



第六章

电力系统的无功功率和电压调整

问题的提出

- 与调频一样，针对电力系统**优质、经济**的要求
- **电压偏移**是衡量电能质量的又一个重要指标。电压偏移过大可能带来很多负面影响甚至严重后果。

问题的提出

■ 电压调整和频率调整的区别

- 全系统的频率相同，而系统中各节点电压不同
- 频率与有功功率分布关系密切，电压与无功功率的分布关系密切
- 保证频率质量的首要条件是有充足的有功备用，保证电压质量的首要条件是有充足的无功备用
- 有功电源单一、无功电源多种多样
- 无功电源不消耗一次能源，而影响有功损耗；有功电源则需要消耗一次能源
- 电网中，无功损耗远大于有功损耗 ($X \gg R$)
- 调频手段单一(调原动机)，集中进行；调压手段多样，无功功率应分层分区、就地平衡

主要内容

- 电力系统无功功率平衡
- 电力系统无功功率的最优分布
- 电力系统的电压调整

目录

👉 第一节 电力系统中无功功率的平衡

- ❑ 无功功率负荷与无功功率损耗
- ❑ 无功功率电源
- ❑ 无功功率的平衡

■ 第二节 电力系统中无功功率的最优分布

■ 第三节 电力系统的电压调整

1.1 无功功率负荷与无功功率损耗

❑ 无功功率负荷

- ❑ 照明负荷、电热负荷：消耗少量感性无功
- ❑ 同步电动机：过励运行发无功；欠励运行吸无功
- ❑ 异步电动机：消耗大量无功（主要的无功负荷）

综合负荷：吸收感性无功

❑ 无功功率损耗

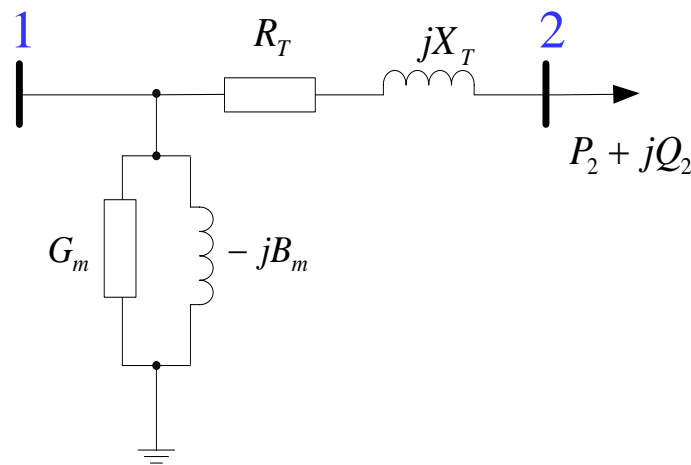
- ❑ 变压器
- ❑ 线路

1.1 无功功率负荷与无功功率损耗

■ 变压器的无功功率损耗

□ 绕组漏抗消耗感性无功

$$\begin{aligned}\Delta Q_T &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X_T \\ &= \frac{S_2^2}{U_2^2} \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \approx \frac{U_k \% S_N}{100} \left(\frac{S_2}{S_N} \right)^2\end{aligned}$$



□ 励磁支路消耗感性无功

$$Q_0 = B_m U_1^2 = \frac{I_0 \%}{100} \frac{S_N}{U_N^2} U_1^2 \approx \frac{I_0 \%}{100} S_N$$

□ 变压器总无功损耗:

$$I_0 \% = 1 \sim 2, U_k \% = 10 \quad \longrightarrow \quad \text{当 } S_2 = S_N, \Delta Q \approx 12\% S_N$$

