



新疆大学

Xinjiang University

# 第六章

## 电力系统无功功率和电压调整

- ◆ 电力系统各元件的无功功率--电压特性
- ◆ 无功功率平衡
- ◆ 调压的原理及措施

电气工程学院

电气工程及其自动化专业

## 第一节 电压调整的必要性

- 电压偏移过大对**电力系统本身**以及**用电设备**会带来不良的影响。
  - (1) 效率下降，经济性变差。
  - (2) 电压过高，照明设备寿命下降，影响绝缘。
  - (3) 电压过低，电机发热。
  - (4) 系统电压崩溃
- 不可能使所有节点电压都保持为额定值。
  - (1) 设备及线路压降
  - (2) 负荷波动
  - (3) 运行方式改变
  - (4) 无功不足
- 电力系统一般规定一个电压偏移的最大允许范围，例如：35kV及以上供电电压正负偏移的绝对值之和不超过10%；10kV及以下在 $\pm 7\%$ 以内。

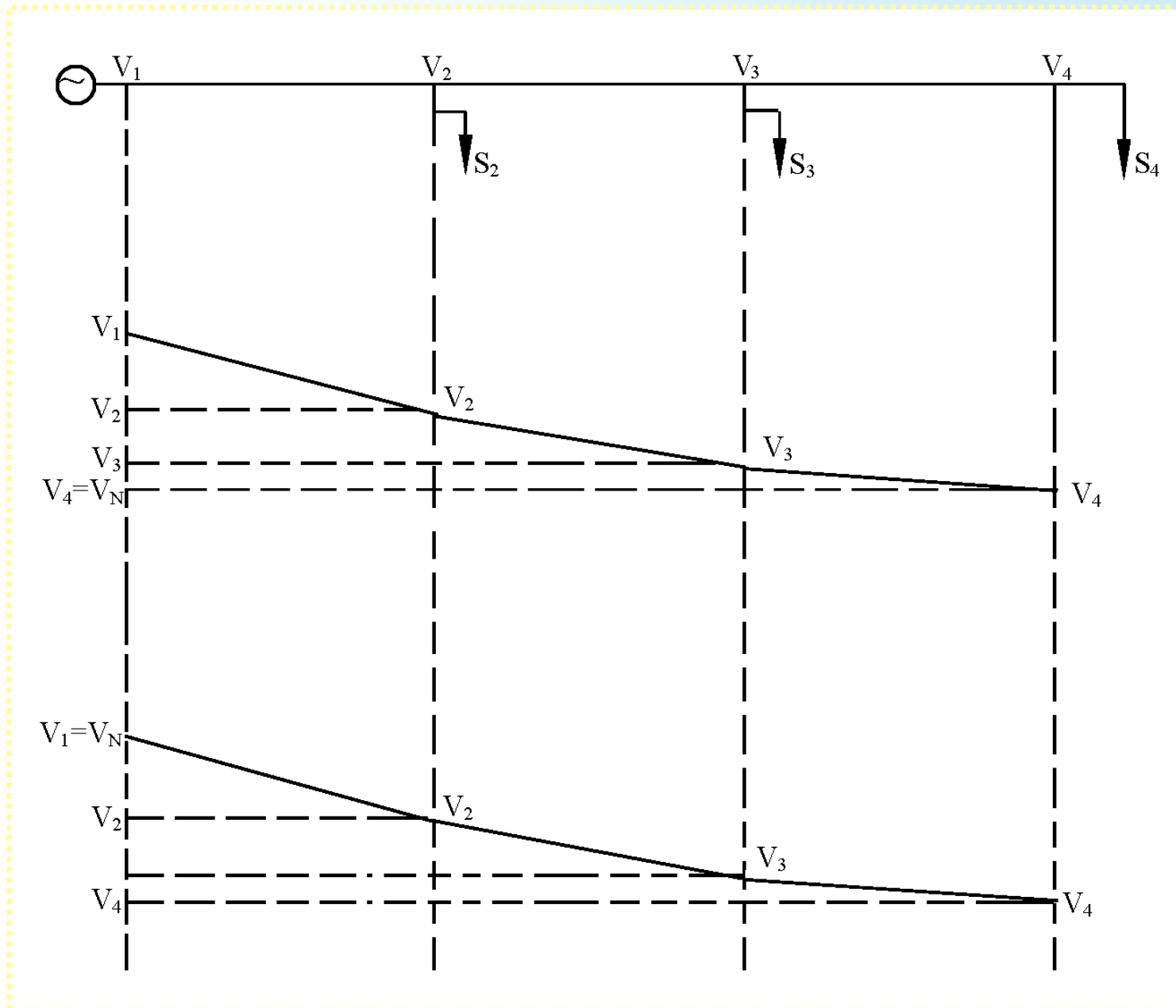


图5-1 沿线路各点电压的变化

## 第二节 电力系统的无功功率平衡

- 电压是衡量电能质量的重要指标。
- 电力系统的运行电压水平取决于无功功率的平衡。
- 系统中各种无功电源的无功出力应能满足系统负荷和网络损耗在额定电压下对无功功率的需求，否则电压就会偏离额定值。

# 一、无功功率负荷和无功功率损耗

## 1. 无功功率负荷

### • 异步电动机

$$Q_M = Q_m + Q_\sigma = \frac{V^2}{X_m} + I^2 X_\sigma$$

电压下降, 转差增大, 定子电流增大.

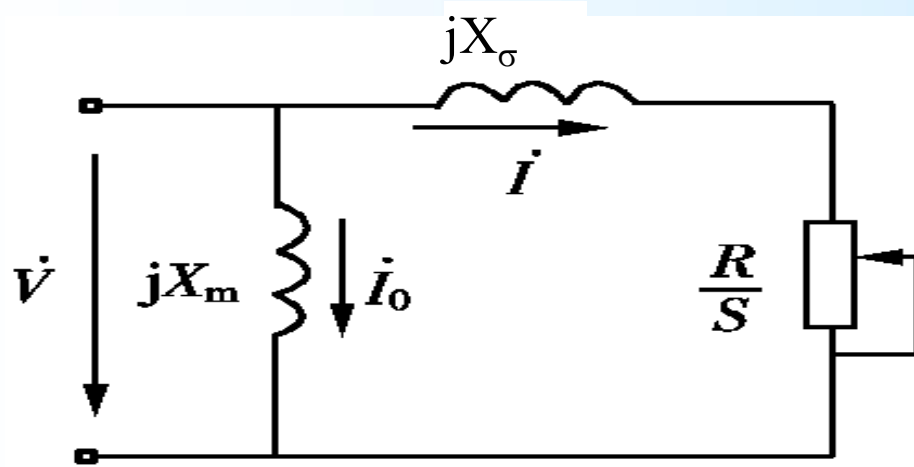
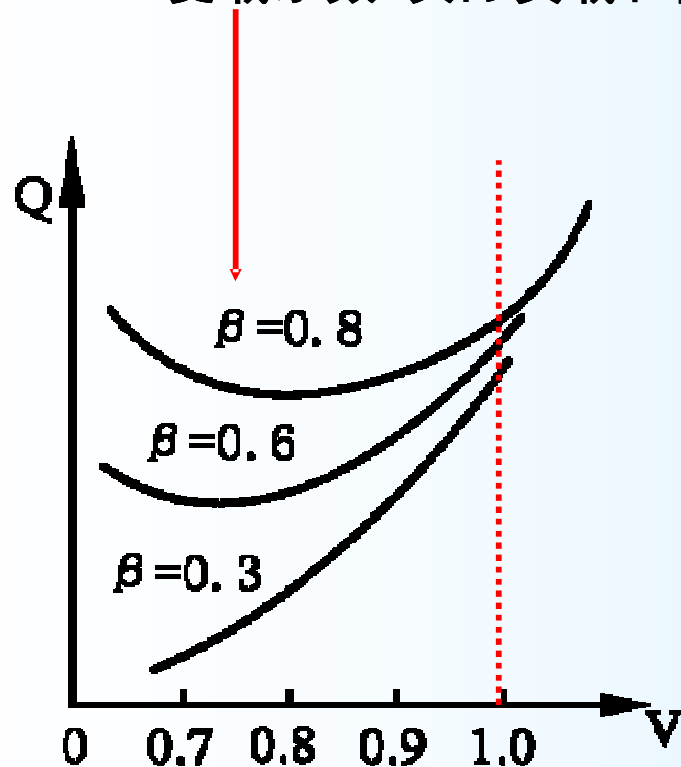


图5-2 异步电动机的简化等值电路

受载系数: 实际负载和额定负载之比.



在额定电压附近, 电动机的无功功率随电压的升降而增减

图5-3 异步电动机的无功功率与端电压的关系

## 2. 变压器的无功损耗

$$\begin{aligned} Q_{LT} &= \Delta Q_0 + \Delta Q_T = V^2 B_T + \left( \frac{S}{V} \right)^2 X_T \\ &\approx \frac{I_0 \%}{100} S_N + \frac{V_s \% S^2}{100 S_N} \left( \frac{V_N}{V} \right)^2 \end{aligned}$$

假定一台变压器的空载电流  $I_0\%=2.5$ ，短路电压  $V_s\%=10.5$ ，在额定满载下运行时，无功功率的消耗将达额定容量的13%。如果从电源到用户需要经过好几级变压，则变压器中无功功率损耗的数值是相当可观的。

### 3. 输电线路的无功损耗

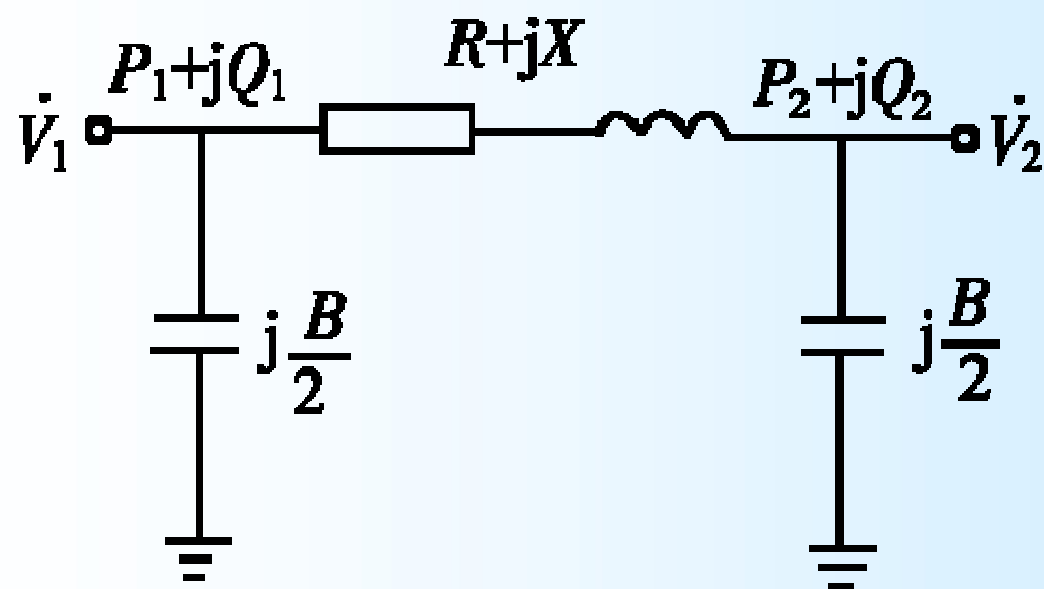


图5-4 输电线路的  $\pi$  型等值电路

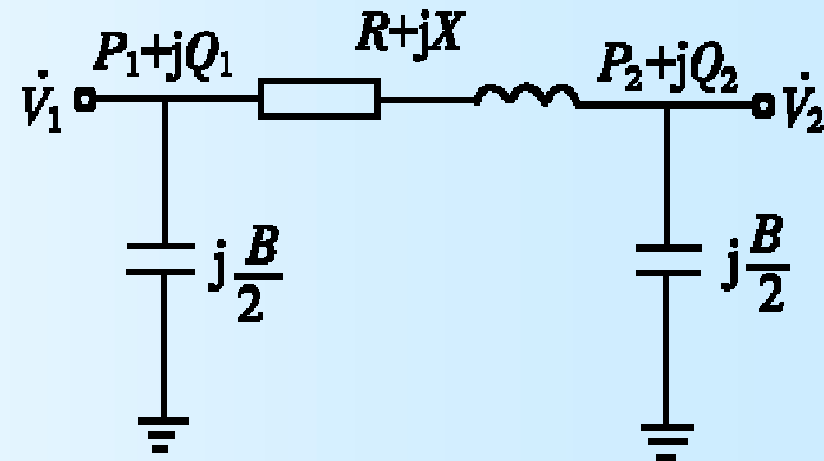


$$\Delta Q_L = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} X = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} X$$

$$\Delta Q_B = -\frac{B}{2}(V_1^2 + V_2^2)$$

线路的无功总损耗为

$$\Delta Q_L + \Delta Q_B = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} X - \frac{V_1^2 + V_2^2}{2} B$$



