期小于**10s**，变化幅度小

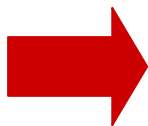


调速器



频率的一次调整

(2) 变动周期在 (**10s, 180s**)，变化幅度较大

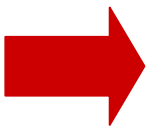


调频器



频率的二次调整

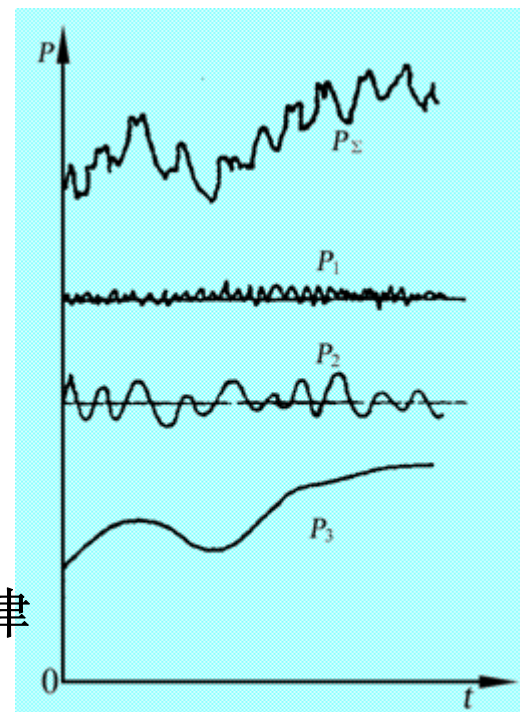
(3) 变动周期最大，变化幅度最大：气象、生产、生活规律



根据预测
负荷，在
各机组间
进行最优
负荷分配



频率的三次调整





5.2 电力系统的有功平衡与频率调整

- 为了保证可靠供电和良好的电能质量，系统中的发电设备容量应大于系统的负荷。
- 备用容量：系统中的发电容量大于负荷的部分，分为热备用和冷备用。
 - 热备用：指运行着的发电设备可能发的最大功率与当前系统实际的负荷之差，也称旋转备用；
 - 冷备用：指系统中那些未运行的发电设备可能发的最大功率。



按作用分：

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

按其存在形式分：

(1) 热备用

(2) 冷备用



有功功率电源的最优组合

- 各发电厂（机组）在承担系统负荷时的合理组合
- 各类发电厂的运行特点：

火电厂：

- (1)需支付燃料费用
- (2)最小技术出力
- (3)可调范围小
- (4)热电厂中，热负荷输出功率是强迫功率
- (5)运行效率与蒸汽参数有关：高温高压 > 中温中压

水电厂：

- (1)无需支付燃料费用
- (2)受水库容量限制
- (3)可调范围大。机组投切增减负荷不增加能耗，时间短
- (4)有强迫功率，视不同水电厂而定
调峰机组

核电站：

- (1)一次投资大
- (2)运行费用小
- (3)承担急剧负荷变动、投切时，需增加能耗，时间长
承担基荷



各类发电厂（机组）的合理组合

基本原则：合理利用水资源，分枯水期与洪水期区别对待有调节能力的水电机组

调峰

基荷

基荷

调峰

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

中温中压

高温高压

热电厂可调

当地燃料火电厂

核电站

无调节水电厂、强迫功率



5.2.2 发电机与负荷的功率——频率特性

1. 电力网负荷的功率——频率特性

负荷的功率—频率静特性：系统的其他因素保持不变，负荷吸取的有功功率的大小随系统频率变化的静态关系（额定频率附近）。

负荷功频静特性的斜率：

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f}$$

负荷的单位调节功率

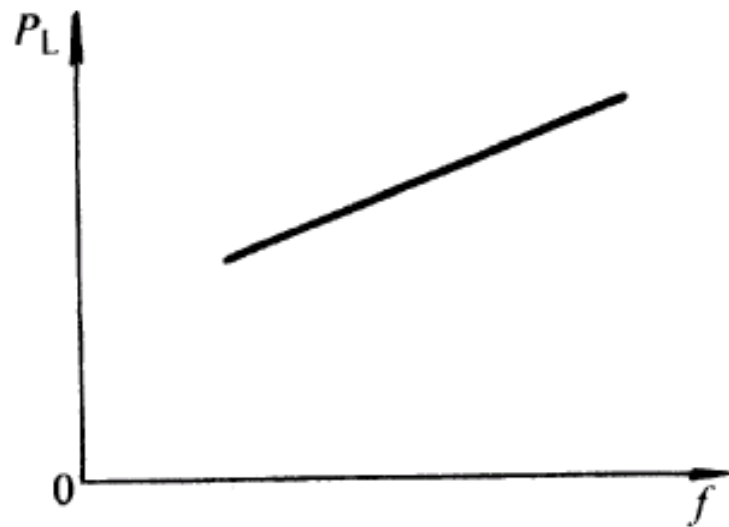


图 7-1 有功负荷的频率特性



电力网负荷的功率—频率特性

负荷的单位调节功率 K_L^*

$$K_L^* = \frac{\Delta P_L^*}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_L / P_{LN}}{\Delta f / f_N} = K_L \frac{f_N}{P_{LN}}$$

ΔP_L —负荷变化量； P_{LN} —额定频率下的系统负荷；
 Δf —系统频率变化量； f_N —系统额定运行频率；

负荷的单位调节功率标志了随频率的升降，负荷消耗功率增加或减小的程度。其大小与额定条件下负荷的频率调节效应相等。



发电机的功率频率——特性

2. 发电机的功率频率——特性

1) 原动机未配置自动调速系统时:

$$P_m = C_1\omega - C_2\omega^2 = C'_1f - C'_2f^2$$

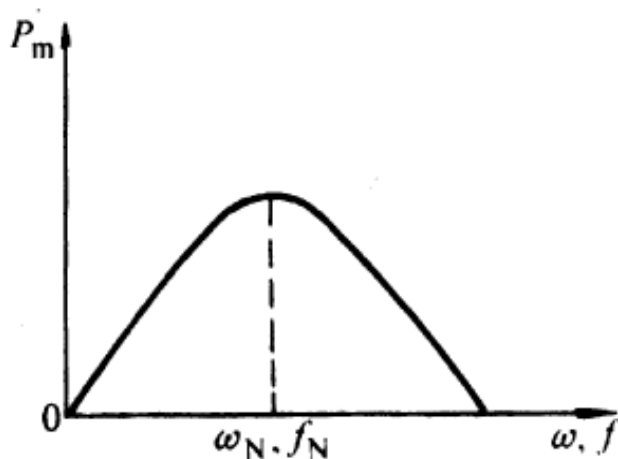


图 7-2 未配置自动调整系统的原动机的功频静特性



发电机的功率频率——特性

2) 原动机配置自动调速系统后:

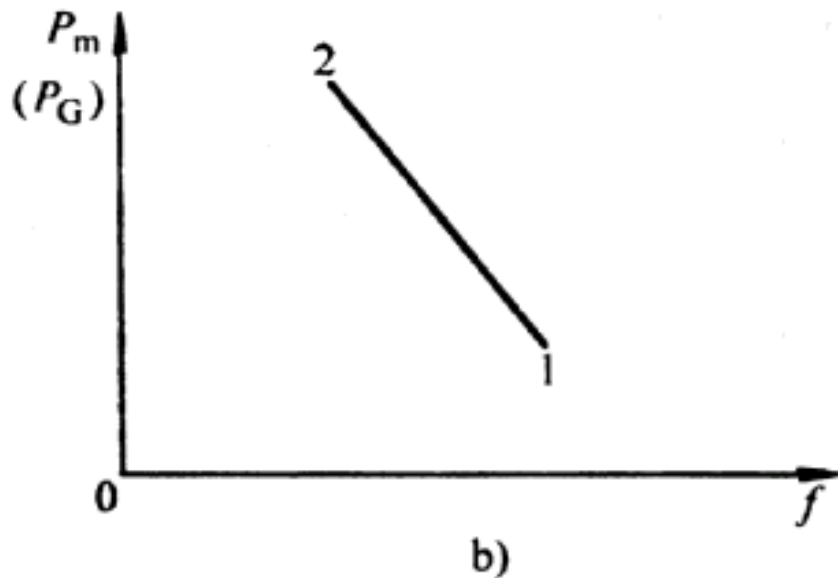
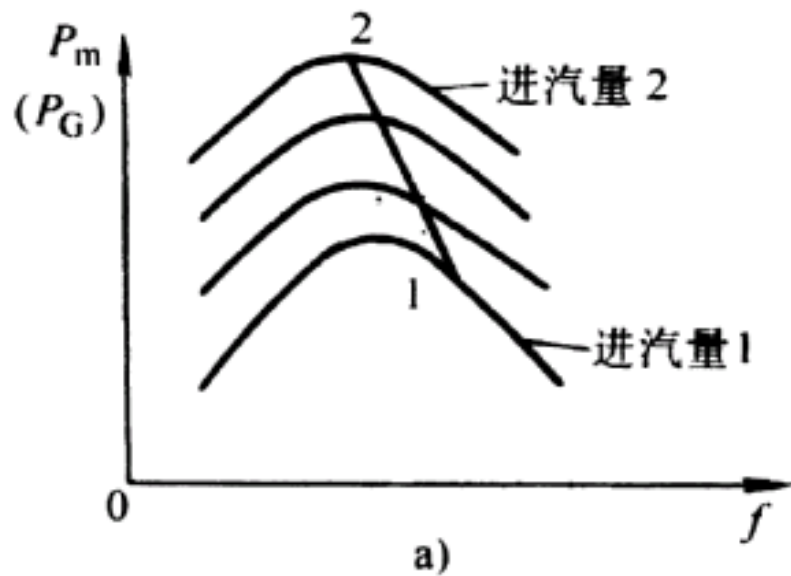


图 7-3 发动机的功频静特性

a) 调速器作用 b) 有调速器时的功频静特性



发电机组的一次调频

发电机的功—频静特性：发电机原动机随机组转速变化不断改变进气量或进水量，而频率将随发电机功率的增大而线性的降低的特性。

发电机组通过调速器实现频率的调整称为一次调频。

发电机功频静特性直线的斜率：

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



发电机的单位调节功率

发电机的单位调节功率：

$$K_{G^*} = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = K_G \frac{f_N}{P_{G \cdot N}}$$

式中： P_{GN} —发电机额定功率。

f_N —系统额定频率。

ΔP_G —发电机功率变化量。

Δf —系统频率变化量。



发电机组的调差系数

发电机组的调差系数:

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

$$\sigma_* = -\frac{1}{K_{G*}} = -\frac{\Delta f_*}{\Delta P_{G*}}$$

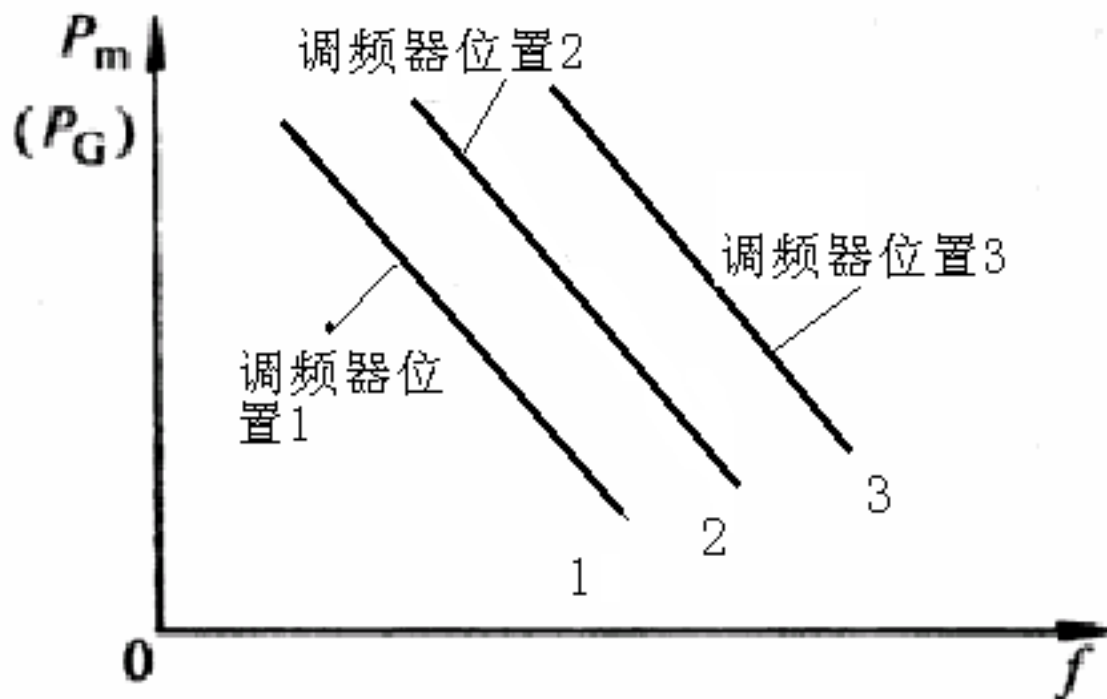
$$\sigma\% = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P_G / P_{G \cdot N}} \times 100\% = \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100$$

$$K_G = \frac{P_{GN}}{f_N \cdot \sigma\%} \times 100$$



有二次调整的功频静特性

- 发电机组通过调频器实现频率的调整称为二次调频





5.2.3 电力系统频率的一次调整

1. 电力系统的一次调频

当系统中装有 n 台有调速器的发电机组时：

$$K_{G1} = - \frac{\Delta P_{G1}}{\Delta f}$$

$$K_{G2} = - \frac{\Delta P_{G2}}{\Delta f}$$

· · ·

$$K_{GN} = - \frac{\Delta P_{GN}}{\Delta f}$$

$$\Delta P_{G1} = -K_{G1} \times \Delta f$$

$$\Delta P_{G2} = -K_{G2} \times \Delta f$$

· · ·

$$\Delta P_{GN} = -K_{GN} \times \Delta f$$

K_G 越大（调差系数越小）的机组增加的有功输出相对越多。



电力系统频率的一次调整

n 台机组参加
调频时:

$$\Delta P_{GS} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Gi} = -\sum_{i=1}^n K_{Gi} \Delta f = -K_{GS} \Delta f$$

$$K_{GS} = K_{G1} + K_{G2} + \cdots + K_{GN}$$

在图中起始运行点--O
点，系统负荷与发电机发
出功率相平衡。

$$P_{L0} = P_{GS0} = P_0$$

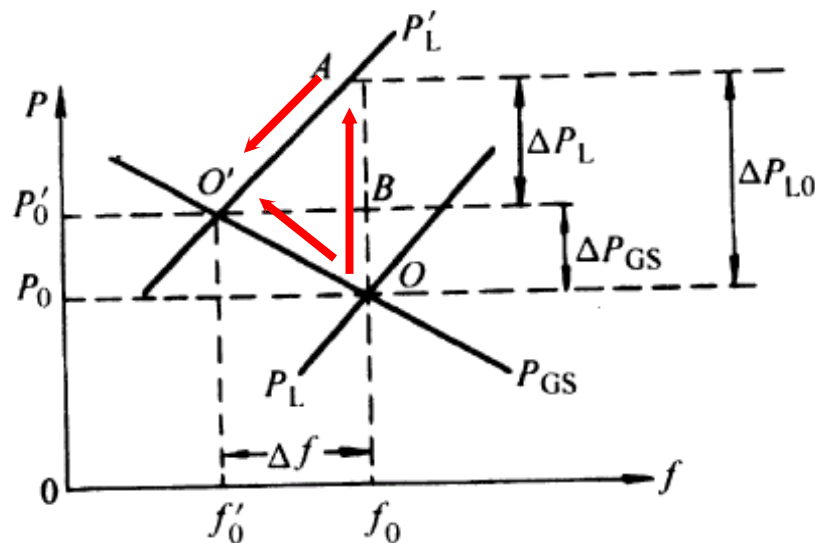


图 7-5 系统频率的一次调整



电力系统频率的一次调整

- 当系统负荷突然增加，系统工作于新的平衡点 O'

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

$$\Delta P_L = K_L \Delta f$$

$$P'_0 = P_0 + \Delta P_{L0} + \Delta P_L = P_0 + \Delta P_{GS}$$

$$\Delta P_{GS} = \Delta P_{L0} + \Delta P_L$$



电力系统频率的一次调整

$$\Delta P_{L0} = \Delta P_{GS} - \Delta P_L = -(K_L + K_{GS})\Delta f = -K_S\Delta f$$

$$K_S = K_{GS} + K_L$$

- K_S ——系统的单位调节功率。

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



发电机组的二次调频

发电机组的二次调频是通过调频器实现的，其作用是使发电机的功频静特性平行移动。

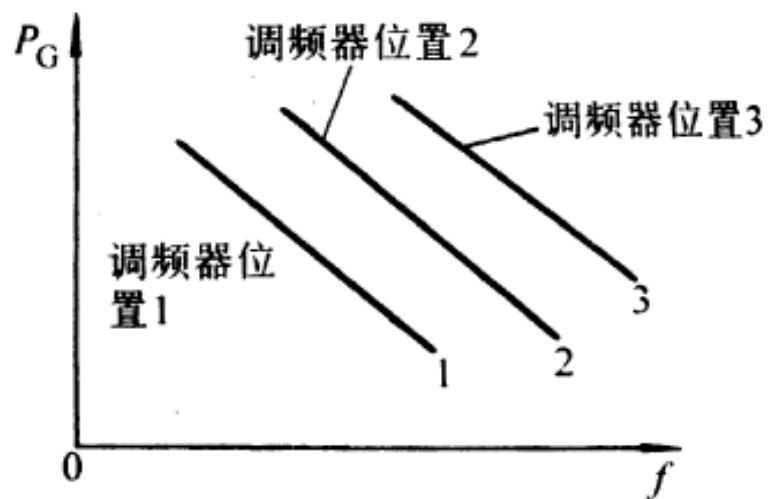


图 7-4 有二次调整时的功频静特性



5.2.4 电力系统频率的二次调整

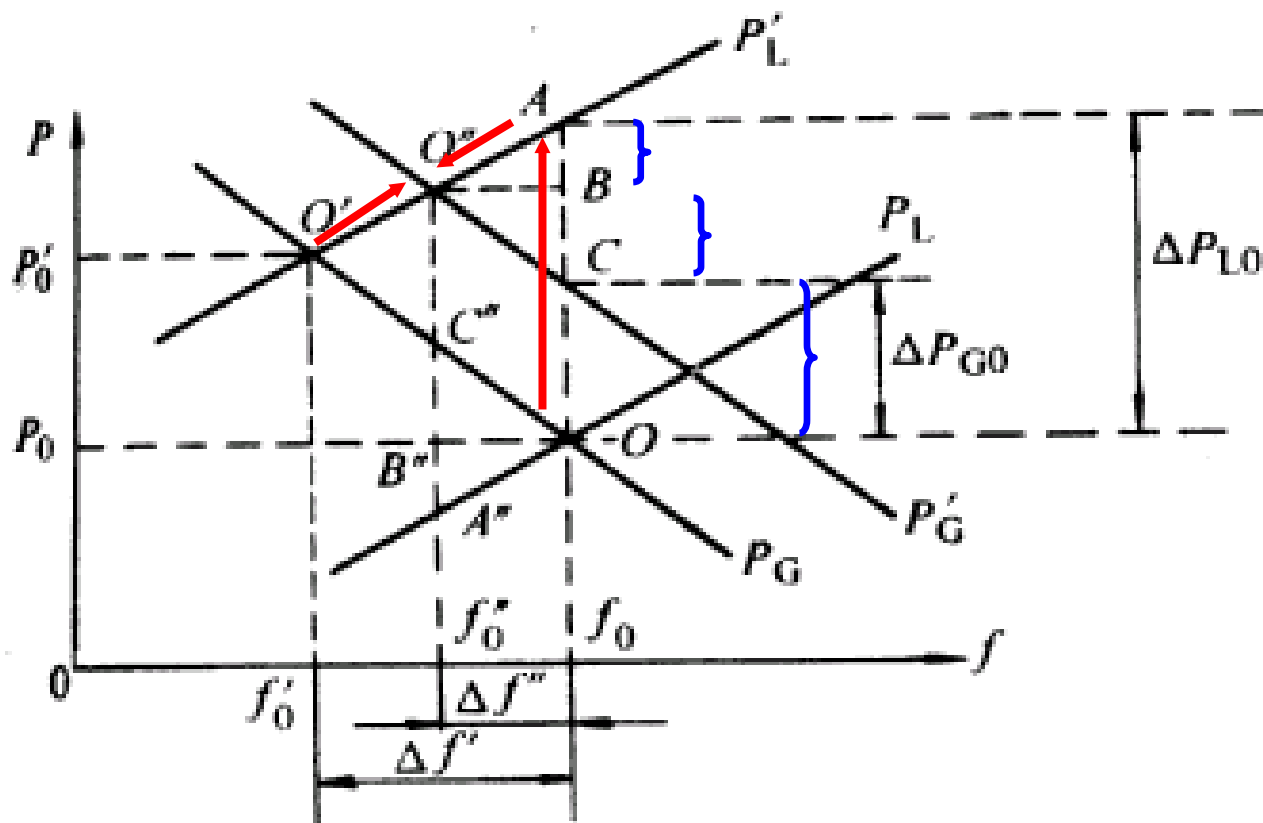


图 7-6 系统频率的二次调整

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''



电力系统功率二次调整

二次调频后，负荷的变化量由三部分组成：

- 二次调整后，发电机组增发的功率 ΔP_{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。

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



电力系统功率二次调整

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

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



5.2.5 互联系统的频率控制

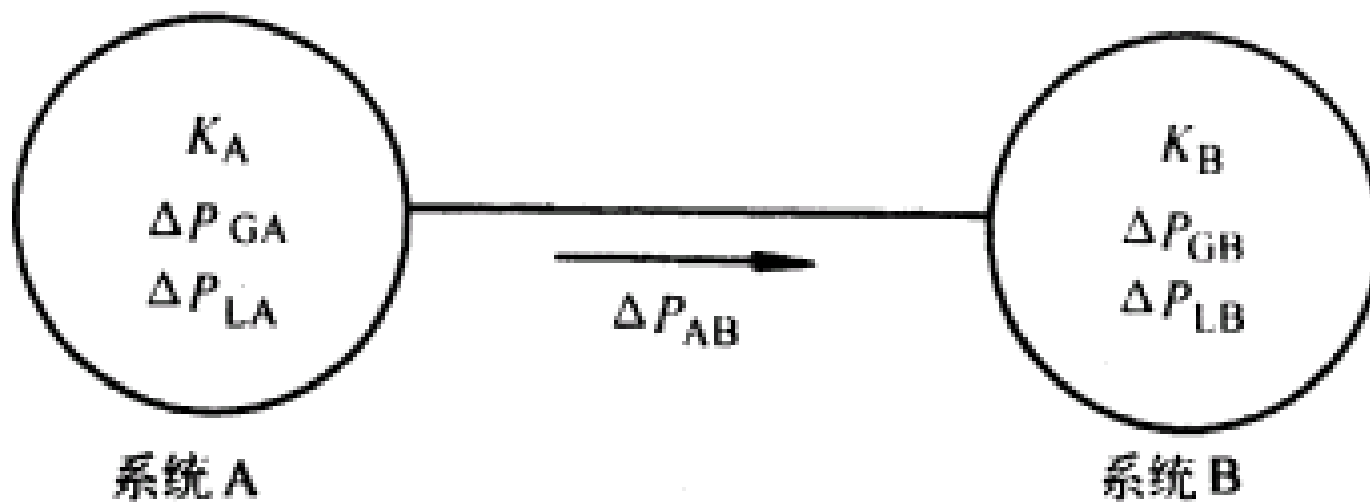


图 7-7 互联系统



5.2.5 互联系统的频率控制

- 将A、B系统看做一个整体：

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

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

对A系统单独分析：

$$\Delta P_{LA} + \Delta P_{AB} - \Delta P_{GA} = -K_A \Delta f$$



5.2.5 互联系统的频率控制

- 对B系统单独分析:

$$\Delta P_{LB} - \Delta P_{AB} - \Delta P_{GB} = -K_B \Delta f$$

联立求解得:

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

令:

$$\Delta P_A = \Delta P_{LA} - \Delta P_{GA}$$

$$\Delta P_B = \Delta P_{LB} - \Delta P_{GB}$$



5.2.5 互联系统的频率控制

ΔP_A 、 ΔP_B —A、B系统的功率缺额。

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

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



互联系统的调频方式

1) 保持频率无偏差的调整方式:

$$\Delta f = 0$$

$$\Delta P_{AB} = -(\Delta P_{LA} - \Delta P_{GA}) = -\Delta P_A$$

$$\Delta P_{AB} = \Delta P_{LB} - \Delta P_{GB} = \Delta P_B$$

联络线上功率变化量的大小取决于两系统的功率缺额。如果两系统均有二次调频且都能平衡各自负荷的变化量，即 $\Delta P_A = \Delta P_B = 0$ ，则 $\Delta P_{AB} = 0$ 。

当一个系统出现大的负荷的变化量，而且又不能由本系统的二次调频补偿，需另一系统支援，会产生联络线功率增大。



互联系统的调频方式

2) 保持联络线交换功率不变的调整方式:

$$\Delta P_{AB} = 0$$

$$\Delta P_A = -K_A \Delta f$$

$$\Delta P_B = -K_B \Delta f$$

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

采用这种方式调频，只需监视联络线功率，当 $\Delta P_{AB}=0$ 时停止调频。

系统负荷的变化由各自的发电机调频得到；2个系统的频率变化相等。



互联系统的频率调整方式

3) 按频率及交换功率均可偏移, 并且 ΔP_{AB} 不能增加 (只能减少) 的调整方式:

$$\Delta P_A = 0$$

$$\Delta P_B = 0$$

如果A、B系统都有二次调频, 当 $\Delta P_A=0$ 、 $\Delta P_B=0$ 时,

有:

$$\Delta f = 0$$

$$\Delta P_{AB} = 0$$

如果A系统有二次调频, 而B系统没有, 即 $\Delta P_A=0$ 、有:

$$\Delta P_A = 0$$

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_{LB}}{K_A + K_B}$$

$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f$$



互联系统的调频

- 采用按频率和交换功率偏移的频率调整方式，既要监视系统频率的偏移，又要联络线功率的偏移。

上述三种调频方式中，以第三种使用最广。



例 5-1

某系统中发电机组的容量和它们的调差系数分别为：

水轮机组：100MW/台 × 2台 $\sigma\% = 2.5$

汽轮机组：100MW/台 × 2台 $\sigma\% = 4.0$

全系统的总负荷为320MW，负荷的单位调节功率
 $K_{L*} = 1.5$ ，当系统负荷增加40MW时，

- ①各机组按平均分配负荷方式；
 - ②汽轮机满载，水轮机每台带60MW负荷的方式运行；
- 系统的频率分别下降多少？



解： 按

$$K_G = \frac{P_{GN}}{f_N \sigma \%} \times 100$$

计算各种发电机的 K_G

水轮机

$$K_G = \frac{100}{50 \times 2.5} \times 100 MW / Hz = 80 MW / Hz$$

汽轮机

$$K_G = \frac{100}{50 \times 4} \times 100 MW / Hz = 50 MW / Hz$$

负荷

$$K_L = K_{L^*} \frac{P_{LN}}{f_N} = 1.5 \times \frac{320}{50} MW / Hz = 9.6 MW / Hz$$



1、 $K_s = (80 + 80 + 50 + 50 + 9.6) \text{ MW/Hz} = 269.6 \text{ MW/Hz}$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_s} = -\frac{40}{269.6} \text{ Hz} = -0.148 \text{ Hz}$$

当系统负荷增加40MW时，系统频率下降0.148Hz。

2、 $K_s = 80 + 80 + 9.6 = 169.6 \text{ MW/Hz}$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_s} = -\frac{40}{169.6} \text{ Hz} = -0.236 \text{ Hz}$$

当系统负荷增加40MW时，系统频率下降0.236Hz。



例 5—2

互联系统由A、B系统互联构成，各系统以自身容量为基准的单位调节功率值为：

$$P_{GAN} = 1200\text{MW}, K_{GA*} = 20, K_{LA*} = 1.5;$$

$$P_{GBN} = 1800\text{MW}, K_{GB*} = 30, K_{LB*} = 1.5。$$

A系统负荷变化为100MW，试计算下列情况下的频率偏差和联络线功率的变化量：

- ① A、B系统都参加一次调频；
- ② A、B系统参加一次调频，A系统二次调频增发功率50MW；
- ③ A、B系统都参加一次调频，B系统二次调频增发功率100MW。



例 5—2

解: $K_{GA} = K_{GA*} P_{GAN} / f_N = (20 \times 1200 / 50) \text{ MW/Hz} = 480 \text{ MW/Hz}$
 $K_{GB} = K_{GB*} P_{GBN} / f_N = (30 \times 1800 / 50) \text{ MW/Hz} = 960 \text{ MW/Hz}$
 $K_{LA} = K_{LA*} P_{GAN} / f_N = (1.5 \times 1200 / 50) \text{ MW/Hz} = 36 \text{ MW/Hz}$
 $K_{LB} = K_{LB*} P_{GBN} / f_N = (1.5 \times 1800 / 50) \text{ MW/Hz} = 454 \text{ MW/Hz}$

1) A、B两系统都参加一次调频

$$K_A = (480 + 36) \text{ MW/Hz} = 516 \text{ MW/Hz}$$

$$K_B = (960 + 54) \text{ MW/Hz} = 1014 \text{ MW/Hz}$$

$$\Delta P_A = 100 \text{ MW}$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{100 + 0}{516 + 1014} \text{ Hz} = -0.065 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B} = -\frac{1014 \times 100}{516 + 1014} \text{ MW} = -66.27 \text{ MW}$$

这种情况频率下降不大, B系统通过联络线向A系统增送功率66.27MW。



2) A、B系统参加一次调频

$$K_A=516\text{MW/Hz}, K_B=1014\text{MW/Hz}$$

A系统二次调频增发功率50MW

$$\Delta P_A = \Delta P_{LA} - \Delta P_{GA} = (100 - 50)\text{MW} = 50\text{MW}$$

$$\Delta P_B = 0$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{50 + 0}{516 + 1014}\text{Hz} = -0.033\text{Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B} = -\frac{1014 \times 50}{516 + 1014}\text{MW} = -33.14\text{MW}$$

这种情况由于A系统参加了二次调频，频率偏移减小。B系统通过联络线向A系统增送功率减少。



3) A、B系统参加一次调频

$$K_A = 516 \text{ MW/Hz}, K_B = 1014 \text{ MW/Hz}$$

$$\Delta P_A = \Delta P_{LA} = 100 \text{ MW}$$

B系统参加二次调频，增发100MW

$$\Delta P_B = \Delta P_{LB} - \Delta P_{GB} = -100 \text{ MW}$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{100 - 100}{516 + 1014} \text{ Hz} = 0$$

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B} = \frac{-100(516 + 1014)}{516 + 1014} \text{ MW} = -100 \text{ MW}$$

这种情况由于B系统参加二次调频并实现了无差调节，但联络线功率变化过大，达到100MW。

5.3 电力系统的无功平衡与电压调整



无功平衡（无功电源和无功负荷）

系统无功功率对电压的影响

电压监视与电压管理

电压调整的方法

综合调压



5.3 电力系统的无功平衡与电压调整

5.3.1 电力系统的无功平衡

- 无功平衡：系统无功电源发出的无功功率与系统的无功负荷及无功损耗相平衡。
- 1.无功负荷及无功损耗
 - 1) 无功负荷：滞后功率因数运行的用电设备所吸取的无功功率。
 - 2) 无功损耗：包括输电线路无功损耗和变压器的无功损耗。



5.3.1 电力系统的无功平衡

2. 无功电源

包括同步发电机、调相机、电容器、静止无功补偿、线路充电功率。

- **同步发电机**既是电力系统基本的有功功率电源，同时也是重要的无功功率电源。
- **调相机**实质上是空载运行的同步发电机
 - 过激运行时向系统提供感性无功；
 - 欠激运行时则从系统吸取感性无功功率
 - 改变调相机的励磁可以平滑地改变它的无功功率的大小及方向。但在欠激运行其容量约为过激运行时容量的**50%**时。



5.3.1 电力系统的无功平衡

2. 无功电源

- **并联电容器**向系统供给感性无功功率，它可以根据需要由许多电容器连接成组。

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c}$$

X_c : 电容器的容抗;

U : 电容器端点电压。

当电压下降时, Q_c 减少, 不利调压



5.3.1 电力系统的无功平衡

2. 无功电源

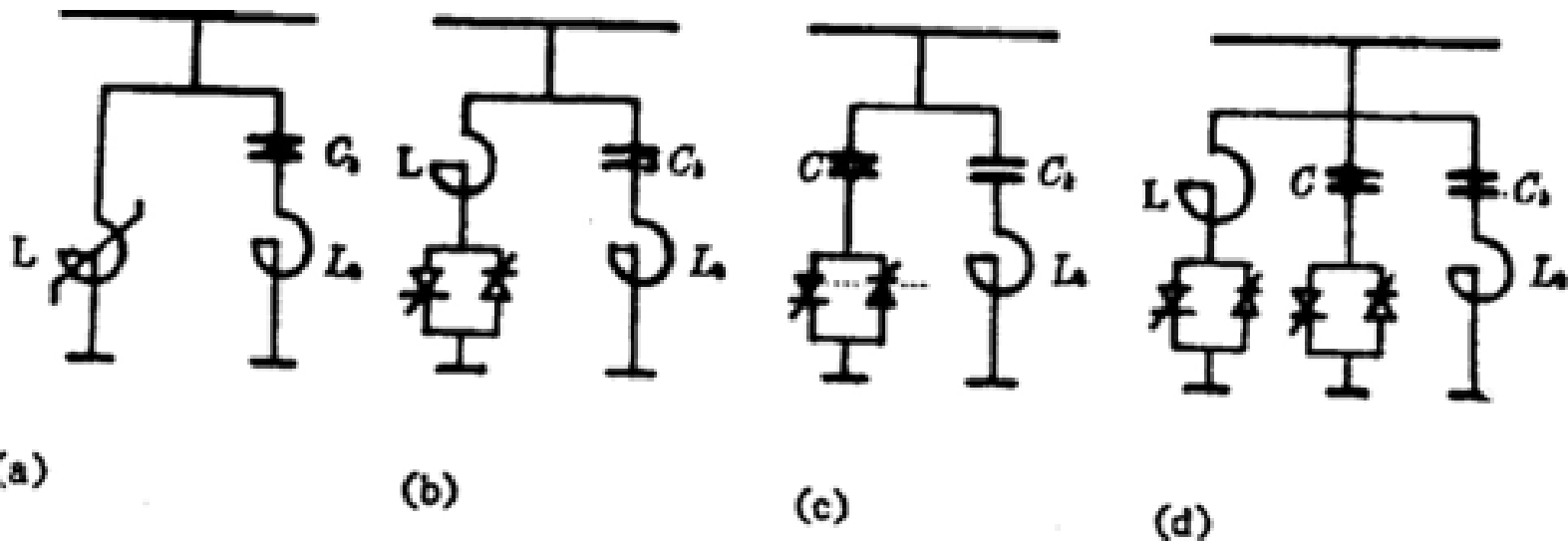
- **静止补偿器**由电容器和可调电抗器组成，电容发出无功，电抗消耗无功，利用大功率晶闸管的控制可平滑地调节它的无功功率的大小。运行维护简单，损耗较小，还能分相补偿，因而已开始大量采用，有替代同步调相机的趋势。