多级电网中，变压器的无功损耗相当大

1.1 无功功率负荷与无功功率损耗

■ 线路的无功功率损耗

- 阻抗支路消耗感性无功

$$\Delta Q_{ZL} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_L$$

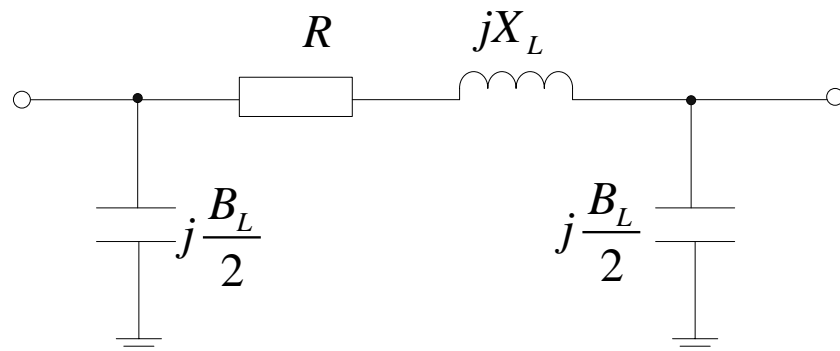
- 对地电容(电纳)消耗容性无功（发出感性无功）

$$\Delta Q_{YL} = -B_L U_N^2 \text{（线路充电功率）}$$

- 总无功损耗: $\Delta Q_L = \Delta Q_{ZL} + \Delta Q_{YL}$

- 净效应：消耗感性无功？消耗容性无功？

- 取决于传输功率的大小
- 对比第二章无损导线传输自然功率的情况



1.2无功功率电源

- 凡是发出（感性）无功功率的设备或装置，都可以称为无功功率电源。
- 无功电源的分类

传统无功电源

- 同步发电机（Synchronous Generator）
- 同步调相机（Synchronous Condenser）
- 并联电容器（Capacitor）
- 并联电抗器（Reactor）

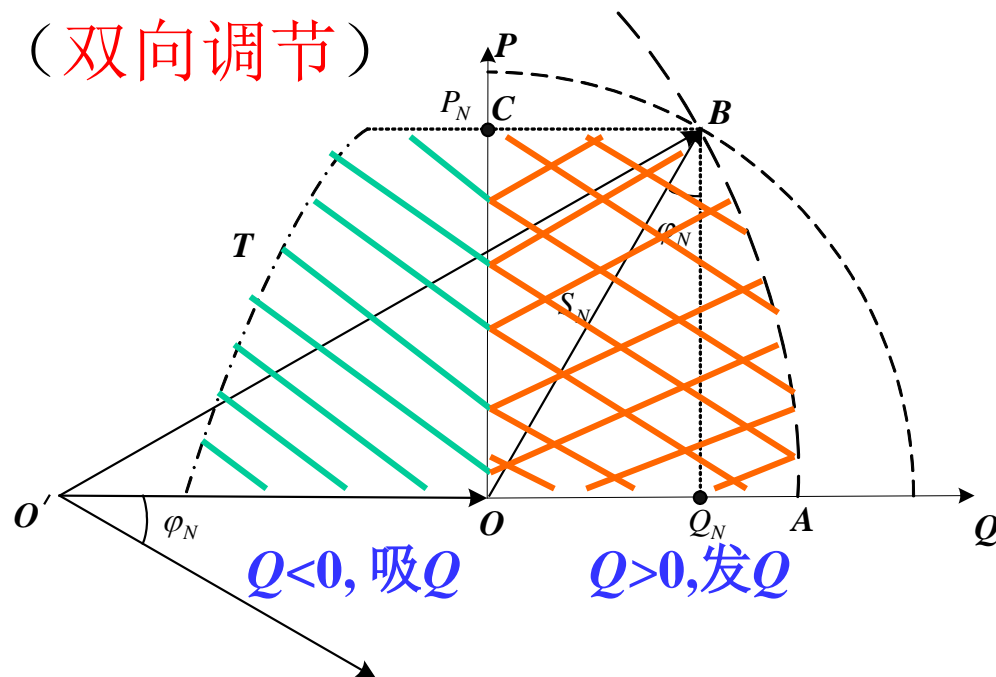
新型无功电源

- 静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)
- 静止调相机（Static Condenser, SVG, Statcom）

1.2无功功率电源

□ 同步发电机：

- 唯一的有功电源、最基本的无功功率电源
- 通过改变励磁电流，可连续调节无功
- 可吸可发感性无功（双向调节）
- 无需额外投资



1.2无功功率电源

- 同步调相机（只能发无功功率的特殊发电机）
 - 过励运行，发出 Q ；欠励运行，吸收 Q （双向调节）
 - 欠励容量为过励容量的50%
 - 电压调节特性好
 - 可连续调节
 - 投资大，运行维护困难