一般情况下，35kV及以下系统消耗无功功率；110kV及以上系统，轻载或空载时，成为无功电源，传输功率较大时，消耗无功功率。

## 二、无功功率电源

• 电力系统的无功功率电源有发电机、同步调相机、静电电容器及静止补偿器，后三种装置又称为无功补偿装置。

### 1. 发电机

发电机在额定状态下运行时，可发出无功功率：

$$Q_{GN} = S_{GN} \sin \varphi_N = P_{GN} \tan \varphi_N$$

发电机在**非额定功率因数**下运行时可能发出的无功功率。

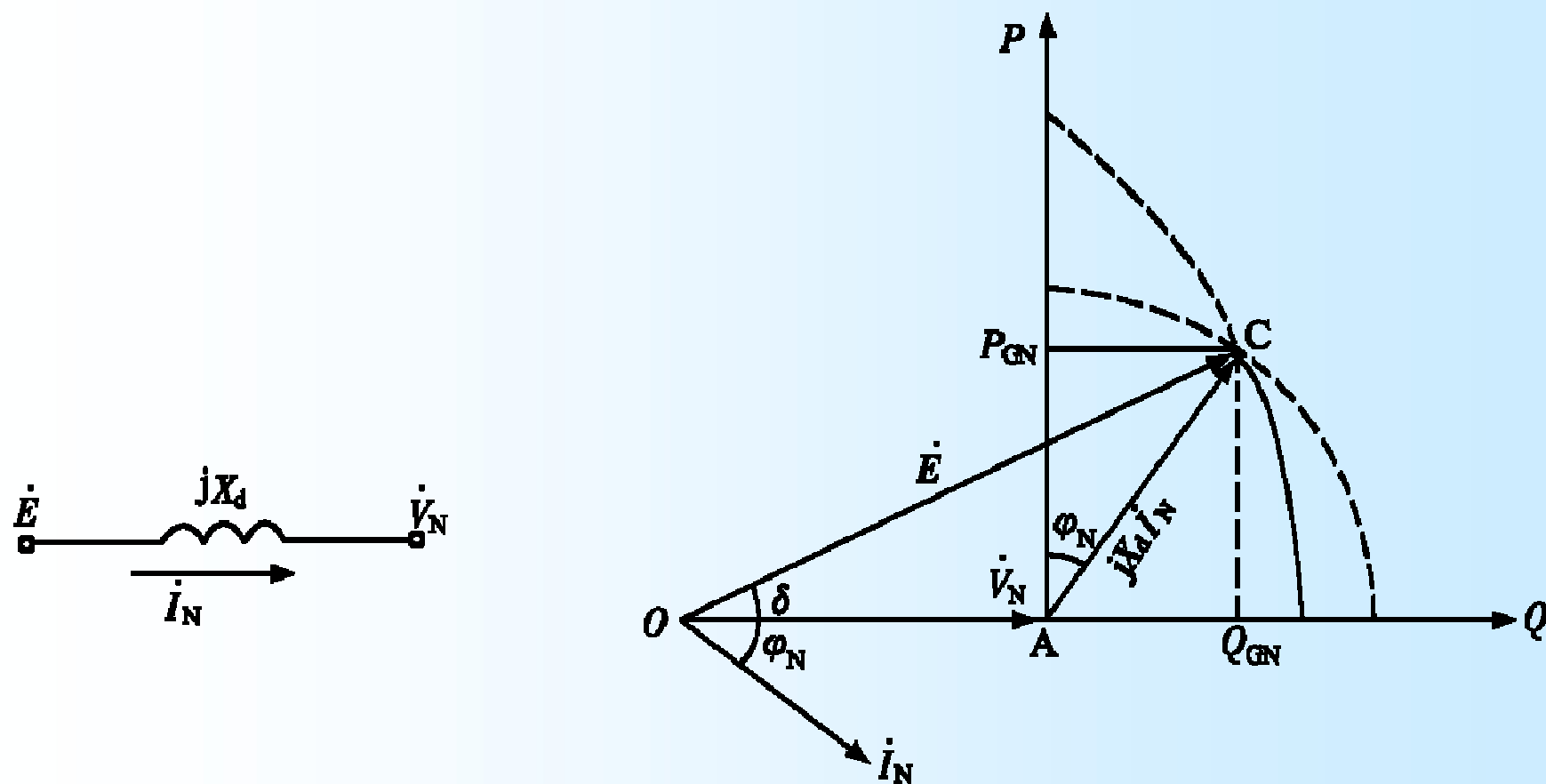


图5-5 发电机的P-Q极限

(1) 当发电机低于额定功率因数运行时，能增加输出的无功功率，但发电机的视在功率因取决于励磁电流不超过额定值的条件，将低于其额定值。

(2) 当发电机高于额定功率因数运行时，励磁电流不再是限制条件，原动机的机械功率又成了限制条件。

(3) 发电机只有在额定电压、额定电流和额定功率因数（即运行点 $C$ ）下运行时视在功率才能达到额定值，使其容量得到最充分的利用。

## 2. 同步调相机

- 同步调相机相当于空载运行的同步电动机。
- 在过励磁运行时，它向系统供给感性无功功率而起无功电源的作用，能提高系统电压；
- 在欠励磁运行时（欠励磁最大容量只有过励磁容量的（50% ~ 65%）），它从系统吸取感性无功功率而起无功负荷作用，可降低系统电压。
- 它能根据装设地点电压的数值平滑改变输出（或吸取）的无功功率，进行电压调节。因而调节性能较好。

## 缺点:

- 同步调相机是旋转机械，运行维护比较复杂；
  - 有功功率损耗较大，在满负荷时约为额定容量的(1.5~5)%，容量越小，百分值越大；
  - 小容量的调相机每kVA容量的投资费用也较大。
- 故同步调相机宜大容量集中使用，容量小于5MVA的一般不装设。

同步调相机常安装在枢纽变电所。

### 3. 静电电容器

- 静电电容器可按三角形和星形接法连接在变电所母线上。它供给的无功功率 $Q_C$ 值与所在节点电压的平方成正比，即

$$Q_C = V^2 / X_C$$

- **缺点：**电容器的无功功率调节性能比较差。
- **优点：**静电电容器的装设容量可大可小，既可集中使用，又可以分散安装。且电容器每单位容量的投资费用较小，运行时功率损耗亦较小，维护也较方便。

## 4. 静止补偿器

- 静止补偿器由静电电容器与电抗器并联组成
- 电容器可发出无功功率，电抗器可吸收无功功率，两者结合起来，再配以适当的调节装置，就能够平滑地改变输出（或吸收）的无功功率。



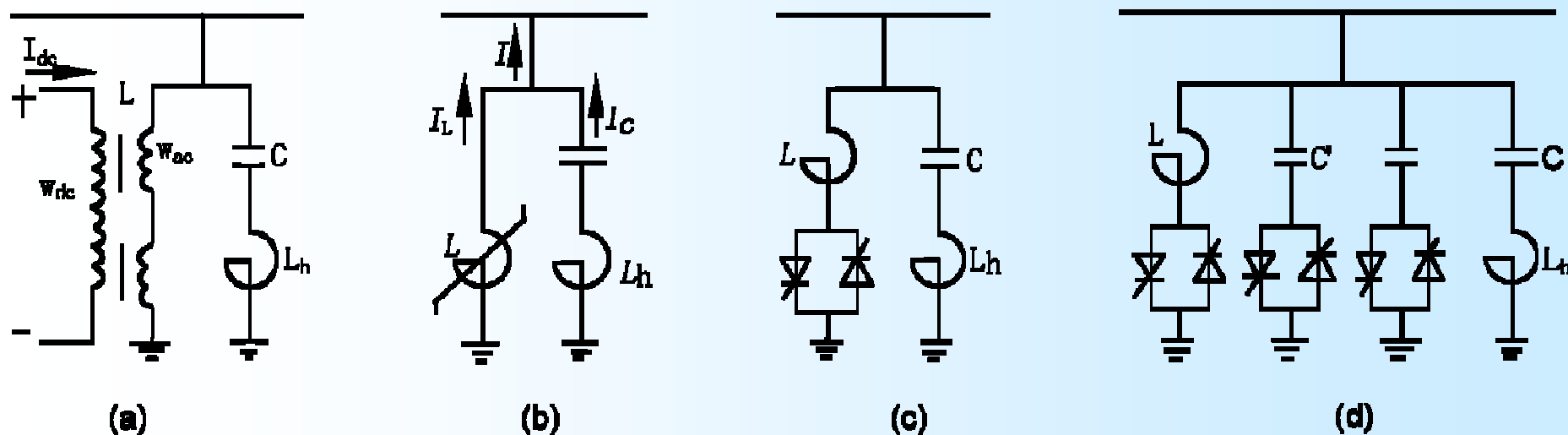


图5-6 静止无功补偿器的原理图

- (a) 可控饱和电抗器型； (b) 自饱和电抗器型；  
(c) 可控硅控制电抗器型；  
(d) 可控硅控制电抗器和可控硅投切电容器组合型

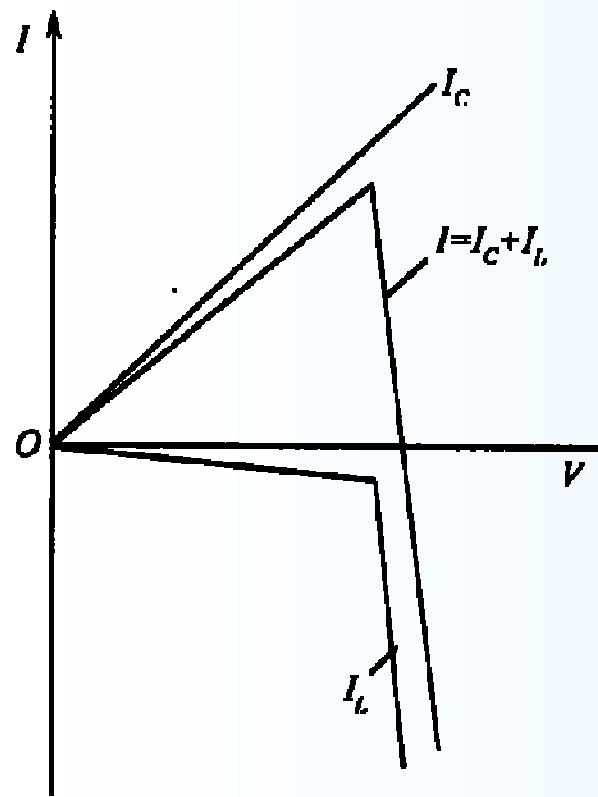


图 5-7 自饱和电抗器型补偿器的  
电流电压特性

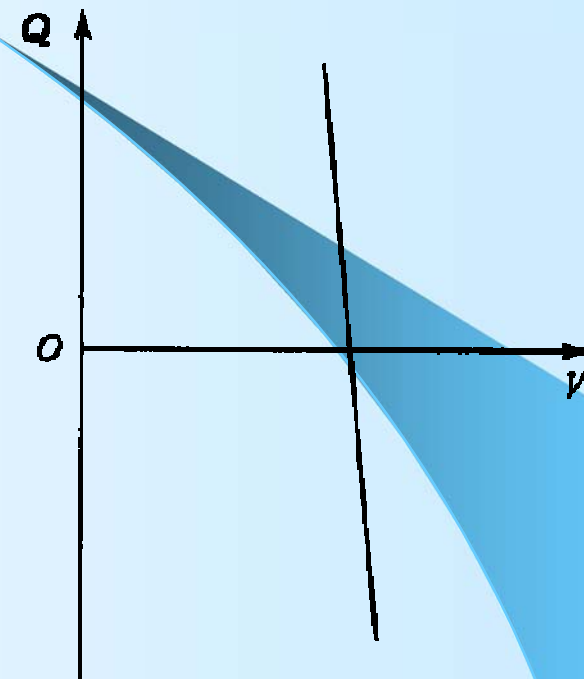


图 5-8 静止补偿器的无功功率  
电压静态特性

### 三、无功功率平衡

- **电力系统无功功率平衡的基本要求**：系统中的无功电源可以发出的无功功率应该大于或至少等于负荷所需的无功功率和网络中的无功损耗。

$$Q_{GC} - Q_{LD} - Q_L = Q_{res}$$

$$Q_L = Q_{LT\Sigma} + \Delta Q_{L\Sigma} + \Delta Q_{B\Sigma}$$

$$Q_{GC} = Q_{G\Sigma} + Q_{C\Sigma}$$

- $Q_{res} > 0$  表示系统中无功功率可以平衡且有适量的备用；
- $Q_{res} < 0$  表示系统中无功功率不足，应考虑加设无功补偿装置。

## 无功不足应采取的措施

- 电力系统的无功功率平衡应分别按正常运行时的最大和最小负荷进行计算。经过无功功率平衡计算发现无功功率不足时，可以采取的措施有：
  - (1) 要求各类用户将负荷的功率因数提高到现行规程规定的数值。
  - (2) 挖掘系统的无功潜力。例如将系统中暂时闲置的发电机改作调相机运行；动员用户的同步电动机过励磁运行等。
  - (3) 根据无功平衡的需要，增添必要的无功补偿容量，并按无功功率就地平衡的原则进行补偿容量的分配。小容量的、分散的无功补偿可采用静电电容器；大容量的、配置在系统中枢点的无功补偿则宜采用同步调相机或静止补偿器。

## 四、无功功率平衡和电压水平的关系

问题：在什么样的电压水平下实现无功功率平衡？

$$Q_{GC} = Q_{LD} + Q_L$$

**例：**隐极机经过一段线路向负荷供电

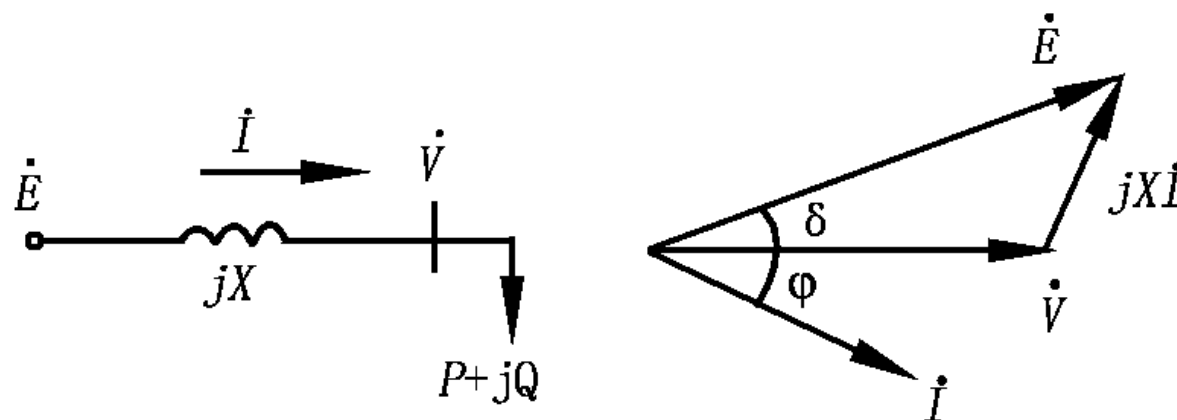
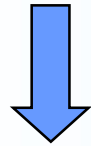
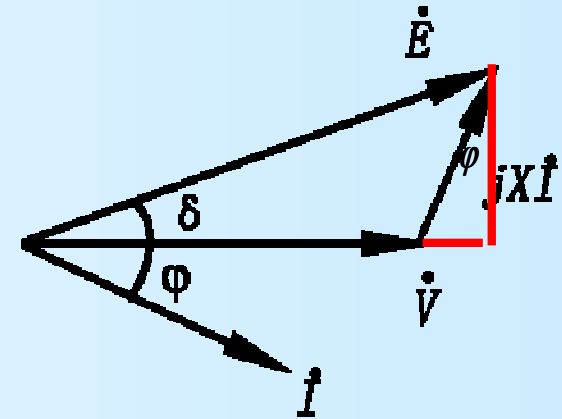
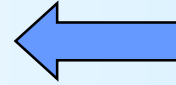