5.3.1 电力系统的无功平衡

2. 无功电源

■ 静止补偿器



(a) 自饱和电抗器

(b) 可控硅相控电抗器

(c) 可控硅投切电容器

(d) 可控硅控制电抗和电容



5.3.1 电力系统的无功平衡

3. 无功平衡

$$\Sigma Q_{GC} = \Sigma Q_L + \Sigma \Delta Q_l + \Sigma \Delta Q_T$$

$$\Sigma Q_{GC} = \Sigma Q_G + \Sigma Q_{C1} + \Sigma Q_{C2} + \Sigma Q_{C3}$$

Q_G —发电机发出的无功

Q_{C1} —调相机发出的无功

Q_{C2} —电容器供给的无功

Q_{C3} —静止补偿器供给的无功



5.3.2 电力系统无功功率对电压的影响

忽略电压角度对节点注入无功功率的影响，以及电压幅值对节点注入有功的影响。

线路电压降为：

$$\Delta U_{12} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

$$\delta U_{12} = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

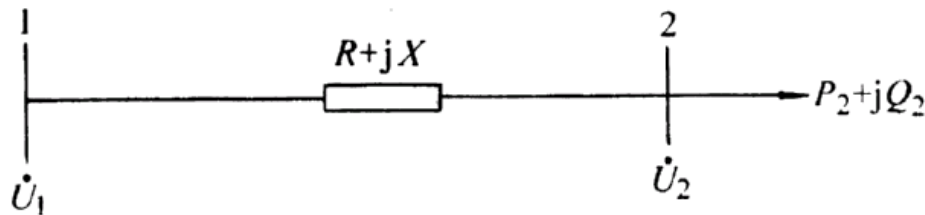


图 7-9 简单输电线路等效电路



5.3.2 电力系统无功功率对电压的影响

- 以末端电压为参考相量:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \Delta U_{12} + j\delta U_{12} = (U_2 + \Delta U_{12}) + j\delta U_{12} \\ &= U_1 \cos \delta_{12} + jU_1 \sin \delta_{12}\end{aligned}$$

考虑到高压线路 $R \ll X$, 可简化为:

$$\begin{aligned}U_1 \cos \delta_{12} + jU_1 \sin \delta_{12} &= U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \\ &\approx U_2 + \frac{Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X}{U_2}\end{aligned}$$



5.3.2 电力系统无功功率对电压的影响

$$U_1 \cos \delta_{12} = U_2 + \frac{Q_2 X}{U_2}$$

$$Q_2 = \frac{U_2}{X} (U_1 \cos \delta_{12} - U_2)$$

一般线路的始端和末端电压相角差很小，则：

$$\cos \delta_{12} \approx 1$$

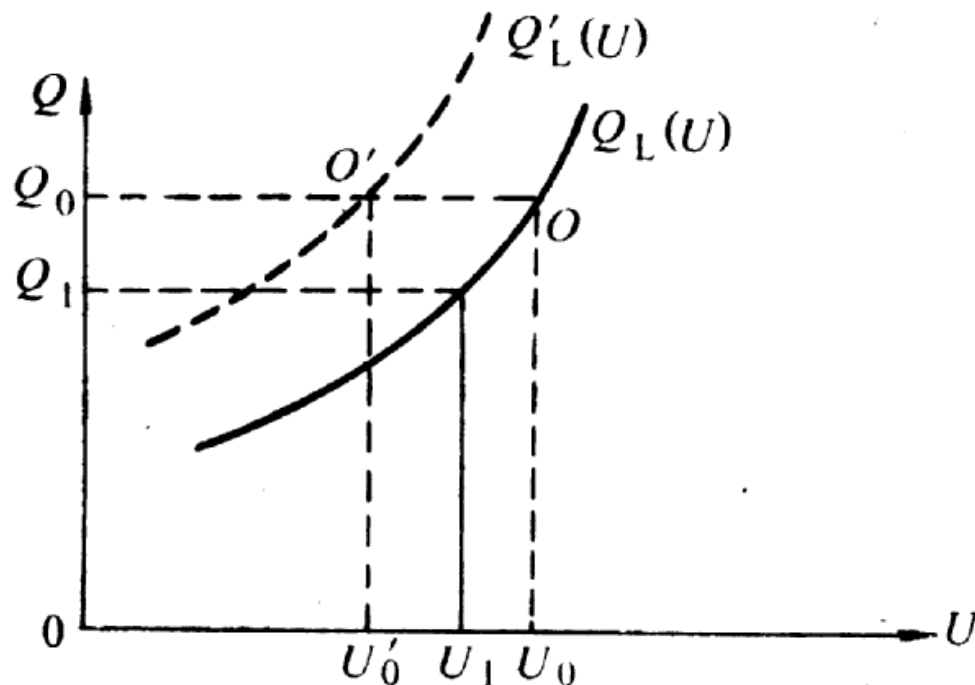
$$Q_2 = \frac{U_2}{X} (U_1 - U_2)$$

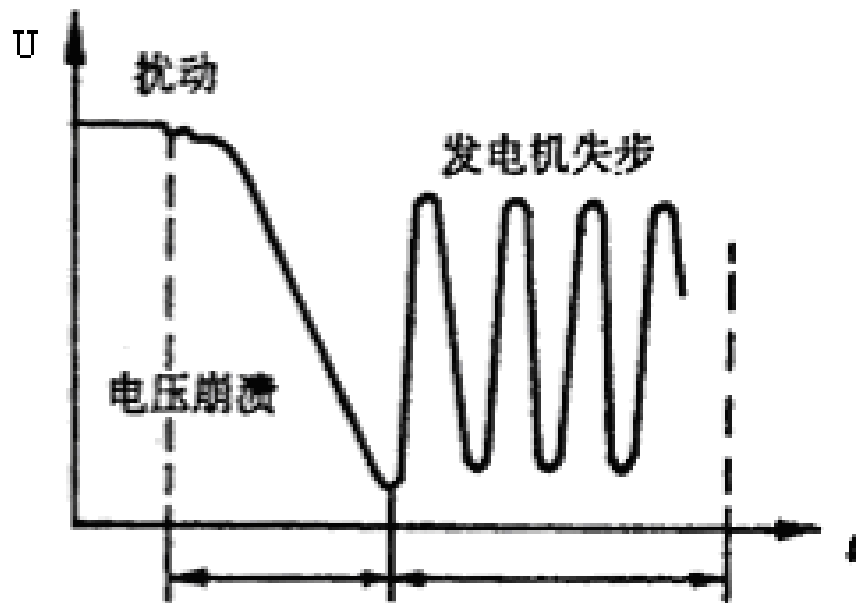
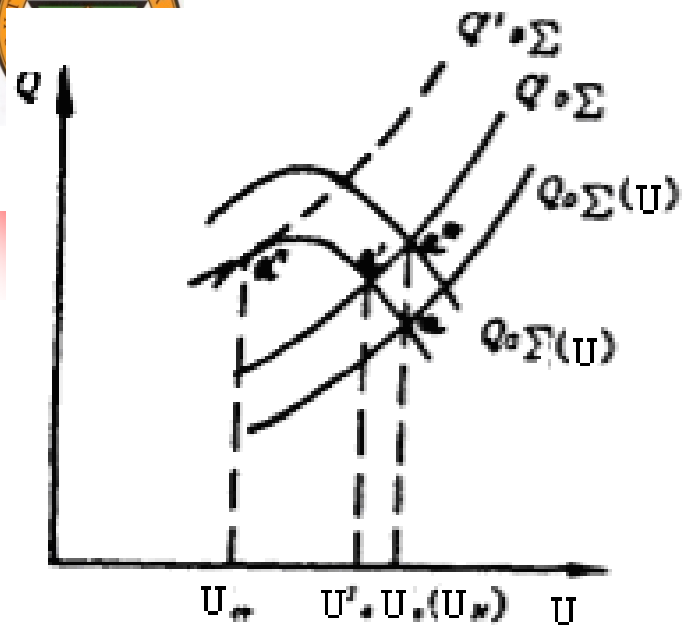


5.3.2 电力系统无功功率对电压的影响

负荷的**静态电压特性**：仅考虑电压变化对负荷吸取无功功率的影响特性，即负荷的无功功率与端电压的关系。

结论：系统无功不足将导致网络电压水平降低。





要将系统的电压偏移控制在允许范围内，首先必须保证有充足的无功电源。

系统要有一定的**无功备用容量**以应付无功负荷的增加，一般为最大无功负荷的7~8%。电力系统的无功电源容量通常大于系统的有功电源容量（即装机容量），约为后者的1.5~1.7倍。



《电力系统电压的无功电力技术导则》的要求

无功必须做到分层分区的平衡

- 电力用户的功率因数应达到下列标准：
 - 高压供电的工业用户和高压装有带负荷调压装置的电力用户，功率因数为0.9以上；
 - 其它100kVA及以上电力用户和大、中型电力排灌站，功率因数为0.85以上；
 - 趸售和农业用电，功率因数为0.80以上。
 - 对电网，500（330）kV线路的充电功率应基本上予以补偿；200kV变压器副方的功率因数不小于0.95；110kV至35kV变压器副方的功率因数不小于0.9。



5.3.3 电压监视点与电压管理

■ 1. 电压监视中枢点

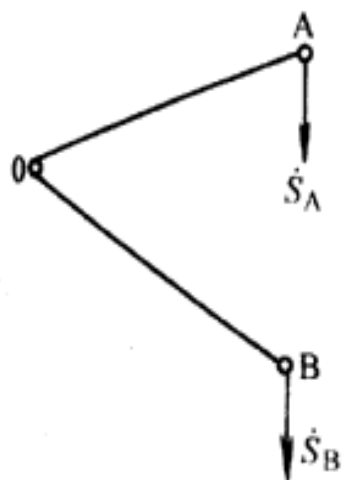
在系统中选择少数有代表性的发电厂、变电所作为电压监视点，称为**电压监视中枢点**。

一般选择区域性发电厂的高压母线，枢纽变电所的二次母线以及有大量地方性负荷的发电厂母线及少量负荷端母线作为电压监视中枢点。

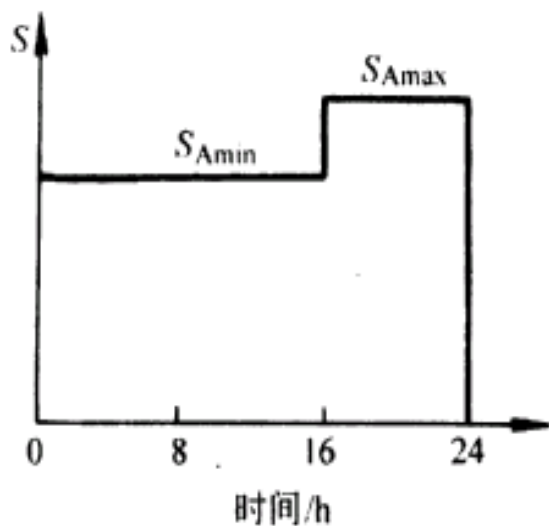


5.3.3 电压监视点与电压管理

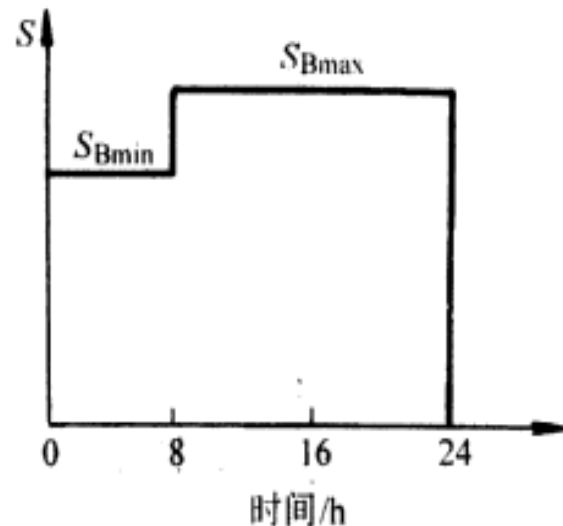
2. 中枢点电压允许变化范围



a)



b)



c)

图 7-11 简单电力网及各负荷曲线

a) 简单电力图 b) 负荷 A 负荷曲线 c) 负荷 B 负荷曲线



2. 中枢点电压允许变化范围

如图5—11所示的简单电力网，负荷A、B的允许电压偏移均为 $\pm 5\%$ ，A、B在最大负荷和最小负荷时的电压损耗分别为： $\Delta U_{A\max}$ 、 $\Delta U_{B\max}$ 、 $\Delta U_{A\min}$ 、 $\Delta U_{B\min}$ 。