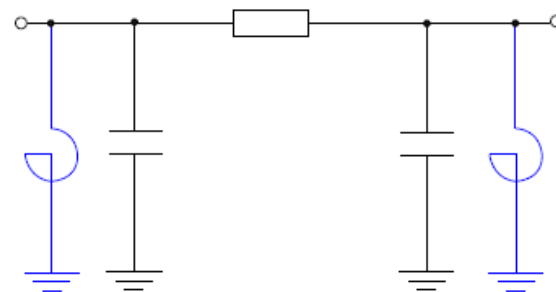
1.2无功功率电源

□ 并联电容器

- 只能发出感性无功（单向调节）
- 输出感性无功 $Q = B_c U^2 = \omega C U^2$ (与端电压平方成正比)
- 成组投退，不能连续调节
- 投资较小，使用灵活，应用最广泛

□ 并联电抗器（广义无功电源）

- 只能吸收感性无功（单向调节）
- 用于超高压、长距离、轻载线路，吸收过剩无功



1.2无功功率电源

□ 新型无功补偿设备

■ 静止补偿器（SVC: Static Var Compensator）

□ 晶闸管控制电抗器（TCR— Thyristor Controlled Reactor ）型

□ 晶闸管开关电容（TSC— Thyristor Switched Capacitor ）型

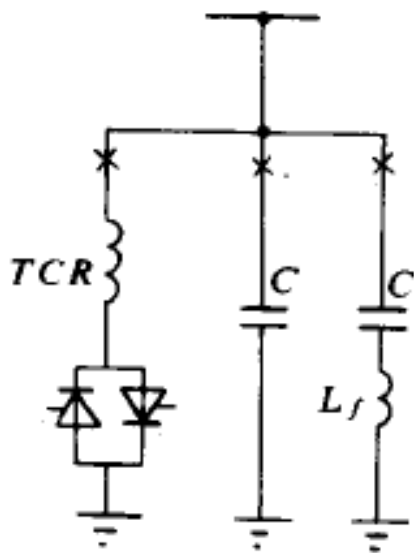
□ 饱和电抗器（SR— Saturated Reactor ）型

■ 静止调相机（Statcom）

1.2无功功率电源

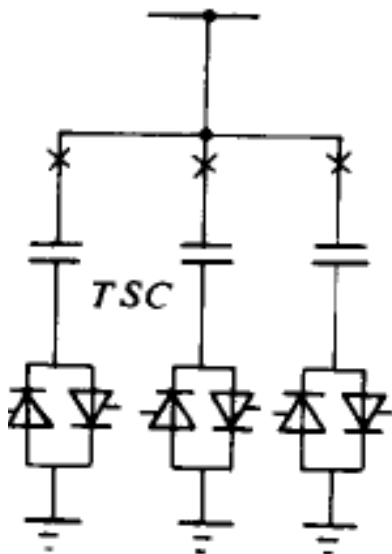
■ 静止补偿器

晶闸管控制电抗器型
(TCR)



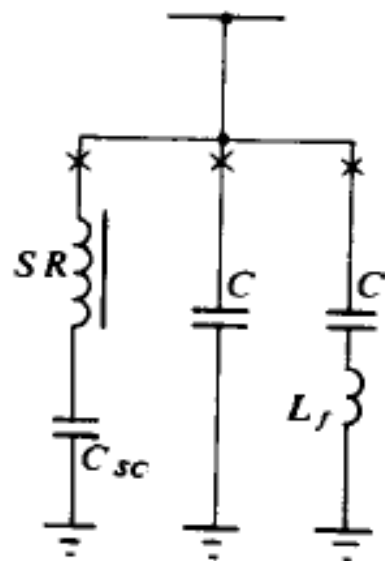
可吸可发感性无功；
连续调节

晶闸管开关电容器型
(TSC)



只能发感性无功；
不能连续调节

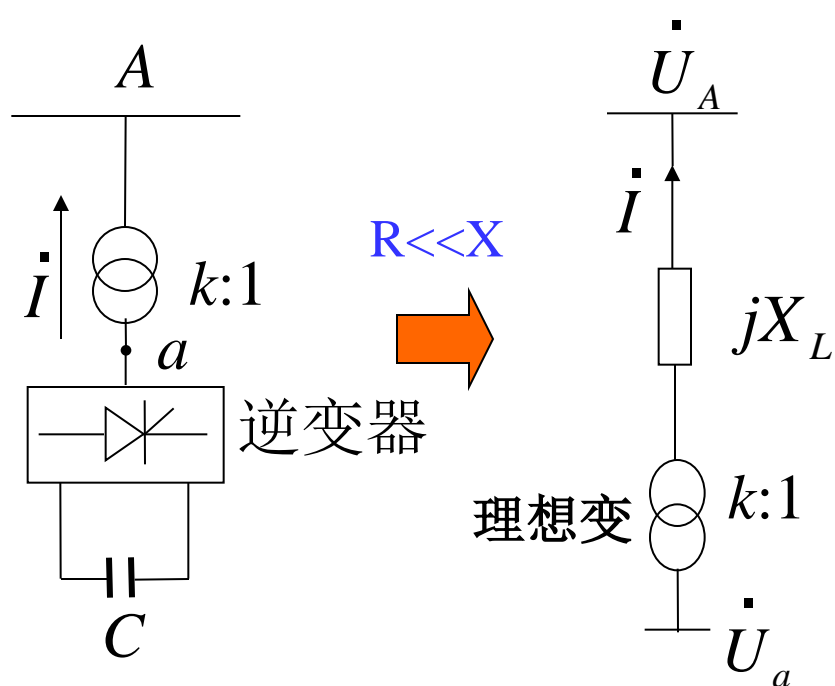
饱和电抗器型
(SR)