图5-9 等值电路和相量图

$$XI \cos \varphi = E \sin \delta$$

$$V + XI \sin \varphi = E \cos \delta$$



$$P = VI \cos \varphi = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

$$Q = VI \sin \varphi = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X}$$

当 $P$ 为一定值时，得

$$Q = \sqrt{\left(\frac{EV}{X}\right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X}$$

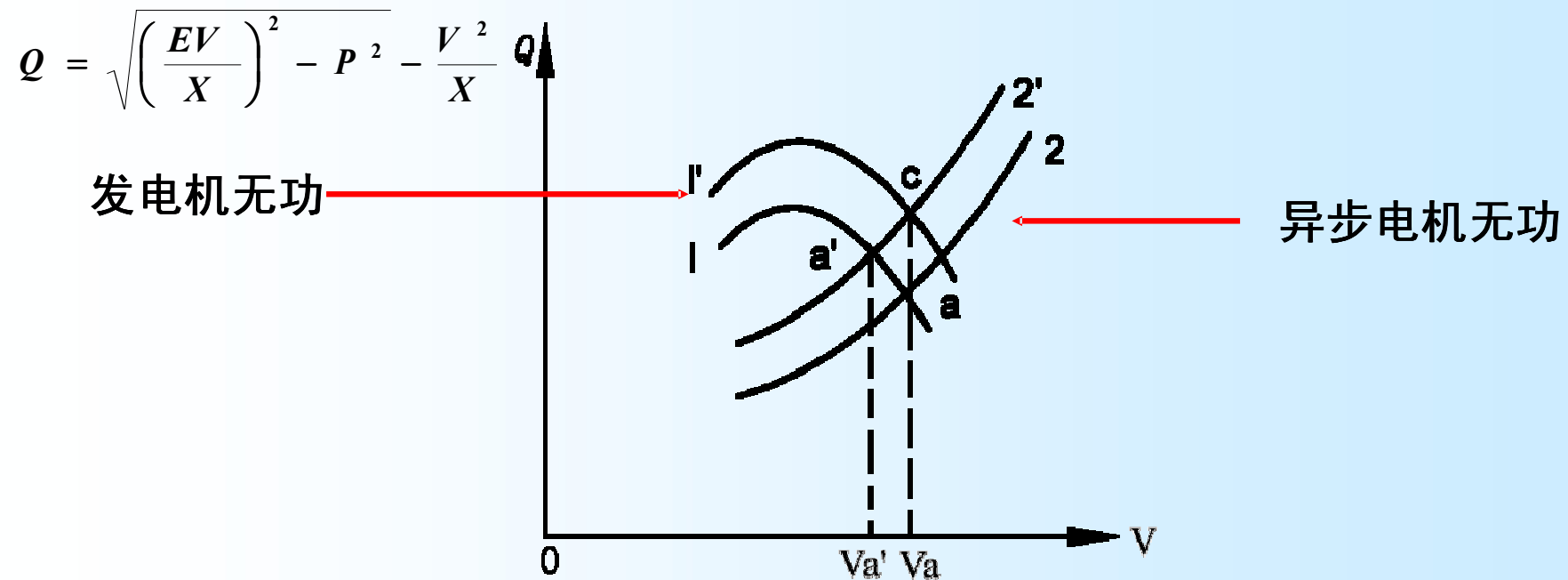


图5-10 无功平衡与电压水平

应该力求实现在额定电压下的系统无功功率平衡。

例5-1

## 第三节 电力系统的电压调整

### 一、电力系统电压偏移的原因及影响

#### 1. 造成电压偏移的原因

- (1) 设备及线路压降
- (2) 负荷波动
- (3) 运行方式改变
- (4) 无功不足或过剩



## 2. 电压偏移的影响

- (1) 电压偏移，效率下降，经济性变差。
- (2) 电压过高，照明设备寿命下降，影响绝缘。
- (3) 电压过低，电机发热。
- (4) 系统电压崩溃。

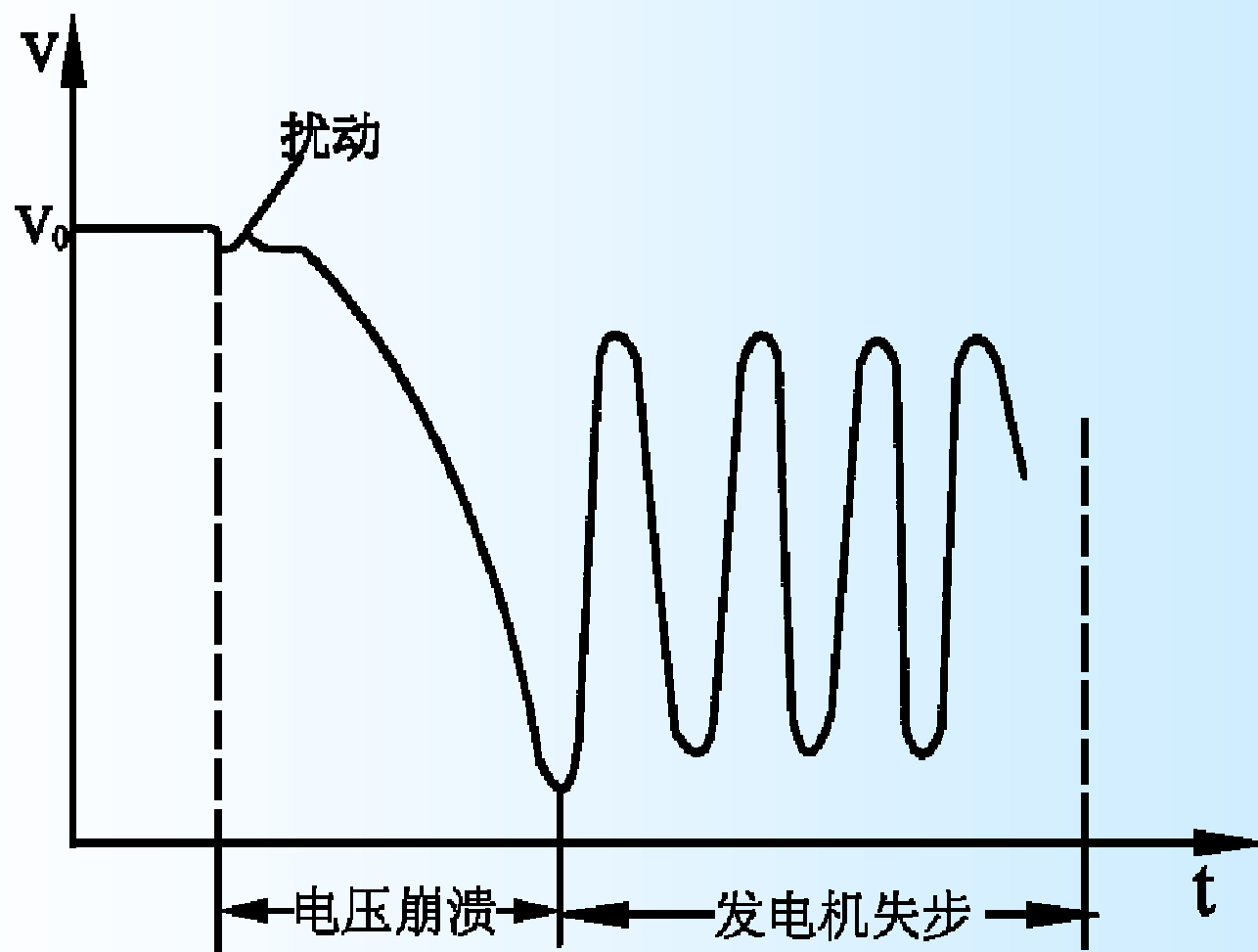


图5-11 “电压崩溃”现象

### 3 我国规定的允许电压偏移

- 35kV及以上电压供电负荷：  $\pm 5\%$
- 10kV及以下电压供电负荷：  $\pm 7\%$
- 低压照明负荷：  $+5\% \sim -10\%$
- 农村电网：  $+7.5\% \sim -10\%$

## 二、中枢点的电压管理

**电压中枢点：**指那些能够反映和控制整个系统电压水平的节点（母线）。

### 1. 电压中枢点的选择

一般可选择下列母线作为电压中枢点：

- (1) 大型发电厂的高压母线；
- (2) 枢纽变电所的二次母线；
- (3) 有大量地方性负荷的发电厂母线。

例：

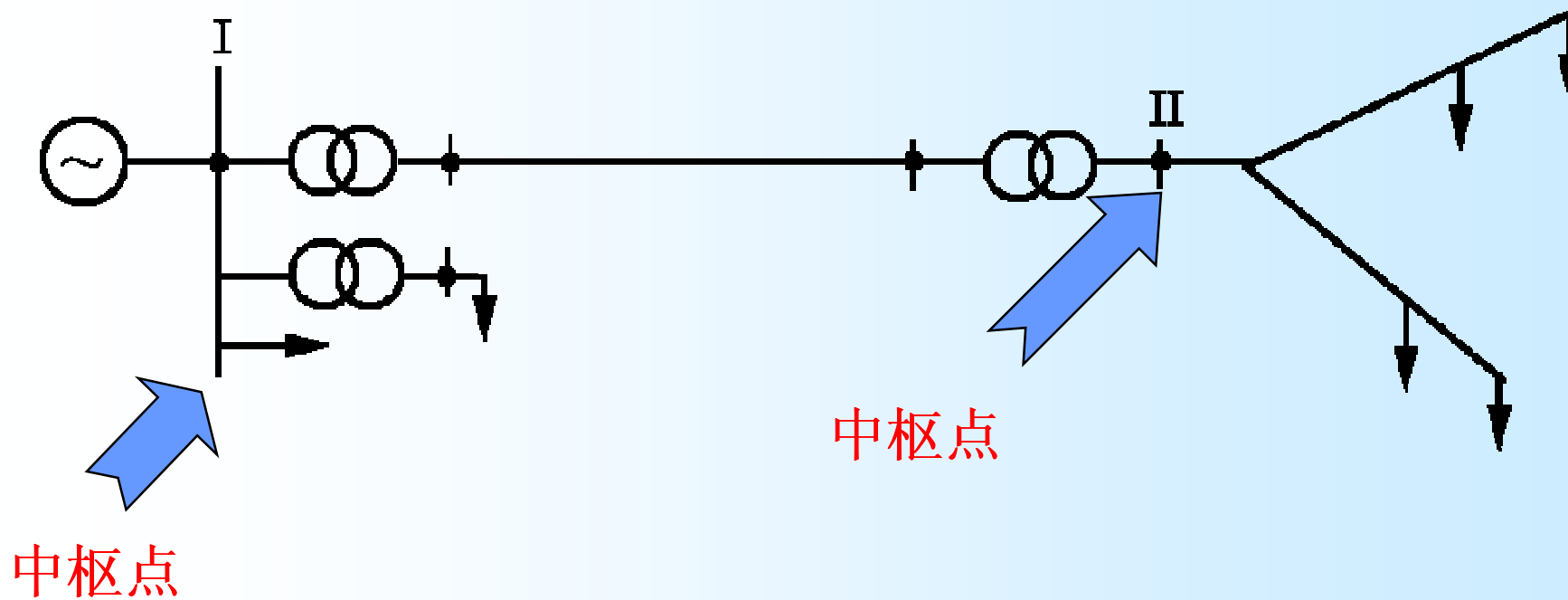
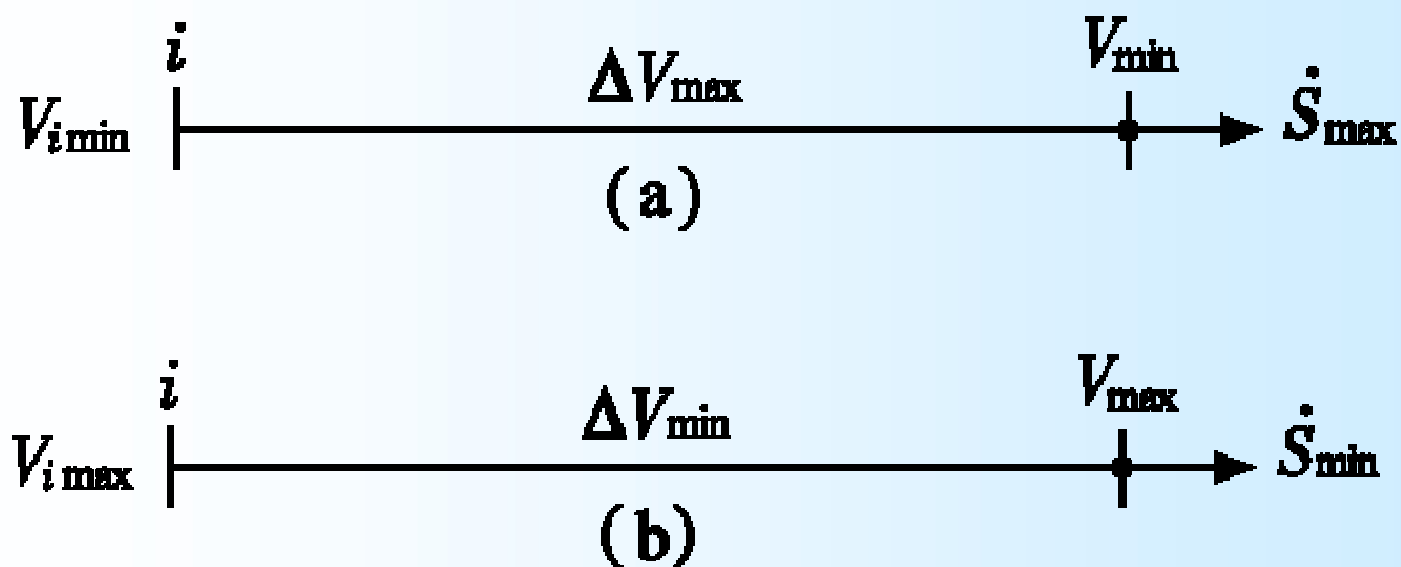