1) 为满足A点电压要求，O点电压变化范围为：

0~16时：

$$U_{O\max} = 1.05U_N + \Delta U_{A\min}$$

$$U_{O\min} = 0.95U_N + \Delta U_{A\min}$$

16~24时：

$$U_{O\max} = 1.05U_N + \Delta U_{A\max}$$

$$U_{O\min} = 0.95U_N + \Delta U_{A\max}$$



2. 中枢点电压允许变化范围

2) 为满足B点电压要求, O点电压变化范围为:

0~8小时:

$$U_{O \max} = 1.05U_N + \Delta U_{B \min}$$

$$U_{O \min} = 0.95U_N + \Delta U_{B \min}$$

8~24小时:

$$U_{O \max} = 1.05U_N + \Delta U_{B \max}$$

$$U_{O \min} = 0.95U_N + \Delta U_{B \max}$$

设:

$$\Delta U_{A \max} = \Delta U_{B \max} = 0.04U_N$$

$$\Delta U_{A \min} = \Delta U_{B \min} = 0.01U_N$$



2. 中枢点电压允许变化范围

3) 0点电压变化范围:

0~8 时 : $0.96 U_N \sim 1.06 U_N$

8~16时:

为满足A点负荷, 0点电压: $0.96U_N \sim 1.06U_N$

为满足B点负荷, 0点电压: $0.99U_N \sim 1.09U_N$

同时满足A、B两点负荷要求, 0点电压:

$$0.99U_N \sim 1.06U_N$$

16~24时: $0.99 U_N \sim 1.09 U_N$



2. 中枢点电压允许变化范围

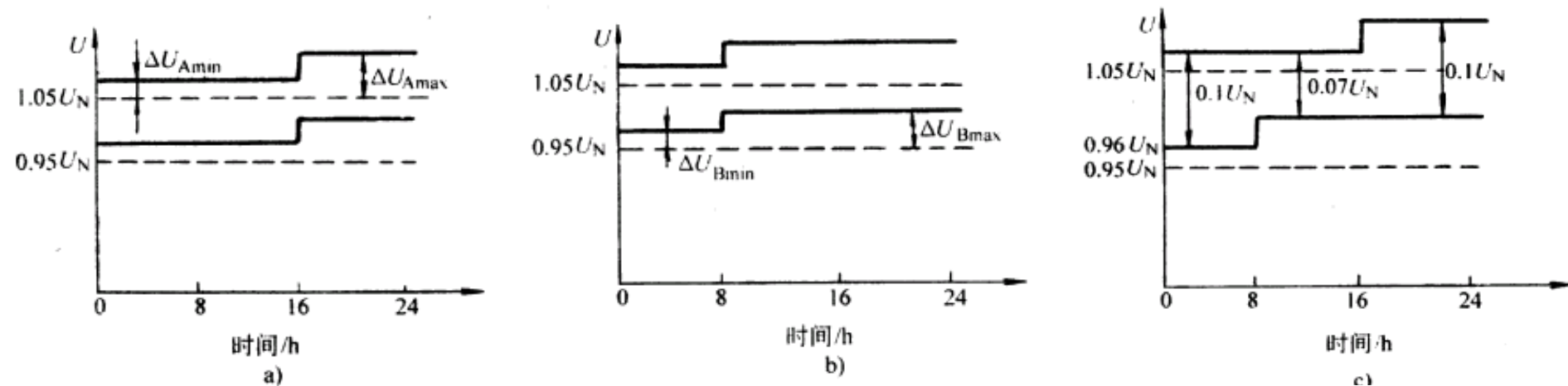


图5 - 1 2 中枢点0点电压变化范围

a) 满足A点负荷时
0点电压变化范围

b) 满足B点负荷
时0点电压变化范围

c) 同时满足A、
B两点负荷时0点
电压变化范围

中枢点电压允许偏差范围的确定

- 下限：由网络中电压损失大的点确定
- 上限：由网络中电压损失小的点确定



3. 中枢点电压控制

- 1) 逆调压方式：适合线路较长，负荷变动大
在最大负荷时电压为 $105\% U_N$ ；在最小负荷时电压为 U_N 。
- 2) 顺调压方式：适合负荷变动小，用户允许电压偏移
在最大负荷时电压不低于 $102.5\% U_N$ ；在最小负荷时电压不高于 $107.5\% U_N$ 。
- 3) 恒调压方式：适合负荷变动小，电压损失小
中枢点电压保持在 $102\% \sim 105\% U_N$ 。



5.3.4 电压调整的方法

■ 1. 发电机调压:

通过调节励磁电流改变发电机电压，允许调节范围（95%~105%） U_N 。

■ 2. 调节变压器分接头调压:

变压器分接头的选择:

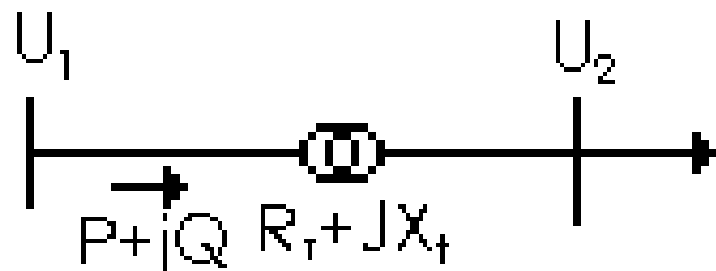


图5-14 降压变压器



变压器分接头选择计算

1) 根据 $U_{1\max}$ 、 $U_{1\min}$ 以及通过变压器的最大、最小负荷，求变压器的电压损耗 ΔU_{\max} 、 ΔU_{\min} 。

$$\Delta U_{\max} = \frac{P_{\max} R_T + Q_{\max} X_T}{U_{1\max}}$$

$$\Delta U_{\min} = \frac{P_{\min} R_T + Q_{\min} X_T}{U_{1\min}}$$

2) 求取最大负荷和最小负荷时变压器分接头的电压值，并取其平均值。

$$U'_{2\max} = U_{1\max} - \Delta U_{\max}$$

$$U'_{2\min} = U_{1\min} - \Delta U_{\min}$$



变压器分接头选择计算

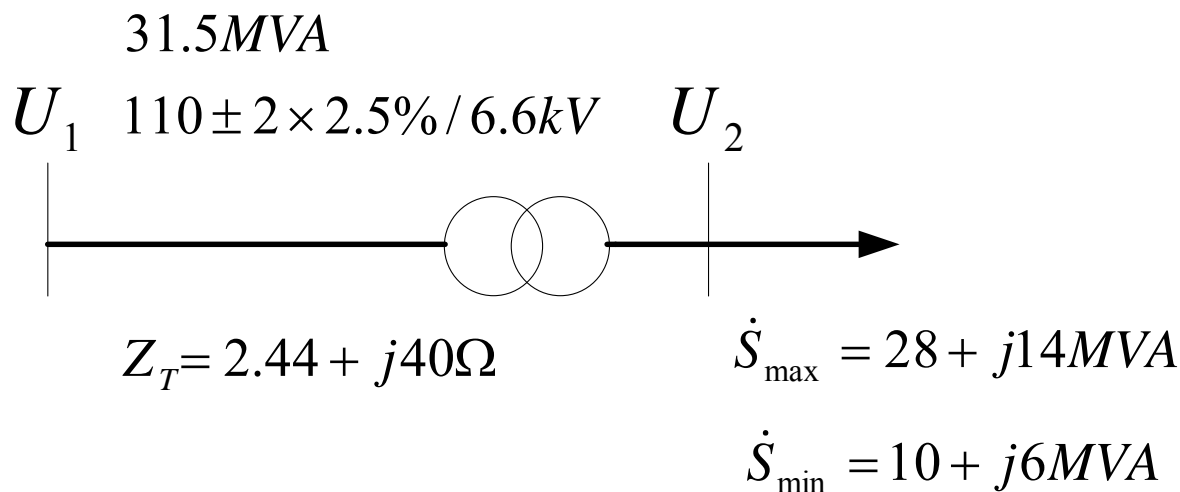
$$U_{1\max t} = U'_{2\max} \frac{U_{2N}}{U_{2\max}}$$

$$U_{1\min t} = U'_{2\min} \frac{U_{2N}}{U_{2\min}}$$

$$U_{1t} = \frac{U_{1\max t} + U_{1\min t}}{2}$$

- 3) 选择一个最接近 U_{1t} 的变压器分接头。
- 4) 用选定的分接头验算低压侧电压在最大和最小负荷期间是否满足要求。

一降压变压器，其归算到高压侧的参数、负荷及分接头范围已标注于图中，经潮流计算得到最大负荷时高压侧电压为110kV，最小负荷时为115 kV。要求低压母线上电压不超出6 ~ 6.6kV的范围。试选择分接头。



解： 由分接头范围 $\pm 2 \times 2.5\%$ 可知其为一普通变压器。

先计算变压器中的电压损耗 ΔU 。因已知的是原方电压 U_1 ，

故需先求出原方功率 \dot{S}_1



$$\dot{S}_{1\max} = \dot{S}_{2\max} + \Delta\dot{S}_{\max} = 28 + j14 + \frac{28^2 + 14^2}{110^2} (2.44 + j40) = 28.1976 + j17.2397 \text{ MVA}$$

$$\dot{S}_{1\min} = \dot{S}_{2\min} + \Delta\dot{S}_{\min} = 10.0274 + j6.4496 \text{ MVA}$$

从而

$$\Delta U_{\max} = (P_{1\max} R + Q_{1\max} X) / U_{1\max} = 6.8945 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{\min} = (P_{1\min} R + Q_{1\min} X) / U_{1\min} = 2.4561 \text{ kV}$$

再计算分接头电压。取最大负荷时

$$U_{2\max} = 6.0\text{kV}$$

最小负荷时

$$U_{2\min} = 6.6\text{kV} \quad , \text{ 得到:}$$

$$U_{1t\max} = (U_{1\max} - \Delta U_{\max}) U_{2N} / U_{2\max}$$

$$= (110 - 6.8945) \times 6.6 / 6 = 113.4161\text{kV}$$

$$U_{1t\min} = (U_{1\min} - \Delta U_{\min}) U_{2N} / U_{2\min}$$

$$= (115 - 2.4561) \times 6.6 / 6.6 = 112.5439\text{kV}$$

$$U_{1t} = (U_{1t\max} + U_{1t\min}) / 2 = 112.98\text{kV}$$

选最近的分接头为 $110 + 2.5\% \times 110 = 112.75\text{kV}$ 。



检验最大负荷和最小负荷时低压侧的实际电压

$$U_{2\max} = (110 - 6.8945) \times 6.6 / 112.75 = 6.0354 \text{ kV}$$

$$U_{2\min} = (115 - 2.4561) \times 6.6 / 112.75 = 6.5879 \text{ kV}$$

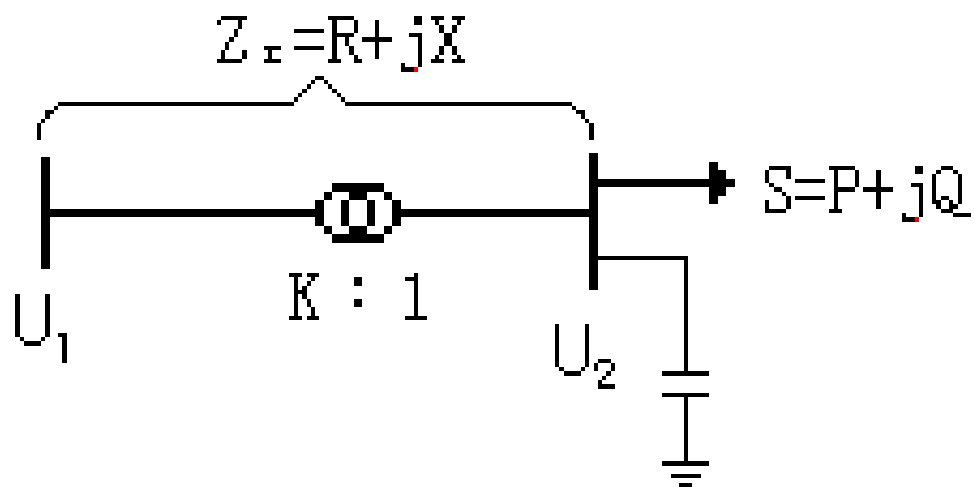
可见符合低压母线的要求（6 ~ 6.6kV）。



5.3.4 电压调整的方法

3. 改变电力网无功功率分布调压

考虑调压要求时，无功补偿容量的计算如下：



设补偿前后，线路始端电压 U_1 保持不变。



无功补偿容量计算

■ 补偿前:

$$U_1 = U'_2 + \frac{PR + QX}{U'_2}$$

■ 补偿无功 jQ_c 后:

$$U_1 = U'_{2c} + \frac{PR + (Q - Q_c)X}{U'_{2c}}$$

因为补偿前后线路始端电压 U_1 不变, 则:

$$U'_2 + \frac{PR + QX}{U'_2} = U'_{2c} + \frac{PR + (Q - Q_c)X}{U'_{2c}}$$



无功补偿容量计算

$$Q_C = \frac{U'_{2C}}{X} \left[(U'_{2C} - U'_2) + \left(\frac{PR + QX}{U'_{2C}} - \frac{PR + QX}{U'_2} \right) \right]$$