可吸可发无功；
连续调节

1.2无功功率电源

■ 静止调相机



$$\dot{I} = \frac{k\dot{U}_a - \dot{U}_A}{jX_L}$$

两点电压同相位，可看成参考相位0

$$\tilde{S}_A = \dot{U}_A \dot{I}^* = U_A j \frac{kU_a - U_A}{X_L} = jQ_s$$

若 $kU_a > U_A$, $Q_s > 0$
若 $kU_a < U_A$, $Q_s < 0$

优点：电压调节效应为正，可快速、连续、双向调节

缺点：投资大

1.3 无功功率的平衡

$$\sum Q_{GC} = \sum Q_L + \sum \Delta Q$$

$\sum Q_{GC}$: 系统中所有无功电源[发电机、无功补偿设备(调相机、并联电容器、静止补偿器)]发出无功功率的总和

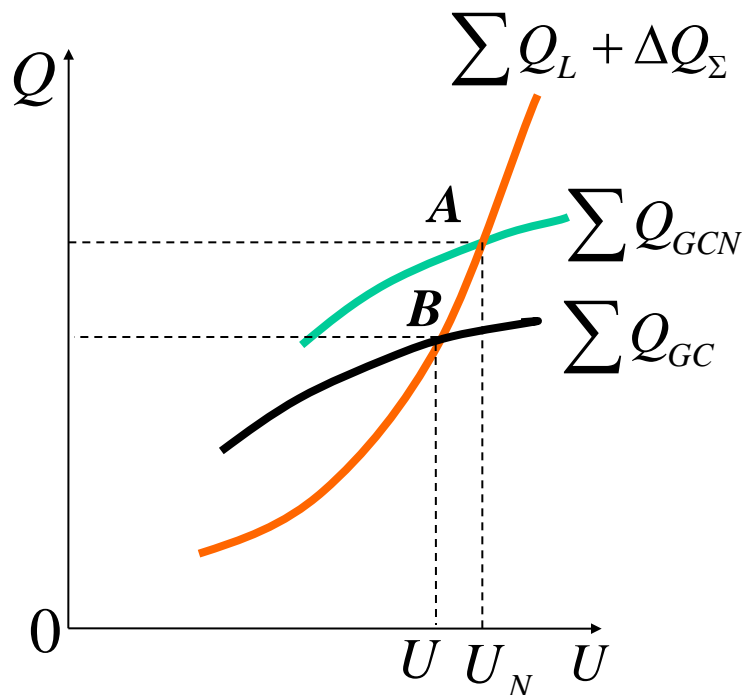
$\sum Q_L$: 系统中所有负荷消耗的无功功率

$\sum \Delta Q$: 网络元件(变压器、线路)的无功损耗

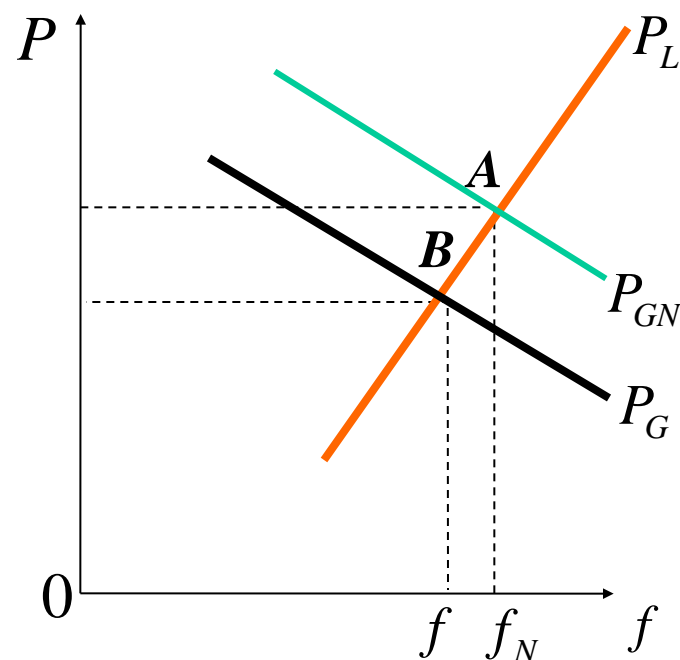
1.3 无功功率的平衡

■ 说明:

□ 系统运行电压的确定



B点无功电源不足，电压低于额定值



B点有功电源不足，频率低于额定值

目录

- 第一节 电力系统中无功功率的平衡
- ☞ 第二节 电力系统中无功功率的最优分布
 - 负荷的自然功率因数及提高措施
- 第三节 电力系统的电压调整

第二节 无功功率的最优分布

- 无功电源的最优分布、无功负荷的最优补偿
- 负荷的自然功率因数（一般较低）