图5-12 电力系统的电压中枢纽点

## 2. 中枢点电压和负荷电压的关系



中枢点*i*的电压满足  $V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}$

图5-13 负荷电压与中枢点电压

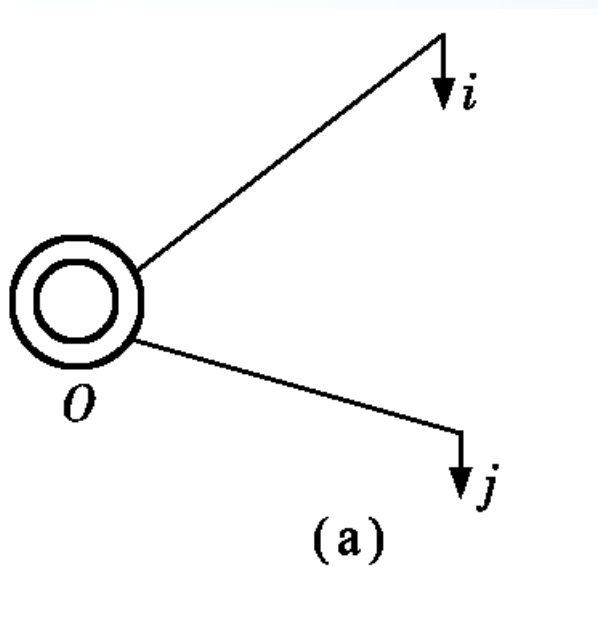
• 中枢点i的最低电压  $V_{i\min}$  等于在地区负荷最大时某用户允许的最低电压  $V_{\min}$  加上到中枢点的电压损耗  $\Delta V_{\max}$ 。

$$V_{i\min} = V_{\min} + \Delta V_{\max}$$

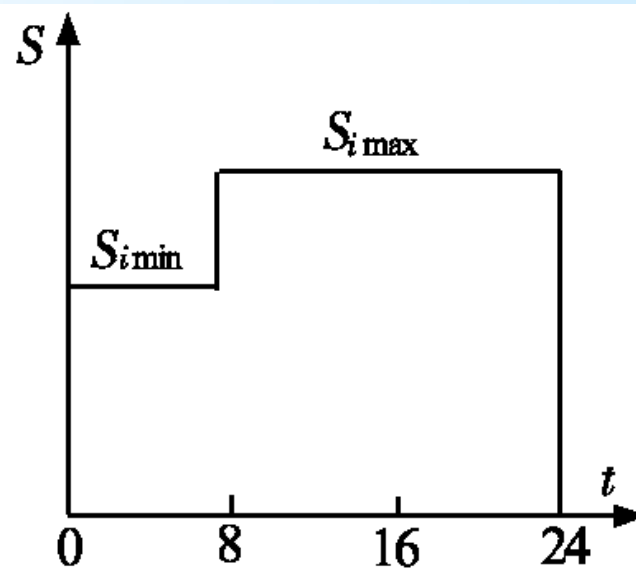
• 中枢点i的最高电压  $V_{i\max}$  等于地区负荷最小时某用户允许的最高电压  $V_{\max}$  加上到中枢点的电压损耗  $\Delta V_{\min}$ 。

$$V_{i\max} = V_{\max} + \Delta V_{\min}$$

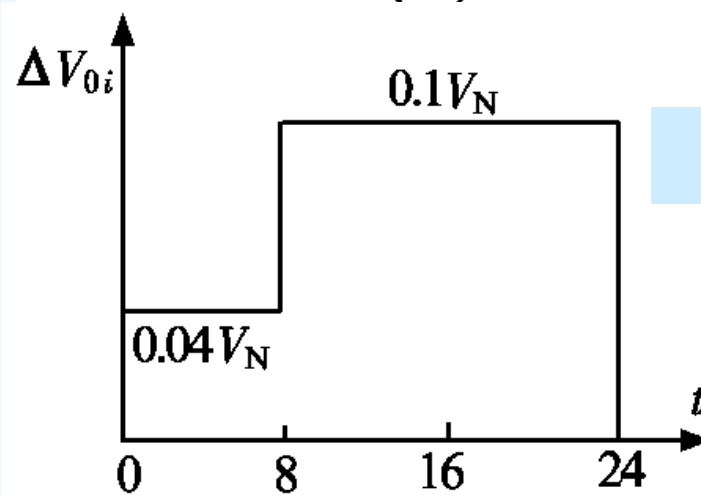
例



简单电力网电压损耗

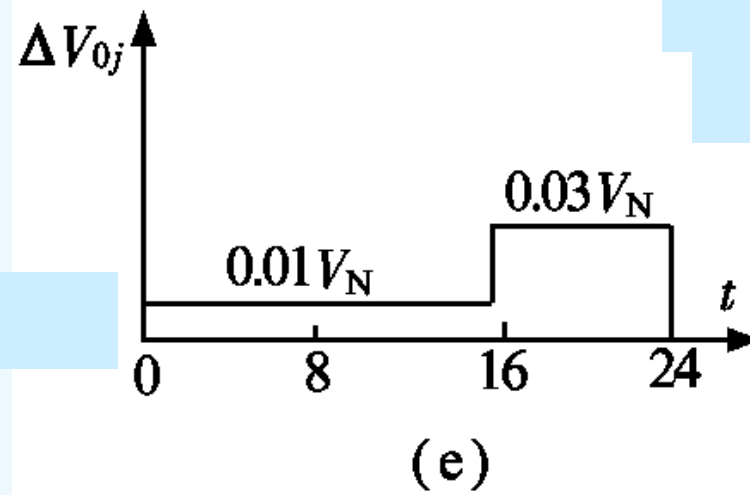
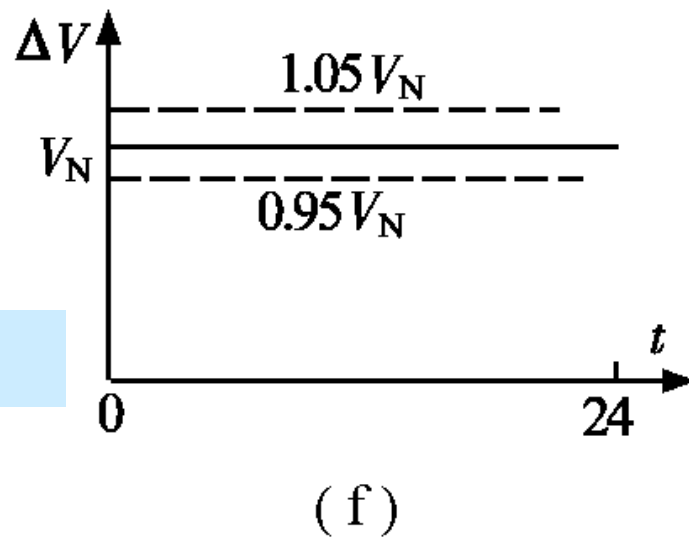
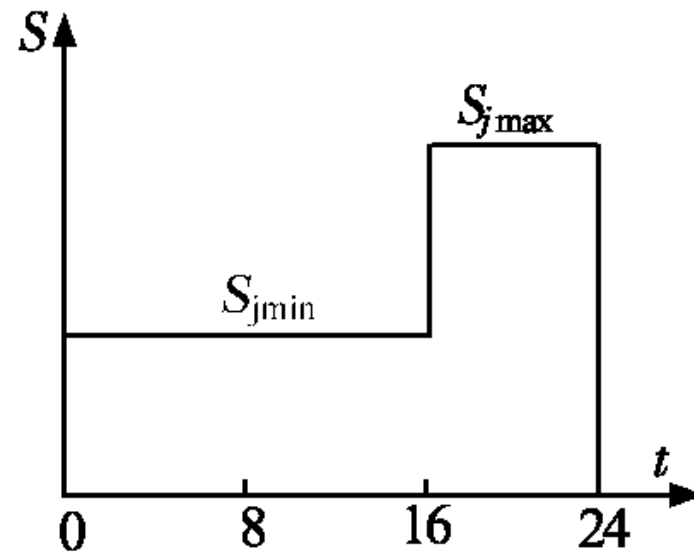
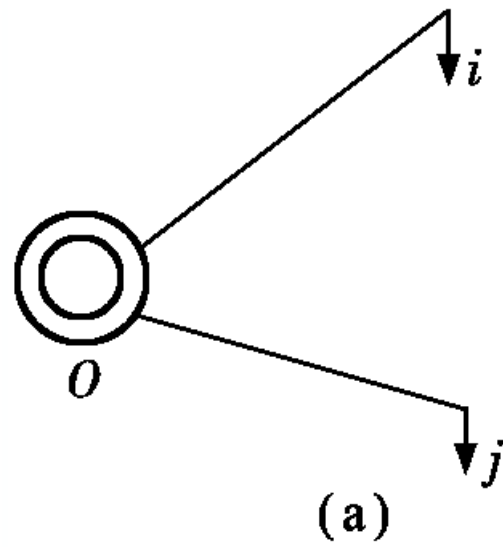


(b)



(d)

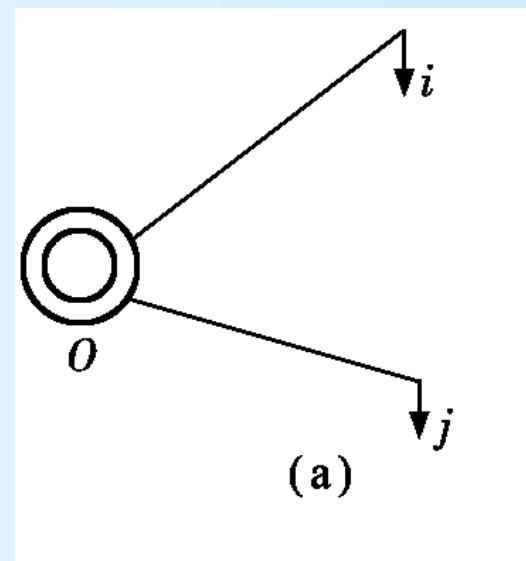




只满足*i*节点负荷时，中枢点电压  $V_0$  应维持的电压为

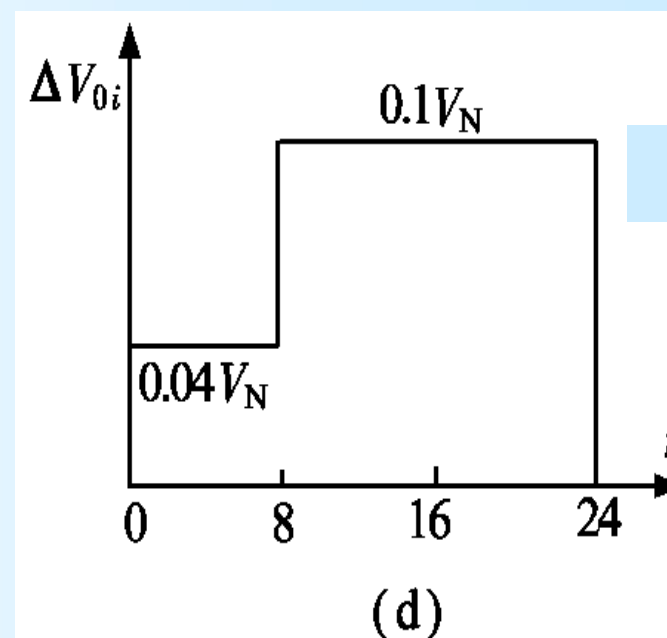
**$0 \sim 8h$**

$$\begin{aligned} V_0 &= V_i + \Delta V_{oi} \\ &= (0.95 \sim 1.05)V_N + 0.04V_N \\ &= (0.99 \sim 1.09)V_N \end{aligned}$$



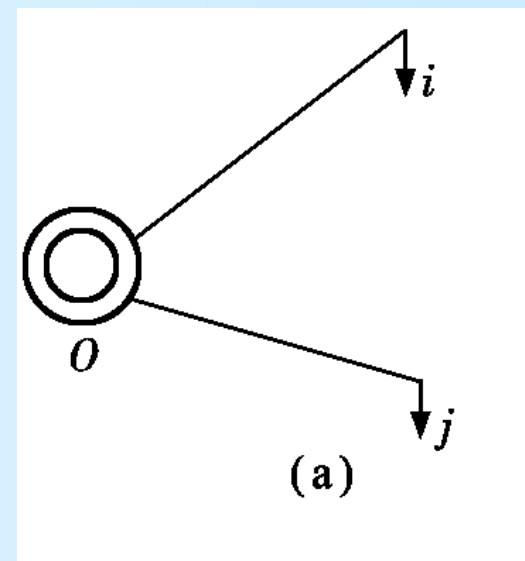
**$8 \sim 24h$**

$$\begin{aligned} V_0 &= V_i + \Delta V_{oi} \\ &= (0.95 \sim 1.05)V_N + 0.10V_N \\ &= (1.05 \sim 1.15)V_N \end{aligned}$$