忽略式中第二项，得：

$$Q_C = \frac{U'_{2C}}{X} (U'_{2C} - U'_2) = \frac{kU_{2C}}{X} (kU_{2C} - U'_2)$$



并联电容器补偿容量选择

■ 对并联电容器，按最大负荷时补偿装置全部投入，最小负荷时全部退出来选择变压器变比和补偿容量。

$$Q_C = \frac{kU_{2C_{\max}}}{X} (kU_{2C_{\max}} - U'_{2\max})$$

$$0 = \frac{kU_{2\min}}{X} (kU_{2\min} - U'_{2\min})$$

$$kU_{2\min} = U'_{2\min}$$

$$k = \frac{U_{1t}}{U_{2N}} = \frac{U'_{2\min}}{U_{2\min}}$$

同步调相机补偿容量选择

■ 对同步调相机，按最大负荷时过激满额运行，最小负荷时欠激满额运行来选择变压器变比和补偿容量。

$$Q_C = \frac{kU_{2C\max}}{X} (kU_{2C\max} - U'_{2\max})$$

$$-\frac{1}{2}Q_C = \frac{kU_{2C\min}}{X} (kU_{2C\min} - U'_{2\min})$$

$$k = \frac{U_t}{U_{2N}} = \frac{U_{2C\min}U'_{2\min} + \frac{1}{2}U_{2C\max}U'_{2\max}}{(U_{2C\min}^2 + \frac{1}{2}U_{2C\max}^2)}$$



5.3.4 电压调整的方法

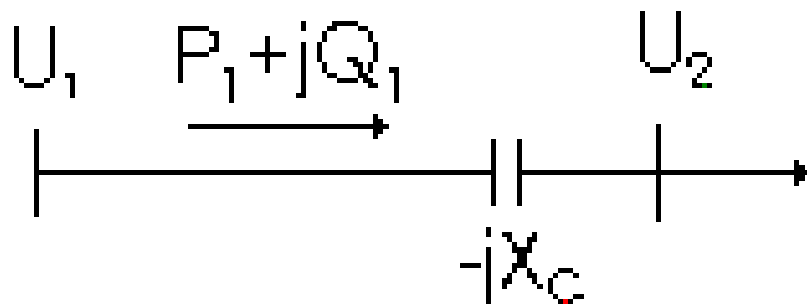
■ 4. 改变输电线路参数调压

低压电网中，常采用增大导线截面，改变线路电阻，减小电压损耗。

高压电网中，通常用串联电容改变线路电抗，以减小线路电压损耗。



改变输电线路参数调压



未串电容时电压损耗:

$$\Delta U = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$$

线路串入电容后电压损耗:

$$\Delta U' = \frac{P_1 R + Q_1 (X - X_c)}{U_1}$$



改变输电线路参数调压

$$\Delta U - \Delta U' = \frac{Q_1 X_c}{U_1}$$

$$X_c = \frac{U_1 (\Delta U - \Delta U')}{Q_1}$$

电容器的容量：

$$Q_c = 3I^2 X_c = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} X_c$$



5.3.5 电力系统综合调压

负荷点电压与调压方式、负荷之间的关系：

$$U = F(U_G, k, Q_C, P_L, Q_L)$$

$$Q = \psi(U_G, k, Q_C, P_L, Q_L)$$

U —各中枢点电压； Q —网络中主干线上的无功功率；

U_G —可调的发电机电压； k —变压器变比；

Q_C —无功补偿容量； P_L 、 Q_L —负荷点的有功、无功负荷；



5.3.5 电力系统的综合调压

按泰勒极数展开，并忽略高次项，写成矩阵型式：

$$\begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial U_G} & \frac{\partial U}{\partial k} & \frac{\partial U}{\partial Q_C} \\ \frac{\partial Q}{\partial U_G} & \frac{\partial Q}{\partial k} & \frac{\partial Q}{\partial Q_C} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_G \\ \Delta k \\ \Delta Q_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial P_L} & \frac{\partial U}{\partial Q_L} \\ \frac{\partial Q}{\partial P_L} & \frac{\partial Q}{\partial Q_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}$$

以 ΔP_L 、 ΔQ_L 作为扰动变量 $\Delta \mathbf{d}$ ，以 ΔU 、 ΔQ 作为状态变量 $\Delta \mathbf{x}$ ，以调压措施的调整量作为控制变量 $\Delta \mathbf{u}$ ，则：

$$\Delta \mathbf{x} = S_u \Delta \mathbf{u} + S_d \Delta \mathbf{d}$$

5.4 电力系统有功、无功经济分配

- 5.4.1 忽略线损时电力系统有功经济分配
- 5.4.2 考虑线损后的有功经济分配
- 5.4.3 电力系统无功功率经济分配



5.4.1 忽略线损时电力系统有功经济分配

- 全系统单位时间的燃料费用：

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

发电机组的燃料费用特性：

发电机组的燃料费用与有功输出的关系。

燃料费用微增率：

$$\frac{dF}{dP_G} = \tan \beta$$

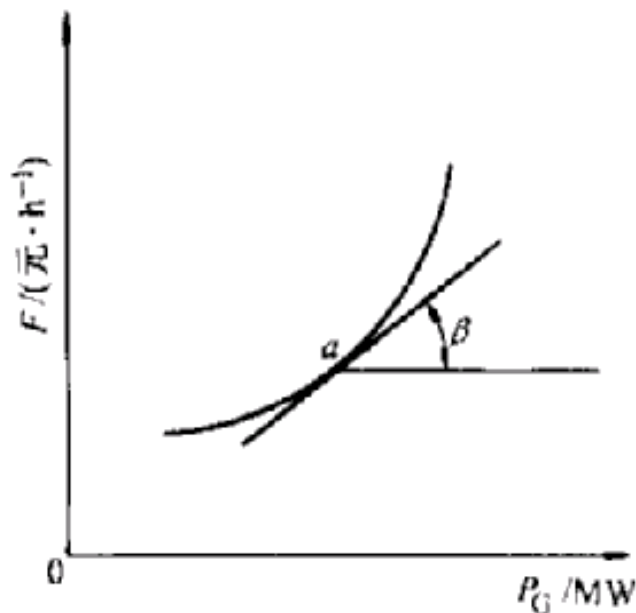


图 7-20 发电机组的燃料费用特性



5.4.1 忽略线损时电力系统有功经济分配

- 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。

即：目标函数是 $F=\min$ 。

并应满足以下条件：

1) 电力系统的有功功率平衡：

$$h(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gm}) = P_D - \sum_{i=1}^m P_{Gi} = 0$$

式中： P_D —有功负荷的总和。



5.4.1 忽略线损时电力系统有功经济分配

2) 各发电机出力均不越限。

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

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

3) 系统各点电压不越限。

$$U_{K \min} \leq U_K \leq U_{K \max}$$

$$K = 1, 2, \dots, n$$

只考虑等式约束，可得拉格朗日扩展函数：

$$L = \sum_{i=1}^m F_i(P_{Gi}) - \lambda h(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gm})$$



5.4.1 忽略线损时电力系统有功经济分配

- 拉格朗日函数获得最小的必要条件是：

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial F_i}{\partial P_{Gi}} - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

或写成：

$$\frac{dF_1}{dP_{G1}} = \frac{dF_2}{dP_{G2}} = \dots = \frac{dF_m}{dP_{Gm}} = \lambda$$

dF_i/dP_{Gi} —发电机 i 的燃料费用微增率。



等耗量微增率准则

- 等耗量微增率准则：为使系统的燃料总耗量最小，应按相等的燃料费用微增率在发电机组（或发电厂）间分配有功功率负荷。
- 对于不等式约束，当某一机组已满载而系统负荷继续增大时，除这台机组保持满载外，其它机组仍按“等微增率准则”进行有功功率的分配。



某电力系统由三个火电厂组成，其耗量特性分别为

$$F_1 = 0.0007PG_1^2 + 0.30PG_1 + 4 \text{ T/h},$$

$$80 \leq PG_1 \leq 150 \text{ MW};$$

$$F_2 = 0.0004PG_2^2 + 0.32PG_2 + 4.5 \text{ T/h},$$

$$100 \leq PG_2 \leq 300 \text{ MW};$$

$$F_3 = 0.00045PG_3^2 + 0.3PG_3 + 3.5 \text{ T/h},$$

$$100 \leq PG_3 \leq 300 \text{ MW};$$

不计网损。求

- 1) 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。



解:

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

得

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

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

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

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



$$P'_D = P_D - P_{G1} = 700 - 150 = 550 \text{ MW}$$

$$\lambda' = [1100 + (0.32/0.0004 + 0.3/0.00045)] / (1/0.0004 + 1/0.00045) \\ = 0.5435$$

从而

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

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



2) 燃料价格与耗量特性相乘就得到电能的费用特性, 将 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 分别乘以100、110和90, 得到费用特性为:

$$C1=100 \times F1=0.07 PG_1^2+30 PG_1+400 \text{ 元/h,}$$

$$80 \leq PG_1 \leq 150 \text{ MW;}$$

$$C2=110 \times F2=0.044 PG_2^2+35.2 PG_2+495 \text{ T/h,}$$

$$100 \leq PG_2 \leq 300 \text{ MW;}$$

$$C3=90 \times F3=0.0405 PG_3^2+27 PG_3+315 \text{ T/h,}$$

$$100 \leq PG_3 \leq 300 \text{ MW;}$$

用解析法可求得个电厂承担的负荷为

$$PG_1=150 \text{ MW, } PG_2=215.09 \text{ MW, } PG_3=334.91 \text{ MW.}$$

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64.32 MW, 电厂3多发了64.32 MW。这是因为电厂3的燃料比电厂2便宜。



忽略线损时有功功率在各水、火电厂之间的最优分配

■ 忽略线损时有功功率在各水、火电厂之间的最优分配

水、火电站并列运行的功率经济分配，就是要在在一定周期内（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。

目标函数为火电厂在 $0 \rightarrow T$ 时段内消耗燃料费用最小

Min

$$F_T = \sum_{i=1}^m \int_0^T F_{it} dt$$

$$i=1, 2, \dots, m$$

式中， F_i 为火电厂 i 在单位时间的燃料费用， m 为火电厂的个数。



等约束，一是在任一时间 t 功率应平衡

$$\sum_{i=1}^m P_{Git} + \sum_{j=1}^u P_{GHjt} - P_{Dt} = 0$$

$$0 \leq t \leq T$$

式中， P_{Git} 为火电厂 i 在时间 t 时输出有功功率， P_{GHjt} 为水电厂 j 在时间 t 时输出有功功率， u 为水电厂数。此外，还应满足式水电厂用水约束条件

$$\int_0^T w_{jt} dt - W_{jT} = 0 \quad j=1, 2, \dots, u$$



可将时间段T分为若干个小时时间段，即
若时段足够小，则问题可转化为：
在满足等约束条件

$$T = \sum_{k=1}^s \Delta t_k$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m P_{Git_k} + \sum_{j=1}^u P_{GHjt_k} - P_{Dt_k} = 0 & k = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{k=1}^s w_{jt_k} \Delta t_k - W_{jT} = 0 & j = 1, 2, \dots, u \end{cases}$$