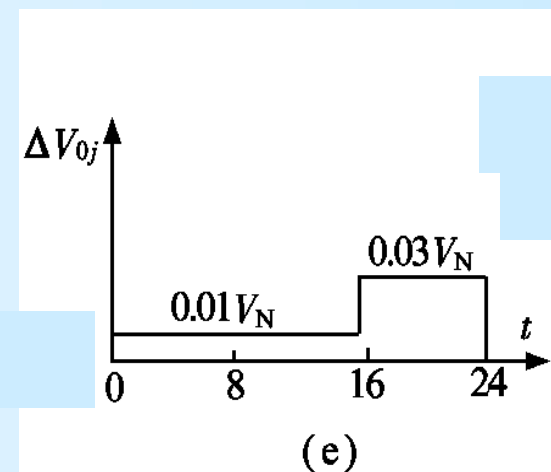
只满足j节点负荷时，中枢点电压 $V_0$ 应维持的电压为

$$\begin{aligned} 0 \sim 16h \quad V_0 &= V_j + \Delta V_{0j} \\ &= (0.95 \sim 1.05)V_N + 0.01V_N \\ &= (0.96 \sim 1.06)V_N \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 16 \sim 24h \quad V_0 &= V_i + \Delta V_{0i} \\ &= (0.95 \sim 1.05)V_N + 0.03V_N \\ &= (0.98 \sim 1.08)V_N \end{aligned}$$

同时考虑*i*、*j*两个负荷对*o*点的要求，可得出*o*点电压的变化范围。



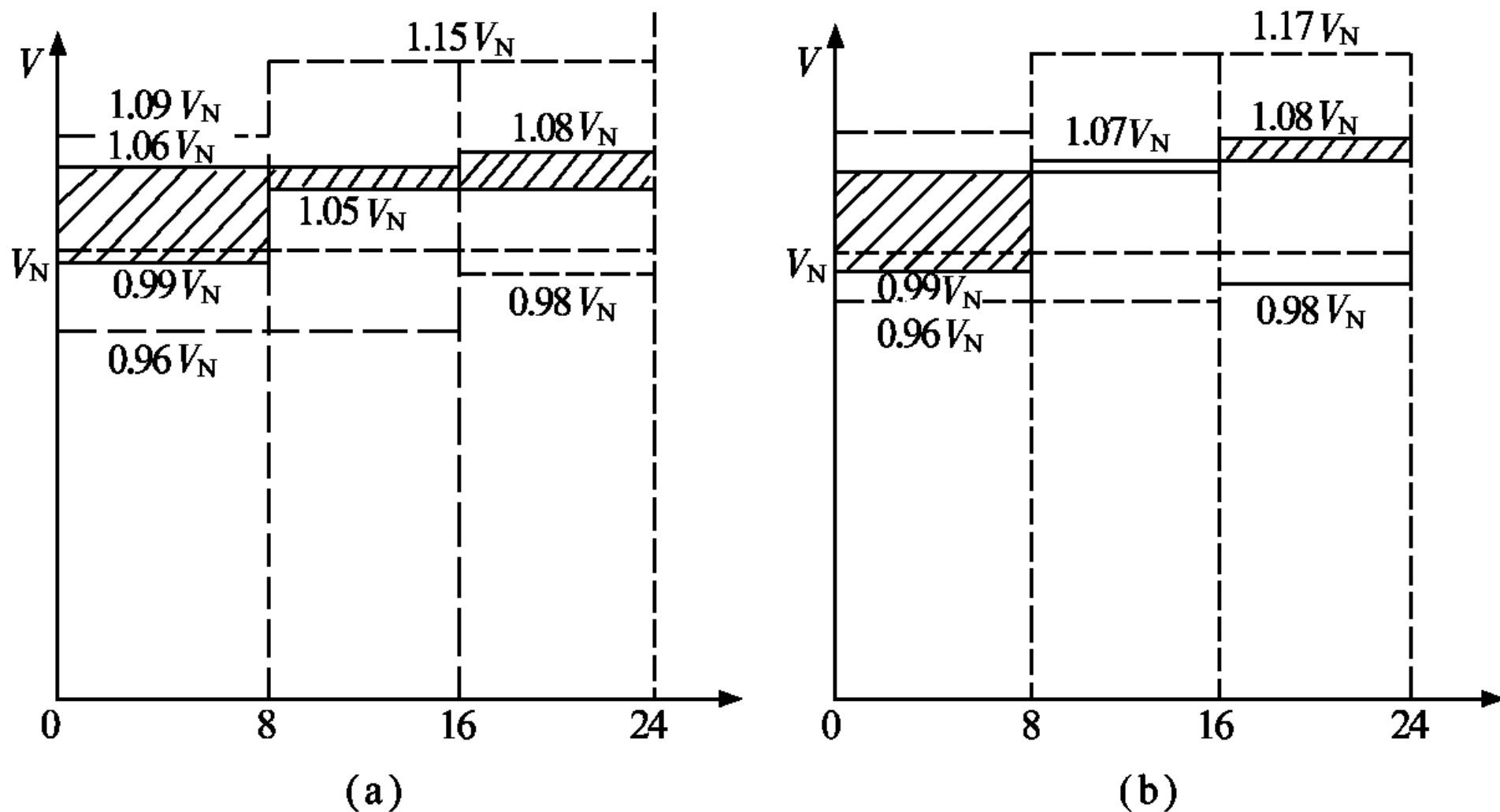


图5-14 中枢点 $O$  电压容许变化范围

- (a) 中枢点 $O$ 到 $i$ 及 $j$ 变电所的电压损耗不大时的电压变化范围；  
 (b) 中枢点 $O$ 到 $i$ 及 $j$ 变电所的电压损耗相差较大时的电压变化范围

### 3. 中枢点电压调整的方式

- 中枢点电压调整方式一般分为三类：  
逆调压、顺调压和常调压。

#### (1) 逆调压

- 最大负荷时升高电压，但不超过线路额定电压的105%，即 $1.05V_N$ ；
- 最小负荷时降低电压，但不低于线路的额定电压，即 $1.0V_N$ 。

## (2) 顺调压

- **最大负荷**时降低电压，但不低于线路额定电压的2.5%，即 $1.025 V_N$ ；
- **最小负荷**时升高电压，但不超过线路额定电压的7.5%，即 $1.075 V_N$ 。

## (3) 常调压

- 电压保持在较线路额定电压高2%~5%的数值，即 $(1.02 \sim 1.05) V_N$ ，不随负荷变化来调整中枢点的电压。

### 三、电力系统的电压调整

#### 1. 电压调整的基本原理

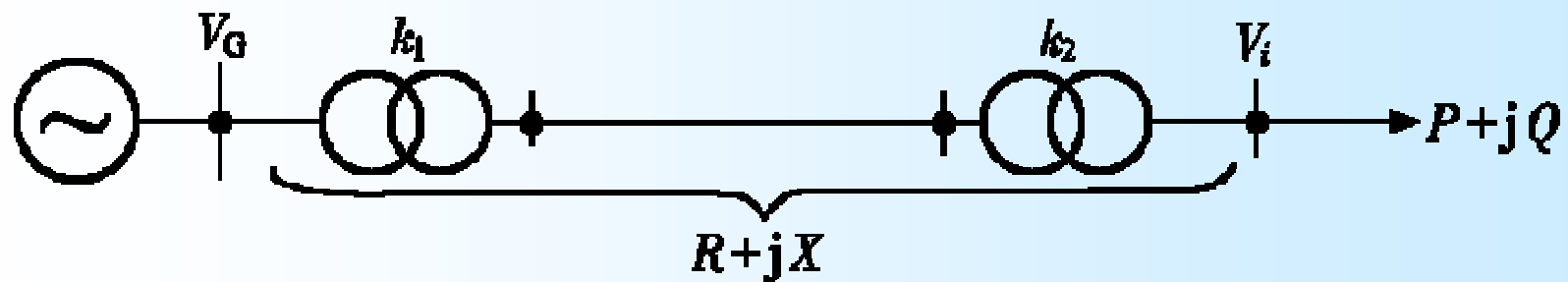


图5-15 电压调整原理图

$$V_i = (V_G k_1 - \Delta V) / k_2 = \left( V_G k_1 - \frac{PR + QX}{V_N} \right) / k_2$$

**电压调整的措施：**

$$V_i = \left( V_G k_1 - \frac{PR + QX}{V_N} \right) / k_2$$

- (1) 调节发电机励磁电流以改变发电机机端电压 $V_G$ ；
- (2) 改变变压器的变比 $k_1$ 、 $k_2$ ；
- (3) 改变功率分布 $P+jQ$ （主要是 $Q$ ），使电压损耗 $\Delta V$ 变化；
- (4) 改变网络参数 $R+jX$ （主要是 $X$ ），改变电压损耗 $\Delta V$ 。