下使目标函数

$$F_T = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s F_{it_k} \Delta t_k$$

最小。



将目标函数与等约束写成拉格朗日方程

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s F_{it_k} \Delta t_k - \sum_{k=1}^s \lambda_k \left[\sum_{i=1}^m P_{Git_k} + \sum_{j=1}^u P_{GHjt_k} - P_{Dt_k} \right] + \sum_{j=1}^u \lambda_{Hj} \left(\sum_{k=1}^s W_{jt_k} \Delta t_k - W_{jT} \right)$$

式中， λ_k 为时间 t_k 火电厂的拉格朗日乘子。由于各时刻负荷不同，故 λ_k 也不相同。 λ_{Hj} 为水电厂 j 的拉格朗日乘子，在 $0 \rightarrow T$ 时间内可用同一数值，但不同水电站则不相同。



求其极值得必要条件为

$$\partial L / \partial P_{Git_k} = 0$$

$$\partial L / \partial P_{GHjt_k} = 0$$

$$\partial L / \partial \lambda_k = 0$$

$$\partial L / \partial \lambda_{Hj} = 0$$



$$\frac{dF_i}{dP_{Git_k}} \Delta t_k - \lambda_k \Delta t_k = 0$$

$$\lambda_{Hj} \frac{dw_j}{dP_{GHjt_k}} \Delta t_k - \lambda_k \Delta t_k = 0$$

$$\sum_{i=1}^m P_{Git_k} + \sum_{j=1}^u P_{GHjt_k} - P_{Dt_k} = 0$$

$$\sum_{k=1}^s W_{jt_k} \Delta t_k - W_{jT} = 0$$



$$\frac{dF_i}{dP_{Git_k}} = \lambda_{Hj} \frac{dw_j}{dP_{GHjt_k}} = \lambda_k$$

式中， λ_k 为 t_k 时刻火电厂的拉格朗日乘子。 λ_{Hj} 称为水煤换算系数，其物理意义为 1m^3 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 λ_{Hj} 后就折算成了系统全为火电厂时的等微增率准则。



① 输入系统数据，包括火电厂及水电厂耗量特性、输电网络参数、计算时段、各水电厂在该时间段的给定耗水量以及系统在该时间段上有功负荷曲线。

② 指定各水电厂 λ_{Hj} ($j=1, 2, \dots, u$) 的初值，一般若运行方式变化不大，可参照前次计算所得数值作为本次计算初值。

③ 将各水电厂等效为火电厂，此 $t=1$ 到 $t=T$ 进行各小时段上的等效火电系统的优化运行计算。

④ 检验各水电厂耗水量约束条件，若 $|W_j^{(k)} - W_{jT}| \leq \varepsilon$

(ε 为给定的小正数)，则转第5步；否则 $\lambda_{Hj} = \lambda_{Hj} + \alpha \Delta W_j^{(k)}$ (α 为比例因子)，转第3步。

⑤ 输出优化计算结果（即各水电厂、火电厂负荷经济分配结果）。



5.4.2 考虑线损后的有功经济分配

目标函数:

$$\sum_{i=1}^m F_i(P_{Gi})$$

等式约束:

$$h(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gm}, P_D, \Delta P_L) = \sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_D - \Delta P_L = 0$$

拉格朗日方程:

$$L = \sum_{i=1}^m F_i(P_{Gi}) - \lambda h(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gm}, P_D, \Delta P_L)$$



考虑线损后的有功经济分配

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial F_i}{\partial P_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{Gi}} \right) = 0$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_{Gi}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{Gi}} \right)$$

$$\lambda = \frac{\partial F_i}{\partial P_{Gi}} \left[\frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{Gi}}} \right]$$

$$i = 1, 2, \cdot \quad \cdot \quad \cdot m$$



考虑线损后的有功经济分配

- 即：考虑了线损后的经济功率分配仍可按“等耗量微增率准则”进行，但需要将发电机的燃料费用微增率 $\partial F_i / \partial P_{Gi}$ 用 $1/(1 - \partial \Delta P_L / \partial P_{Gi})$ 修正，得到新的燃料费用微增率 λ 。



5.4.3 电力系统无功功率经济分配 (无功功率电源的最优分布)

1. 等网损微增率准则:

目标函数:

$$\Delta P_L = f(P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = f(P_i, Q_i)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^m Q_{Gj} - \sum_{i=1}^n Q_{Di} - \Delta Q_L = 0$$

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

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

ΔP_L —线路中的有功功率损耗; ΔQ_L —线路中的无功功率损耗;

$P_1 \dots P_n$ —节点 1 ~ n 的有功注入; $Q_1 \dots Q_n$ —节点 1 ~ n 的无功注入;

Q_{Gj} —节点 j 的无功电源;



电力系统无功功率经济分配

■ 拉格朗日方程

$$L = \Delta P_L + \lambda \left(\sum_{j=1}^m Q_{Gj} - \sum_{i=1}^n Q_{Di} - \Delta Q_L \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{Gj}} = \frac{\partial \Delta P_L}{\partial Q_{Gj}} + \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta Q_L}{\partial Q_{Gj}} \right) = 0$$

改写成:

$$\frac{\partial \Delta P_L}{\partial Q_{Gj}} \left(1 - \frac{\partial \Delta Q_L}{\partial Q_{Gj}} \right) = -\lambda$$

再加上:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{j=1}^m Q_{Gj} - \sum_{i=1}^n Q_{Di} - \Delta Q_L$$



电力系统无功功率经济分配

联立推导得到：

$$\left(\frac{\partial \Delta P_L}{\partial Q_{G1}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_L}{\partial Q_{G1}}} \right) = \left(\frac{\partial \Delta P_L}{\partial Q_{G2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_L}{\partial Q_{G2}}} \right) = \dots = \left(\frac{\partial \Delta P_L}{\partial Q_{Gm}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_L}{\partial Q_{Gm}}} \right)$$

$\partial \Delta P_L / \partial Q_{Gj}$ — 无功电源 j 无功变化时的有功损耗微增率；

$1 / (1 - \partial \Delta Q_L / \partial Q_{Gj})$ — 无功网损修正系数；



电力系统无功功率经济分配

等网损微增率准则：进行系统无功负荷经济分配时，为使网络的有功功率损耗最小，无功负荷在无功电源间应按等网损微增率准则分配。

2. 无功功率经济分配计算

1) 按有功负荷经济分配的结果，给定各发电厂（除平衡节点外）的有功注入，给定PV节点电压和各节点的 Q_{Di} ，进行潮流计算。



无功功率经济分配计算

2) 用潮流计算的结果确定各无功电源点的 λ 值, 此时各 λ_i 不等。

调整各电源的 λ 值。若某电源点 $\lambda < 0$, 表示应增大该电源的无功才可降低网损。否则应减少该电源的无功注入。调整后, 再做潮流计算。

3) 按计算出的潮流再计算网损, 检查平衡节点有功注入是否减少。重复步骤 2, 直到平衡点功率不再减小或满足等网损微增率准则 为止。

例1：如图所示，有两台容量均为100MW，耗量特性分别为

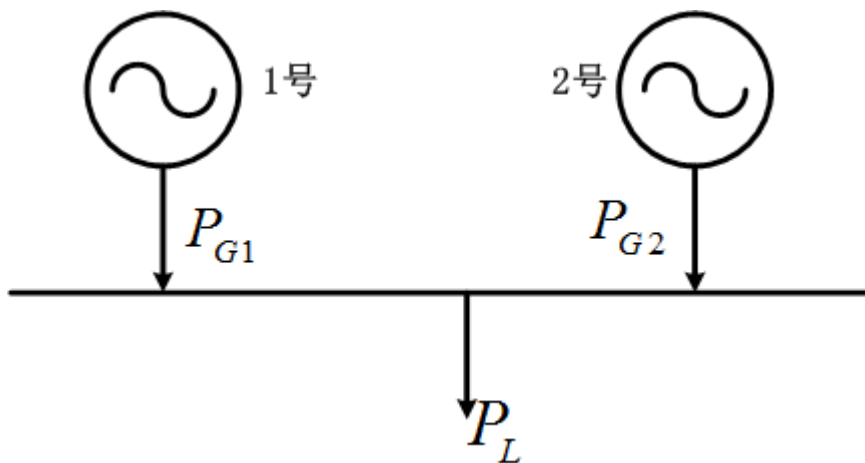
$$F_1 = 1 + 0.2P_{G1} + 0.002P_{G1}^2 (t/h)$$

$$F_2 = 3 + 0.1P_{G2} + 0.002P_{G2}^2 (t/h)$$

两台发电机同时供一个负荷 P_L ，试求：

（1）当系统负荷为65MW，按1号机发20MW，2号机发45MW分配负荷时，是不是最优分配方案？

（2）当系统负荷为160MW时，此两台发电机间的最优分配方案是什么？



解：

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004P_{G1} \\ \lambda_2 = 0.1 + 0.004P_{G2} \end{cases}$$

(1) 当 $P_{G1}=20\text{MW}$, $P_{G2}=45\text{MW}$ 时, 代入上式得

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004 \times 20 = 0.28 \\ \lambda_2 = 0.1 + 0.004 \times 45 = 0.28 \end{cases}$$

可见 $\lambda_1 = \lambda_2$, 所以是最优分配。

(2) 当 $P_L=160\text{MW}$ 时

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004P_{G1} = 0.1 + 0.004P_{G2} = \lambda_2 \\ P_{G1} + P_{G2} = 160 \end{cases}$$

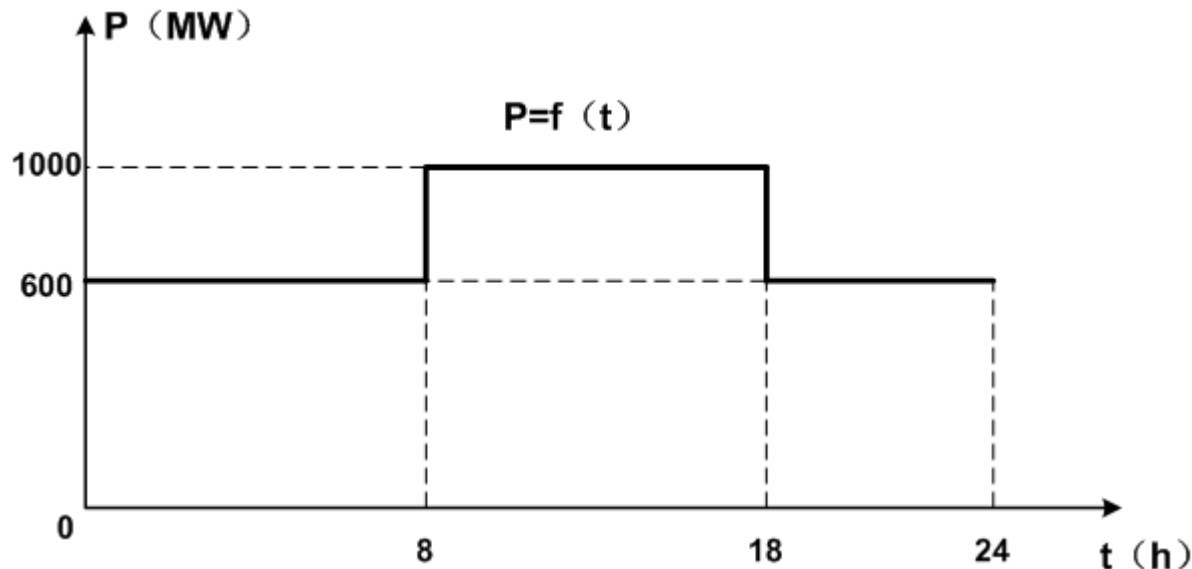
解得 $P_{G1} = 67.5\text{MW}$, $P_{G2} = 92.5\text{MW}$