## 第四节 利用发电机和变压器调压

### 一. 改变发电机端电压调压

- 根据运行情况调节励磁电流来改变机端电压。适合于由孤立发电厂不经升压直接供电的小型电力网。在大型电力系统中发电机调压一般只作为一种辅助性的调压措施。

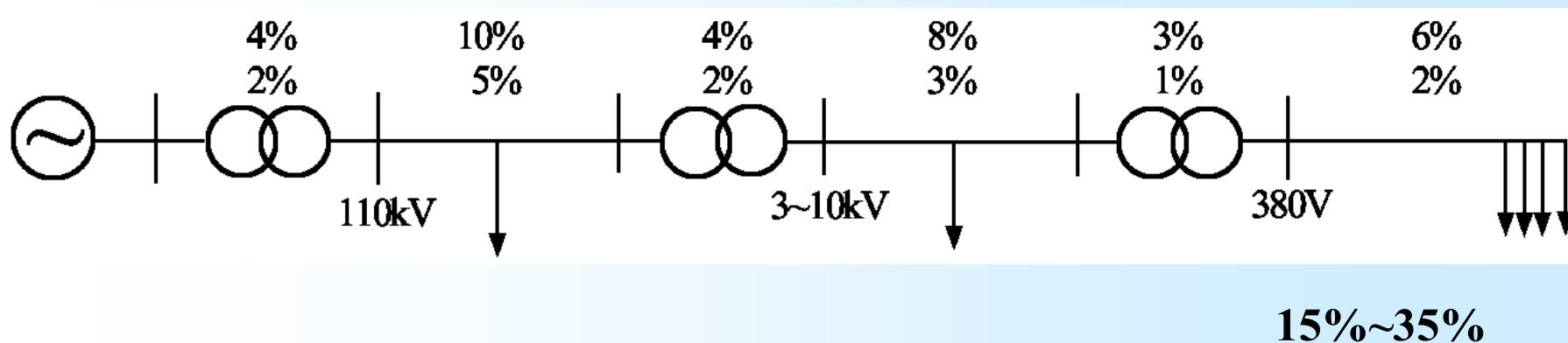


图5-16 多级变压供电系统的电压损耗分布

## 二、变压器分接头的选择

- 改变变压器的变比调压实际上就是根据调压要求适当选择分接头。

### 1. 降压变压器分接头的选择

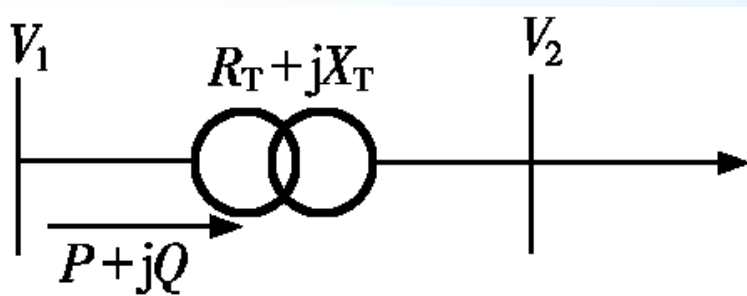


图5-17 降压变压器

$$\Delta V_T = (PR_T + QX_T)/V_1$$

$$V_2 = (V_1 - \Delta V_T)/k$$

$$k = V_{1t}/V_{2N}$$

$$V_{1t} = \frac{V_1 - \Delta V_T}{V_2} V_{2N}$$

$$k = V_{1t} / V_{2N}$$

$$V_2 = (V_1 - \Delta V_T) / k$$

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

最大运方

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

最小运方

$$V_{1t \cdot av} = (V_{1t \max} + V_{1t \min}) / 2$$

平均

根据 $V_{1t \cdot av}$ 值可选择一个与它最接近的分接头。然后根据所选取的分接头校验最大负荷和最小负荷时低压母线上的实际电压是否满足要求。

例5-2

## 2. 升压变压器分接头的选择

选择升压变压器分接头的方法与选择降压变压器的基本相同。

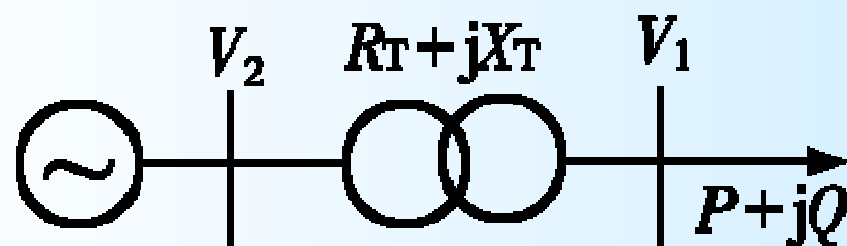


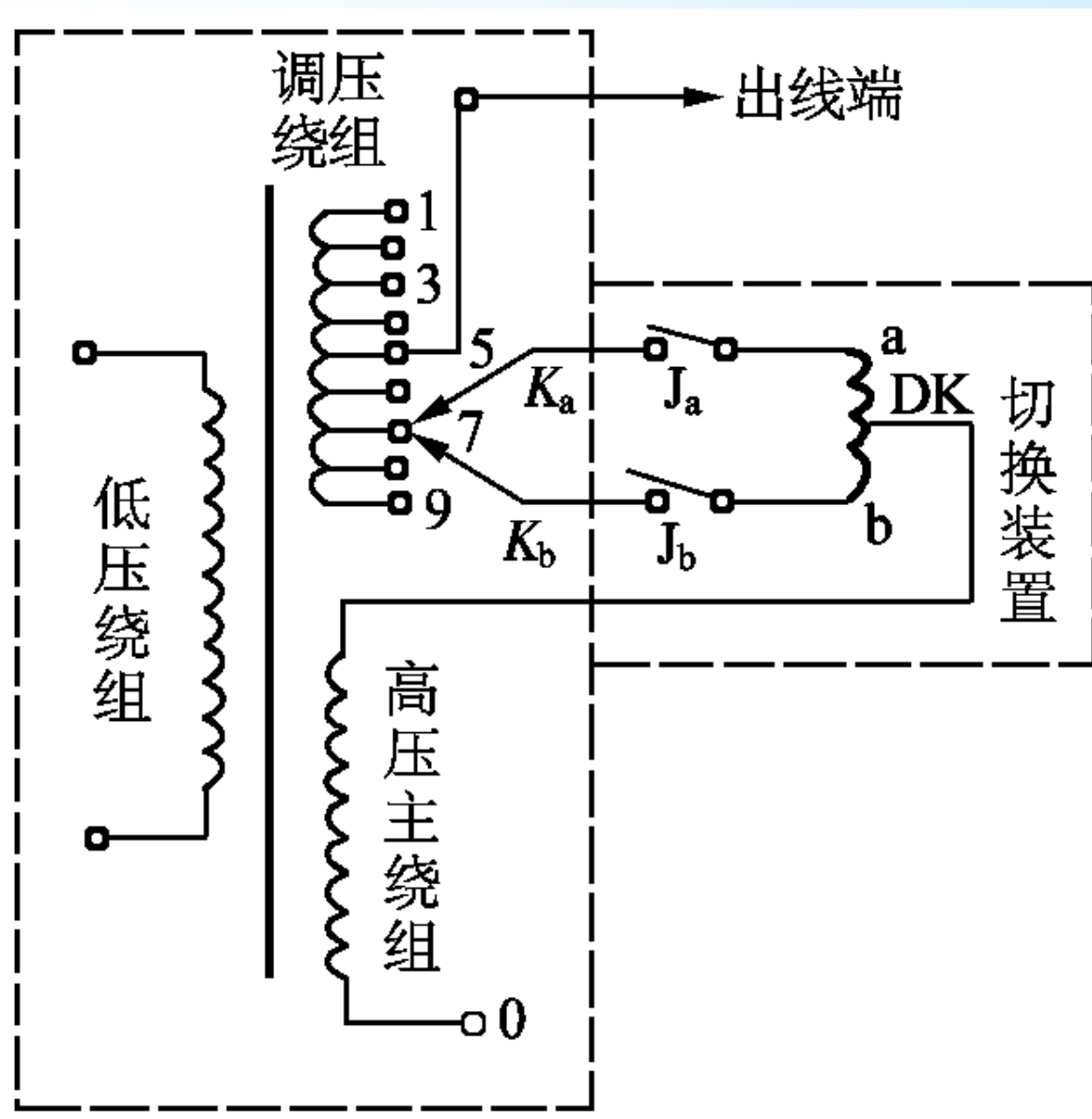
图5-18 升压变压器

$$V_{1t} = \frac{V_1 + \Delta V_T}{V_2} V_{2N}$$

例5—3  
例5—4

### 三、有载调压变压器

- 有载调压变压器可以在带负荷的条件下切换分接头而且调节范围也比较大，一般在15%以上。
- 目前我国暂定，110kV级的调压变压器有7个分接头，即  $V_N \pm 3 \times 2.5\%$ ；220kV级的有9个分接头即  $V_N \pm 4 \times 2.0\%$ 。
- 采用有载调压变压器时，可以根据最大负荷算得的  $V_{1tmax}$  值和最小负荷算得的  $V_{1tmin}$  分别选择各自合适的分接头。这样就能缩小次级电压的变化幅度，甚至改变电压变化的趋势。



例5—5

## 四、加压调压变压器

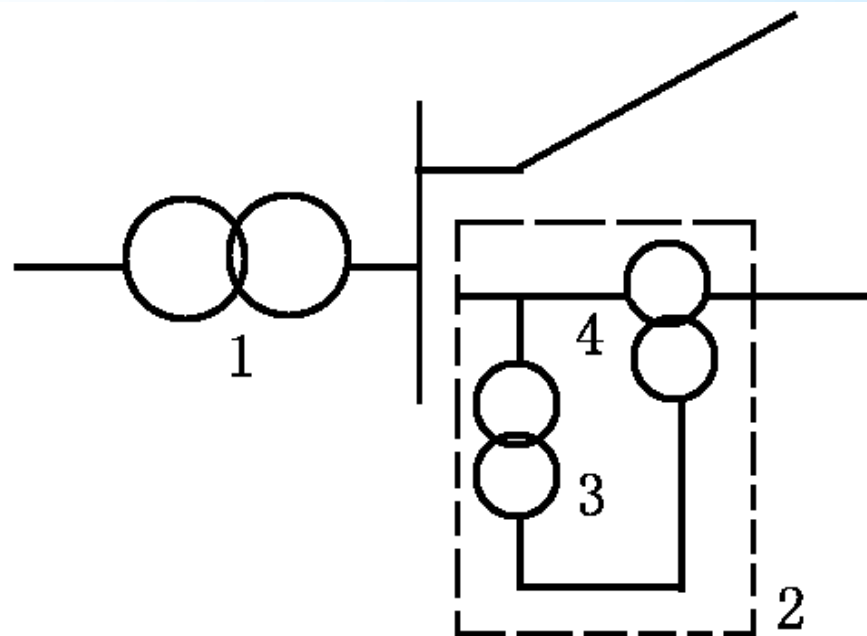
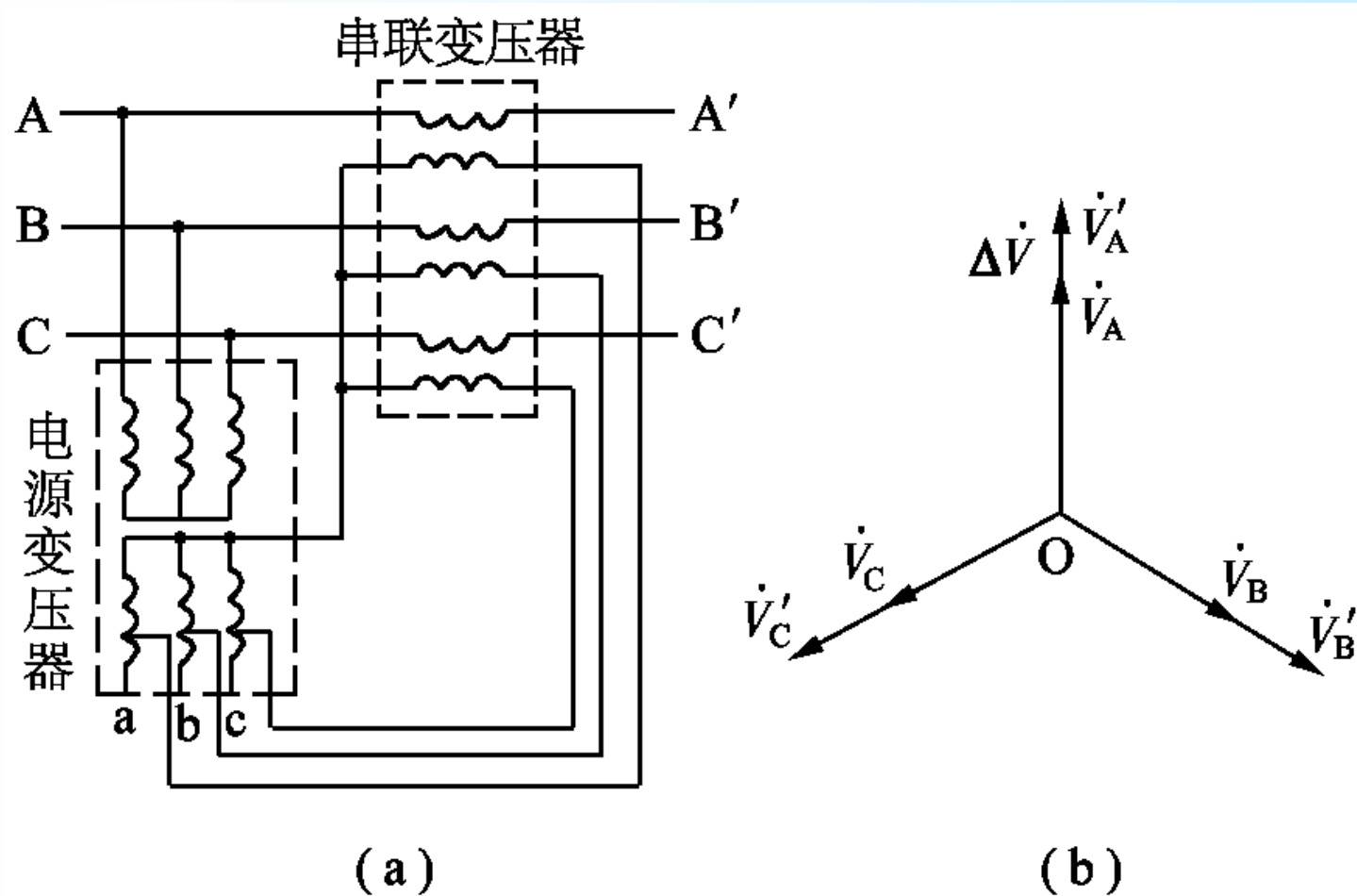


图 5—19 加压调压变压器  
1—主变压器；2—加压调压变压器；  
3—电源变压器；4—串联变压器

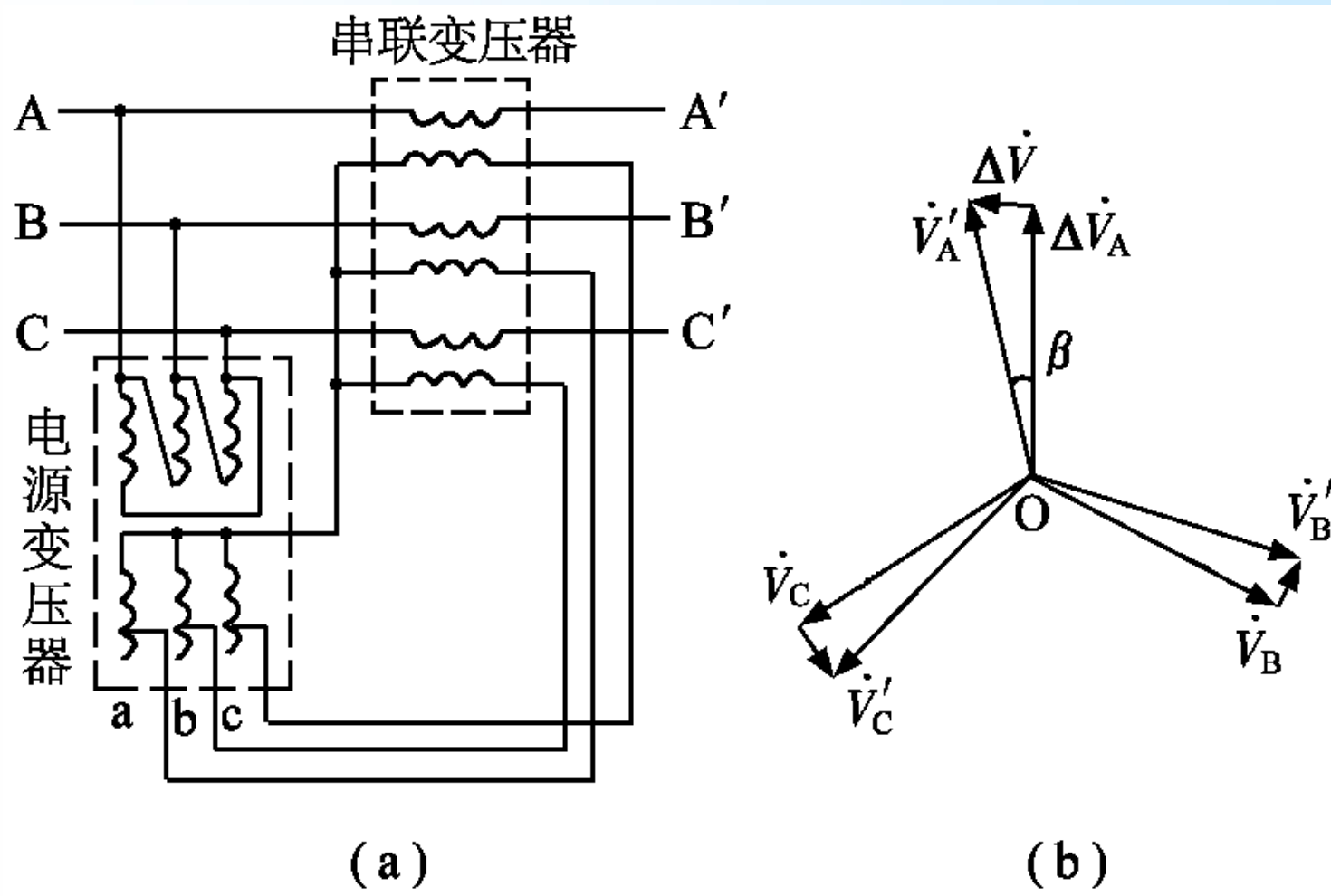
- 串联变压器4的次级绕组串联在主变压器1的引出线上，作为加压绕组。这相当于在线路上串联了一个附加电势。改变附加电势的大小和相位就可以改变线路上电压的大小和相位。
- 通常把附加电势的相位与线路电压的相位相同的变压器称为纵向调压变压器，把附加电势与线路电压有 $90^\circ$  相位差的变压器称为横向调压变压器，把附加电势与线路电压之间有不等于 $90^\circ$  相位差的调压变压器称为混合型调压变压器。



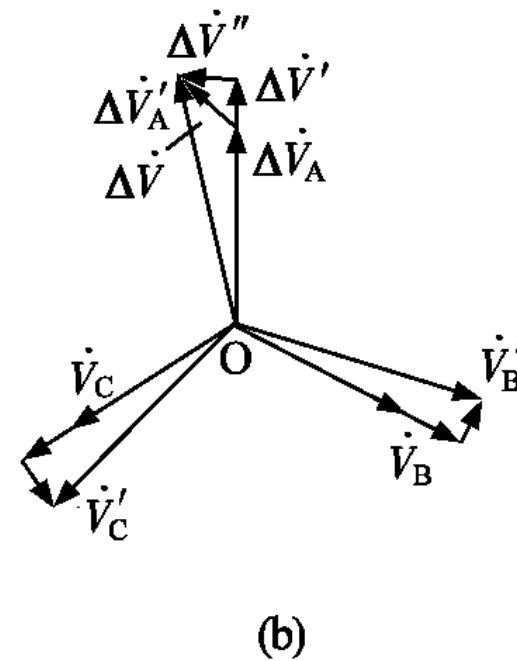
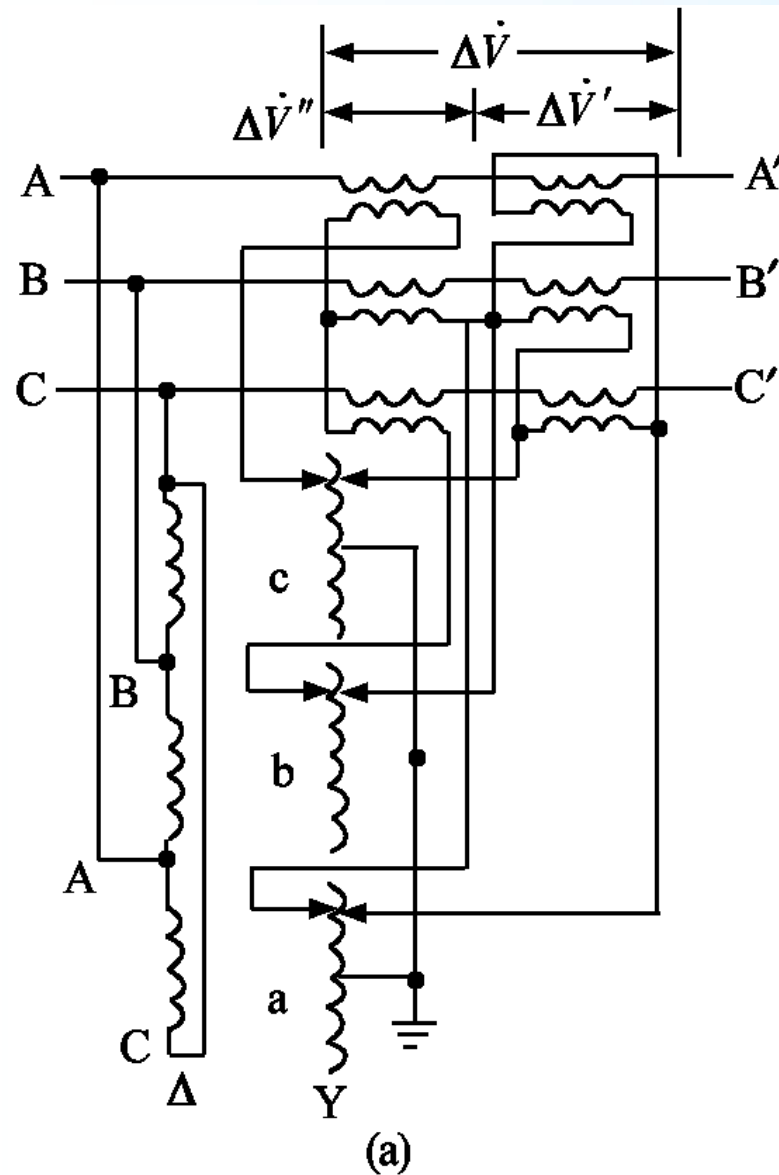
## 1. 纵向调压变压器



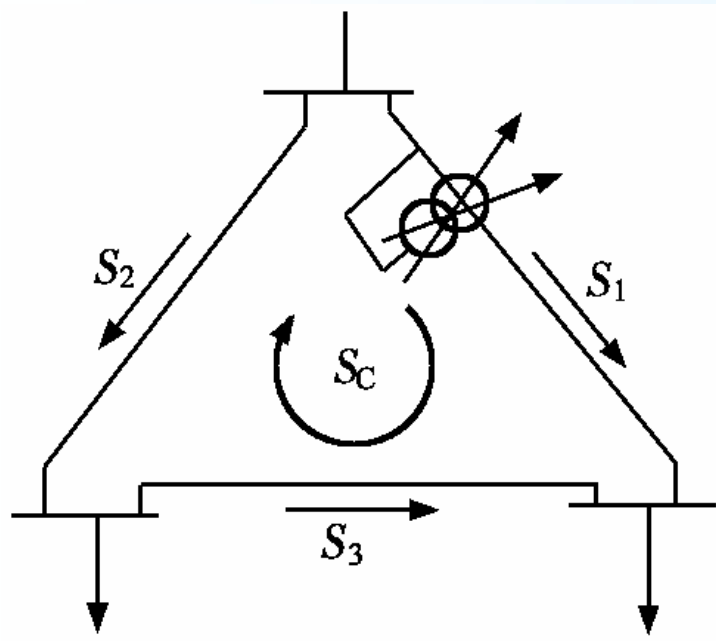
## 2. 横向调压变压器



### 3. 混合型调压变压器



加压调压变压器对于辐射形网络，可以作为调压设备。对于环形网络除起调压作用外，还可以改变网络中的**功率分布**。



$$S_c = P_c + jQ_c = \frac{\Delta \vec{V}}{\vec{Z}_\Sigma} V_N = \frac{\Delta V' - j\Delta V''}{R_\Sigma - jX_\Sigma} V_N$$

$$P_c = \frac{\Delta V' R_\Sigma + \Delta V'' X_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} V_N$$

$$Q_c = \frac{\Delta V' X_\Sigma - \Delta V'' R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} V_N$$

图5-20 环网中的加压调压变压器

**注意：**只有当系统无功功率电源容量充足时，用改变变压器变比调压才能奏效。

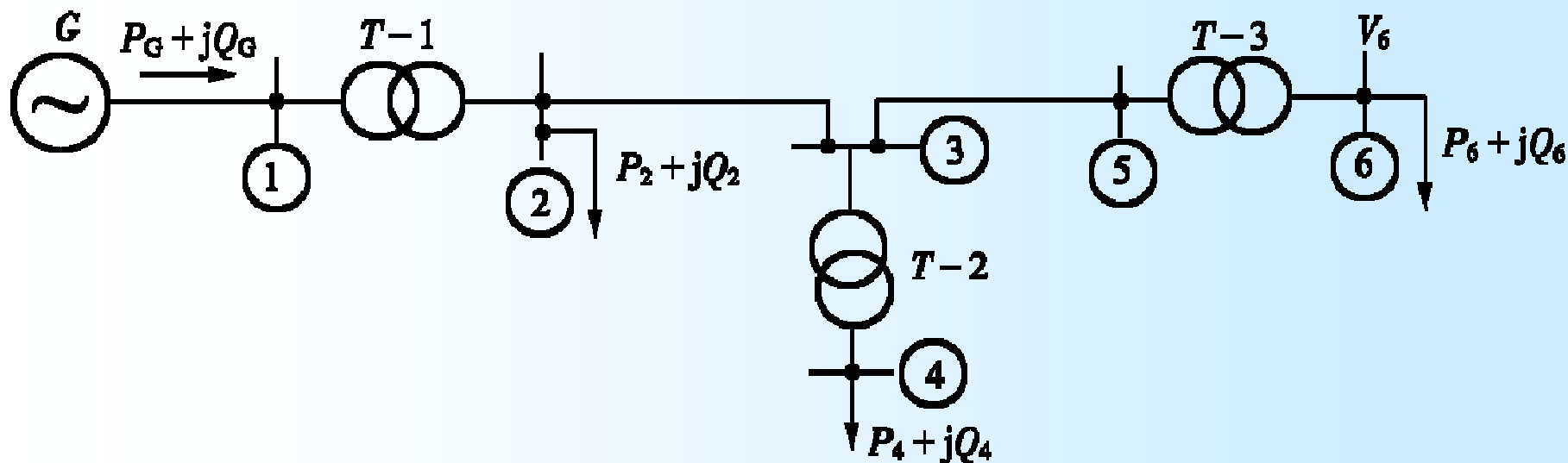


图5-21 简单的电力系统图

因此，当系统无功功率不足时，首先应装设无功功率补偿设备。

## 第五节 无功功率补偿调压

### 一、利用并联补偿调压

供电点电压 $V_1$ 和负荷功率 $P + jQ$ 已给定，线路电容和变压器的励磁功率略去不计。且不计电压降落的横分量。

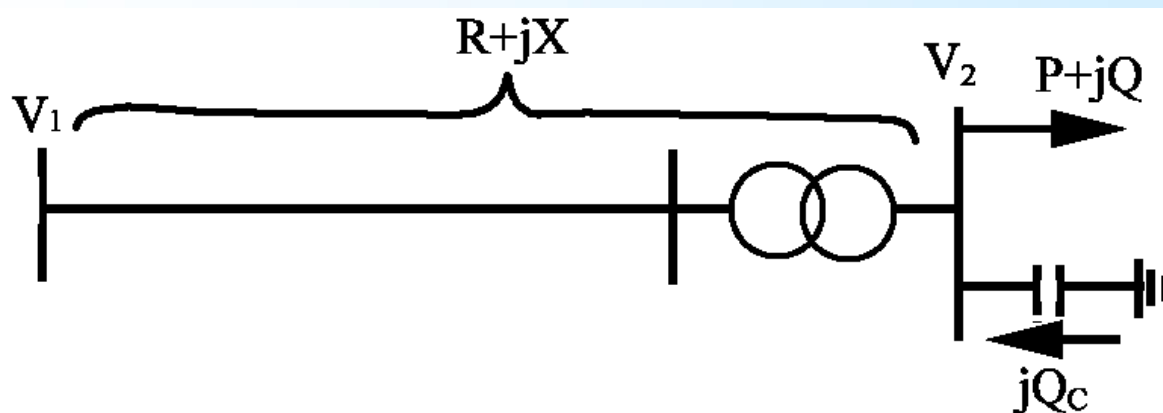


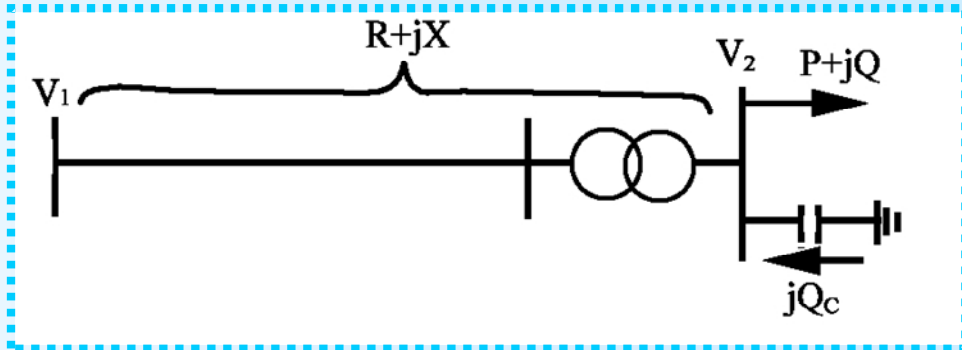
图5-22 简单电力网的无功功率补偿

补偿前

$$V_1 = V_2' + \frac{PR + QX}{V_2'}$$



归算到高压侧的变电所低压侧电压



补偿后

$$V_1 = V_{2c}' + \frac{PR + (Q - Q_c)X}{V_{2c}'}$$

如果补偿前后 $V_1$ 保持不变，则有

$$V_2' + \frac{PR + QX}{V_2'} = V_{2c}' + \frac{PR + (Q - Q_c)X}{V_{2c}'}$$

由上式可解得

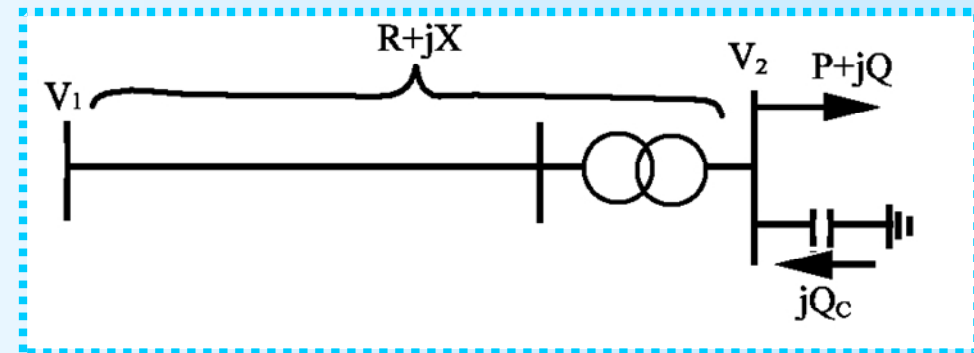
$$Q_c = \frac{V_{2c}'}{X} \left[ (V_{2c}' - V_2') + \left( \frac{PR + QX}{V_{2c}'} - \frac{PR + QX}{V_2'} \right) \right]$$

忽略第二项


$$Q_c = \frac{V_{2c}'}{X} (V_{2c}' - V_2')$$

$$V_{2c}' = kV_{2c}$$

$$Q_c = \frac{kV_{2c}}{X} (kV_{2c} - V_2') = \frac{k^2 V_{2c}}{X} \left( V_{2c} - \frac{V_2'}{k} \right)$$





$$Q_c = \frac{kV_{2c}}{X} (kV_{2c} - V_2') = \frac{k^2 V_{2c}}{X} \left( V_{2c} - \frac{V_2'}{k} \right)$$