例2：电力系统中只有一个水电厂、一个火电厂，火、水电厂的耗量特性分别为

$$F = 3 + 0.3P_G + 0.0015P_G^2 (t/h)$$

$$W = 5 + P_{GH} + 0.002P_{GH}^2 (m^3/s)$$

水电厂的日用水量恒定为 $K = 1.5 \times 10^7 m^3$ ，系统的日负荷曲线如图所示，火电厂容量900MW，水电厂容量400MW。求在给定的日用水量条件下，水、火电厂的有功功率经济分配方案。



解：由负荷曲线可知，0~8h及18~24h负荷为600MW，8~18h负荷为1000MW。各厂的微增率为

$$\lambda_T = \frac{dF}{dP_G} = 0.3 + 0.003P_G \quad \lambda_H = \frac{dF}{dP_{GH}} = 1 + 0.004P_{GH}$$

根据等微增率准则，有 $0.3 + 0.003P_G = \gamma_H (1 + 0.004P_{GH})$

由于 γ_H 未知，首先设定 $\gamma_H = 1$ 代入求解。

在0~8h，有

$$\begin{cases} 0.3 + 0.003P_G = 1 + 0.004P_{GH} \\ P_G + P_{GH} = 600 \end{cases}$$

解得 $P_{GH} = 157.1MW$ $P_G = 442.9MW$

在8~18h，有

$$\begin{cases} 0.3 + 0.003P_G = 1 + 0.004P_{GH} \\ P_G + P_{GH} = 1000 \end{cases}$$

解得 $P_{GH} = 328.57MW$ $P_G = 671.43MW$

将上述计算结果代回到水电厂耗量特性验算用水量。

在0~8h及18~24h，用水量

$$W' = 5 + P_{GH} + 0.002P_{GH}^2 = 5 + 157.1 + 0.002 \times 157.1^2 = 211.46(m^3 / s)$$

$$K' = W't = 211.46 \times 14 \times 3600 = 10657584(m^3)$$

在8~18h，用水量

$$W'' = 5 + 328.57 + 0.002 \times 328.57^2 = 549.5(m^3 / s)$$

$$K'' = W''t = 549.5 \times 10 \times 3600 = 19782000(m^3)$$

全天总用水量

$$K = K' + K'' = 30439584(m^3)$$

因 $K > 1.5 \times 10^7 m^3$ ，需增加 γ_H 的值重新计算，多次计算结果列于下表中。

γ_H	0~8h及18~24h		8~18h		$K(m^3)$
	$P_G(MW)$	$P_{GH}(MW)$	$P_G(MW)$	$P_{GH}(MW)$	
1.4	518.6	81.39	739.1	220.9	16667359
1.45	526.1364	73.8636	789.77	210.23	15454980
1.47	529.054	70.946	793.92	206.08	14990904
1.4696	528.9962	71.00378	793.8368	206.1632	15000892
	2				
1.469635	529.002	70.998	793.884	206.156	15000092

最后分配方案为 $\gamma_H = 1.47$

$$\left. \begin{array}{l} P_{GH} = 70.998MW \\ P_G = 529.002MW \end{array} \right\} 0\sim 8h\text{及}18\sim 24h$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{GH} = 206.116MW \\ P_G = 793.844MW \end{array} \right\} 8\sim 18h$$

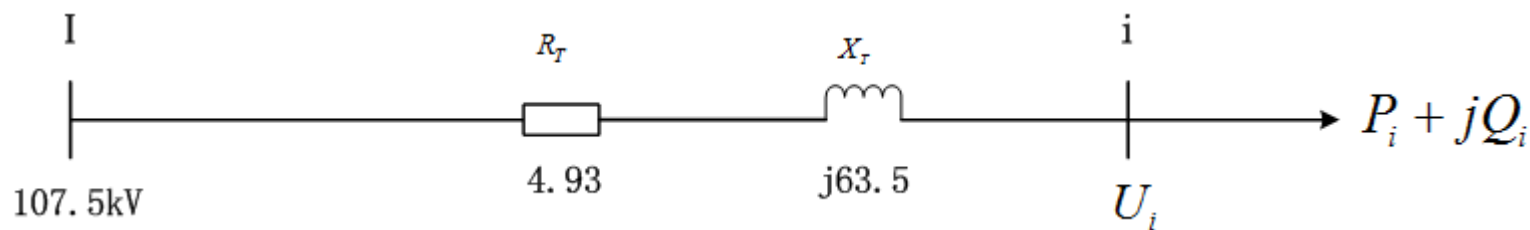
例3：如图所示，某降压变电所装设一台容量为20MVA、电压为110/11kV的变压器，要求变压器低压侧的偏移在大、小负荷时分别不超过额定值的2.5%和7.5%，最大负荷为18MVA，最小负荷为7MVA， $\cos \varphi = 0.8$ ，变压器高压侧的电压在任何运行情况下均维持107.5kV，变压器参数为 $U_k \% = 10.5$ ， $P_k = 163kW$ ，励磁影响不计。试选择变压器的分接头。



解：变压器参数为

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N} = \frac{163 \times 110^2}{1000 \times 20^2} = 4.93(\Omega)$$

$$X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 20} = 63.5(\Omega)$$



末端负荷为

$$\begin{cases} \dot{S}_{\max} = 18 \cos \varphi + j18 \sin \varphi = 18 \times 0.8 + j18 \times 0.6 = 14.4 + j10.8(MVA) \\ \dot{S}_{\min} = 7 \cos \varphi + j7 \sin \varphi = 7 \times 0.8 + j7 \times 0.6 = 5.6 + j4.2(MVA) \end{cases}$$

按调压要求，变压器低压侧电压应为

$$\begin{cases} U'_{i\max} = 10 \times (1 + 2.5\%) = 10.25(kV) \\ U'_{i\min} = 10 \times (1 + 7.5\%) = 10.75(kV) \end{cases}$$

在变压器上的电压损耗为 $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$

$$\begin{cases} U_{i\max} = U_{I\max} - \Delta U_{\max} = 107.5 - \frac{14.4 \times 4.93 + 10.8 \times 63.5}{U_{i\max}} \\ U_{i\min} = U_{I\min} - \Delta U_{\min} = 107.5 - \frac{5.6 \times 4.93 + 4.2 \times 63.5}{U_{i\min}} \end{cases}$$

解得 $U_{i\max} = 99.9kV$ $U_{i\min} = 104.6kV$

然而

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{TI \max} = U_{i \max} \frac{U_{iN}}{U'_{i \max}} = 99.9 \times \frac{11}{10.25} = 107.2(kV) \\ U_{TI \min} = U_{i \min} \frac{U_{iN}}{U'_{i \min}} = 104.6 \times \frac{11}{10.75} = 107(kV) \end{array} \right.$$

$$U_{TI} = \frac{U_{TI \max} + U_{TI \min}}{2} = 107.1(kV)$$

故分接头电压为 $110 \times (1-2.5\%) = 107.25kV$ 的分接头。

校验：

最大负荷时

$$U'_{i \max} = U_{i \max} \frac{U_{iN}}{U_{TI}} = 99.9 \times \frac{11}{107.25} = 10.25(kV)$$

最小负荷时

$$U'_{i \min} = U_{i \min} \frac{U_{iN}}{U_{TI}} = 104.6 \times \frac{11}{107.25} = 10.73(kV)$$

偏移:

最大负荷时

$$\Delta U_{\max} \% = \frac{10.25 - 10}{10} \times 100\% = 2.5\%$$

最小负荷时

$$\Delta U_{\min} \% = \frac{10.73 - 10}{10} \times 100\% = 7.3\% \leq 7.5\%$$

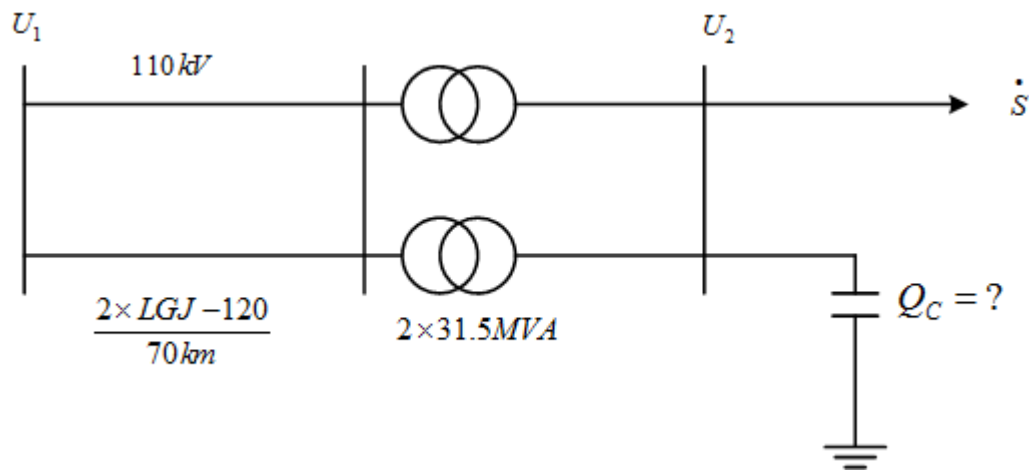
所以选择的分接头满足要求。

例4：如图所示，一个地区变电所，由双回110kV输电线供电，变电所装两台容量均为31.5MVA的分接头为 $110\pm4\times 2.5\%/11kV$ 的变压器，已知双母线电抗 $X_l = 14.6\Omega$ ，两台主变压器的电抗 $X_T = 20.2\Omega$ （已折算至110kV侧），变电所低压侧母线上的电压折算至高压侧时，在最大负荷时 $U_{2\max} = 100.5kV$ ，最小负荷时为 $U_{2\min} = 107.5kV$ 。试求：

（1）并联电容时，容量和变比的选择怎样配合？并联调相机时，容量和变比怎样配合？

（2）当变电所低压侧母线要求最大负荷时 $U'_{2\max} = 10.5kV$ ，最小负荷时 $U'_{2\min} = 10kV$ ，求为保证调压要求所需的最小同步调相机容量 Q_c 。

（3）为达到同样的调压目的，选静止电容器容量为多少？



解：（1）对于并联电容器，只能发出感性无功。按最大负荷时补偿装置全部投入，最小负荷时全部退出来选择变压器变比和补偿容量。

对于同步调相机，因其过激运行可发出满额无功，欠激时可吸收50%额定容量的无功。按最大负荷时过激满额运行，最小负荷时欠激满额运行来选择变压器电压变比和补偿容量。

（2）选择调相机容量：

首先按最大、最小负荷两种方式确定变比为

$$k = \frac{U'_{2\max} U_{2\max} + 2U'_{2\min} U_{2\min}}{U'^2_{2\max} + 2U'^2_{2\min}}$$
$$= \frac{10.5 \times 100.5 + 2 \times 10 \times 107.5}{10.5^2 + 2 \times 10^2} = 10.33$$

则 $U_{TJ} = kU_{N2} = 10.33 \times 11 = 113.64kV$ ，对应 $110(1+2.5\%) = 112.75kV$ 的分接头，所以 $k=112.75/11$ 。

按最大负荷时选 Q_C 为

$$\begin{aligned} Q_C &= \frac{U'_{2\max}}{X_{ij}} \left(U'_{2\max} - \frac{U_{2\max}}{k} \right) k^2 \\ &= \frac{10.5}{14.6 + 20.2} \left(10.5 - \frac{100.5}{\frac{112.75}{11}} \right) \left(\frac{112.75}{11} \right)^2 = 22.19(M \text{ var}) \end{aligned}$$

(3) 选电容器的容量：

变比按最小负荷时的电容器全部切除确定

$$U_{Tj\min} = U_{2\min} \frac{U_{Nj}}{U'_{j\min}} = 107.5 \times \frac{11}{10} = 118.25(kV)$$

$$k = \frac{U_{Tj\min}}{U_N} = \frac{118.25}{11} = 10.75$$

所以选110（1+7.5%）=118.25kV的分接头。
电容器容量按最大负荷时电容器投入确定

$$Q_C = \frac{U'_{jC\max}}{X_{ij}} \left(U'_{jC\max} - \frac{U_{j\max}}{k} \right) k^2 = \frac{10.5}{14.6 + 20.2} \left(10.5 - \frac{100.5}{10.75} \right) 10.75^2$$
$$= 40.14(M \text{ var})$$