由此可见：补偿容量与调压要求和降压变压器的变比选择均有关。

变比k的选择原则：

在满足调压的要求下，使无功补偿容量为最小。  
无功补偿设备的性能不同，选择变比的条件也不相同。

## 1. 补偿设备为静电电容器

- 为了充分利用补偿容量，在最大负荷时电容器应全部投入，在最小负荷时全部退出。
- 首先，根据调压要求，按最小负荷时没有补偿的情况确定变压器的分接头。

$$V'_{2\min} / V_{2\min} = V_t / V_{2N}$$

$V'_{2\min}$  和  $V_{2\min}$  分别为最小负荷时  
低压母线归算到高压侧 的电压  
和要求保持的实际电压 。

于是 
$$V_t = \frac{V_{2N} V'_{2\min}}{V_{2\min}} \quad (\text{据此选择分接头 } V_{1t})$$

$$k = V_{1t} / V_{2N} \quad (\text{确定变比})$$

- 其次，按最大负荷时的调压要求**计算补偿容量**

$$Q_c = \frac{V_{2c \max}}{X} \left( V_{2c \max} - \frac{V'_{2 \max}}{k} \right) k^2$$

- 然后，根据算得的补偿容量，从产品目录中**选择**合适的设备。
- 最后，根据确定的变比和选定的静电电容器容量，**校验**实际的电压变化。

## 2. 补偿设备为同步调相机

- 首先确定变比 $k$

最大负荷时，同步调相机容量为：

$$Q_c = \frac{V_{2c \max}^2}{X} \left( V_{2c \max} - \frac{V'_{2\max}}{k} \right)^2$$

最小负荷时调相机容量应为：

$$-aQ_c = \frac{V_{2c \min}^2}{X} \left( V_{2c \min} - \frac{V'_{2\min}}{k} \right)^2$$

两式相除，得：

$$-\alpha = \frac{V_{2c \min} (kV_{2c \min} - V'_{2 \min})}{V_{2c \max} (kV_{2c \max} - V'_{2 \max})}$$

由此可解出：

$$k = \frac{\alpha V_{2c \max} V'_{2 \max} + V_{2c \min} V'_{2 \min}}{\alpha V_{2c \max}^2 + V_{2c \min}^2}$$

据此确定分接头电压  $V_{1t}$

确定实际变比

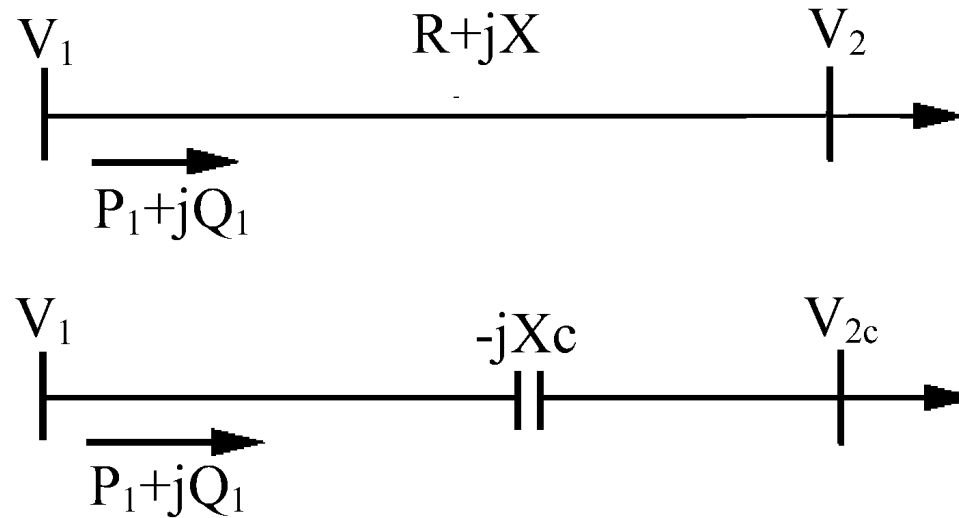
$$k = V_{1t} / V_{2N} \longrightarrow Q_c = \frac{V_{2c \max}}{X} \left( V_{2c \max} - \frac{V'_{2 \max}}{k} \right) k^2$$

## 特别注意

在高压电力网中，电抗远大于电阻， $\Delta U$ 中无功功率引起的 $QX/V$ 分量就占很大的比重。在这种情况下，减少输送无功功率可以产生比较显著的调压效果。反之，对截面不大的架空线路和所有电缆线路，用这种方法调压就不合适。

例5-6

## 二、线路串联电容补偿改善电压质量



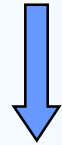
未加串联电容前

$$\Delta V = \frac{P_1 R + Q_1 X}{V_1}$$

串联了容抗 $X_c$ 后

$$\Delta V_c = \frac{P_1 R + Q_1 (X - X_c)}{V_1}$$

$$\Delta V - \Delta V_c = Q_1 X_c / V_1$$



$$X_c = \frac{V_1 (\Delta V - \Delta V_c)}{Q_1}$$

- 因此，根据线路末端电压需要提高的数值  $(\Delta V - \Delta V_c)$ ，就可求得需要补偿的电容器的容抗值  $X_c$ 。



确定线路上串联接入的电容器个数：

如果每台电容器的额定电流为 $I_{NC}$ ，额定电压为 $V_{NC}$ ，额定容量为 $Q_{NC}=V_{NC}I_{NC}$ ，则可根据通过的最大负荷电流 $I_{cmax}$ 和所需的容抗值 $X_C$ 分别计算电容器串、并联的台数 $n$ ， $m$ 以及三相电容器的总容量 $Q_C$ 。

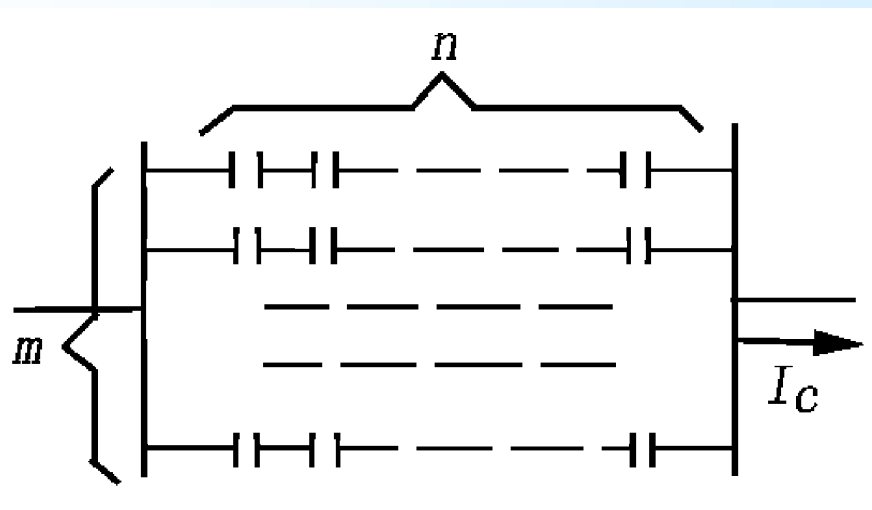
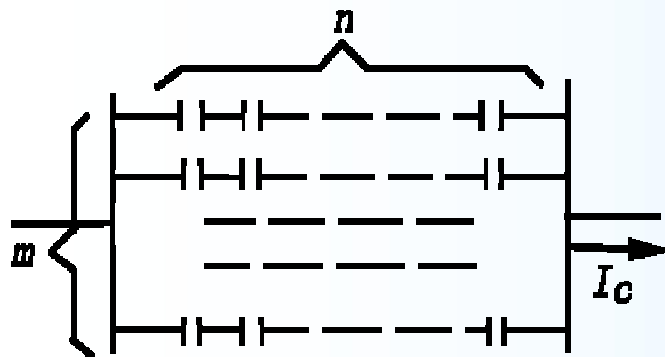


图5-23 串联电容器组



$$m I_{NC} \geq I_{Cmax}$$

$$n V_{NC} \geq I_{Cmax} X_C$$

$$Q_C = 3mn Q_{NC} = 3mn V_{NC} I_{NC}$$

三相总共需要的电容器台数为 $3mn$ 。安装时，全部电容器串、并联后装在绝缘平台上。

## 电容器安装地点的选择：使沿线电压尽可能均匀

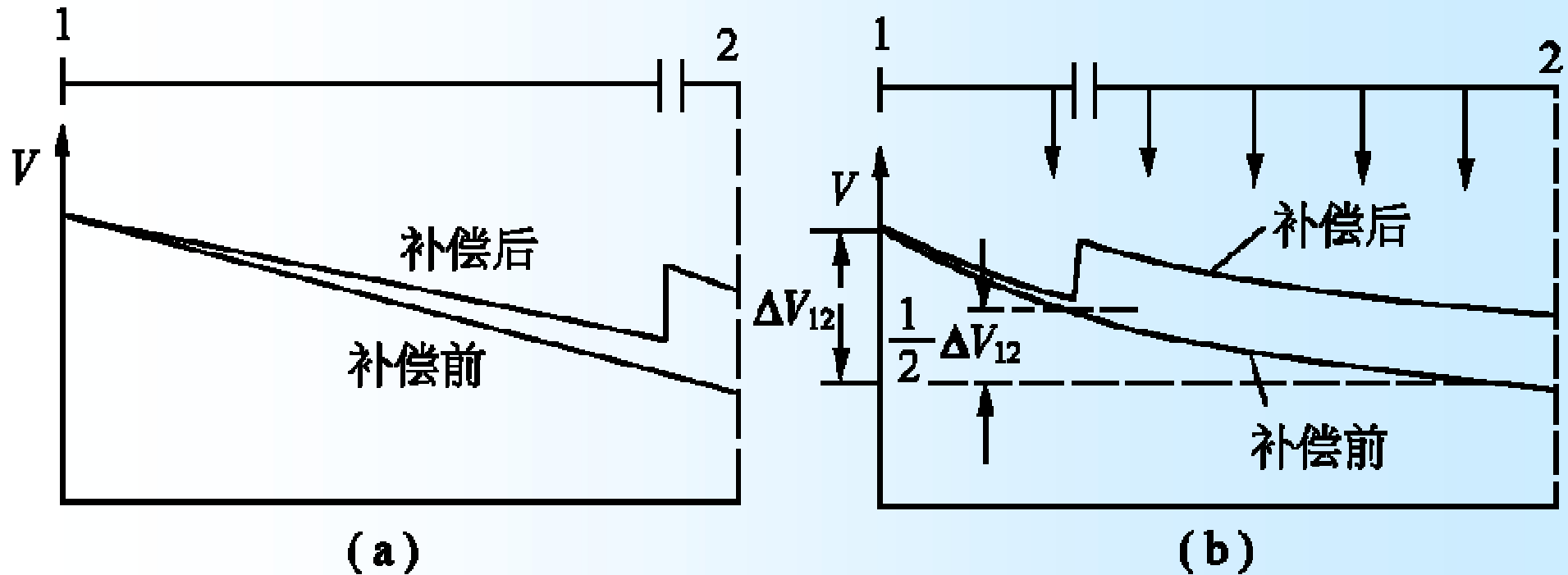


图5-24 串联电容补偿前后的沿线电压分布

(a) 负荷集中在线路末端      (b) 沿线路有若干个负荷

串联电容器提升的末端电压的数值 $QX_c/V$ (即调压效果)随无功负荷增大而增大、无功负荷的减小而减小，**恰与调压的要求一致**。这是串联电容器调压的一个显著优点。但对负荷功率因数高( $\cos \varphi > 0.95$ )或导线截面小的线路，由于 $PR/V$ 分量的比重大，串联补偿的调压效果就很小。

补偿所需的容抗值 $X_C$ 和被补偿线路原来的感抗值 $X_L$ 之比

$$k_c = X_C / X_L$$

称为**补偿度**。在配电网中以调压为目的的串联电容补偿，其补偿度常接近于1或大于1。

电力线路采用串联电容补偿，也带来一些特殊问题，因此作为改善电压质量的措施，串联电容器只用于110kV以下电压等级、长度特别大或有冲击负荷的架空分支线路上。10kV及以下电压的架空线路，由于 $R_L/X_L$ 很大，所以使用串联电容补偿是不经济和不合理的。

220kV以上电压等级的远距离输电线路中采用串联电容补偿，其作用在于提高运行稳定性和输电能力。

例5 - 7

## 第六节 电力系统无功功率的最优分配

### 一、无功负荷的最优分配

#### 1、等网损微增率准则

- 无功经济分布的**目标**：在有功负荷分布已确定的前提下，调整无功电源之间的负荷分布，使有功网损达到最小。
- 网络的有功网损可表示为节点注入功率的函数

$$P_L = P_L(P_1, P_2 \cdots P_n, Q_1, Q_2 \cdots Q_n)$$

## 无功负荷经济分配的数学表达

- 约束条件：

$$\sum_{i=1}^m Q_{Gi} - Q_L - Q_{LD} = 0$$

- 目标函数 $P_L$ 最小：

$$P_L = P_L(P_1, P_2 \cdots P_n, Q_1, Q_2 \cdots Q_n)$$



## 用拉格朗日乘数法求解

- 构造拉格朗日函数

$$L = P_L - \lambda \left( \sum_{i=1}^m Q_{Gi} - Q_L - Q_{LD} \right) = 0$$

- 分别对 $Q_{Gi}$ 和 $\lambda$ 求导并令其等于0

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{Gi}} = \frac{\partial P_L}{\partial Q_{Gi}} - \lambda \left( 1 - \frac{\partial Q_L}{\partial Q_{Gi}} \right) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = - \left( \sum_{i=1}^m Q_{Gi} - Q_L - Q_{LD} \right) = 0$$

由上式可得无功功率经济分配的条件

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_{Gi}} \times \frac{1}{1 - \frac{\partial Q_L}{\partial Q_{Gi}}} = \frac{\partial P_L}{\partial Q_{Gi}} \beta_i = \lambda$$

有功网损对  
无功电源的  
微增率

无功网损对  
无功电源的  
微增率

无功网损修  
正系数

例5 - 8