 - 负荷的自然功率因数大约为0.6~0.9，其中较大的数值对应于采用大容量同步电动机的场合。
 - 异步电动机负荷率愈低，功率因数愈低。当异步电动机轻载或空载运行时，其功率因数甚至低于0.6
- 提高自然功率因数的措施
 - 尽量使电动机的容量与其机械负载匹配
 - 限制电动机的空载运行
 - 以同步电动机代替异步电动机
 - 绕线式异步电动机同步化
 - 实质：降低负荷对无功功率的需求

目录

- 第一节 电力系统中无功功率的平衡
- 第二节 电力系统中无功功率的最优分布
- 👉 第三节 电力系统的电压调整
 - 电压调整的必要性
 - 电压波动和电压管理
 - 电压调整的手段

3.1电压调整的必要性

- ❑ 系统中各节点电压的偏移不可避免
- ❑ 电压偏移过大会影响设备的正常运行；因无功短缺造成的电压水平低下可能引发电压崩溃

电压调整的含义：在正常运行状态下，随着负荷变动及运行方式的变化，使各节点电压在允许的偏移范围内而采取的各种技术措施

保证系统电压质量的首要条件：系统有充足的无功备用

3.2 电压波动和电压管理

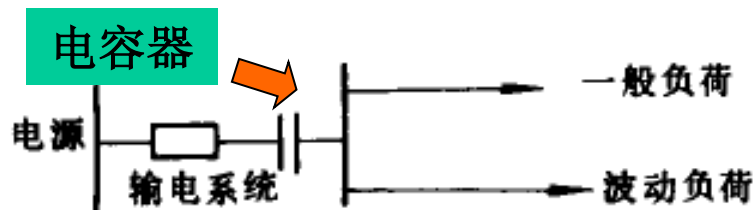
- 频率调整中将**有功负荷**变动及引起的**频率偏移**分成三类
- 电压调整中将**有、无功负荷**变动及引起的**电压偏移**分成两类：
 - **周期长、波及面大**，主要由生产、生活、气象变化引起的**电压变动**
 - **冲击性或间歇性**负荷引起的**电压波动**。这类负荷主要有往复泵（压缩机）、电弧炉（电焊机）、卷扬机（起重机）、通风设备

限制电压波动的措施

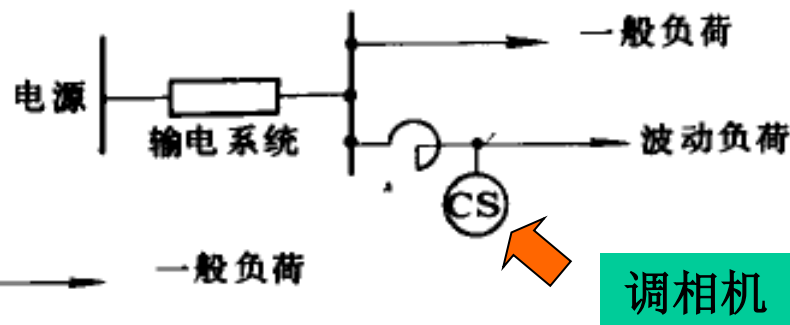
针对冲击性负荷

□ 由大容量变电所对波动负荷单独供电

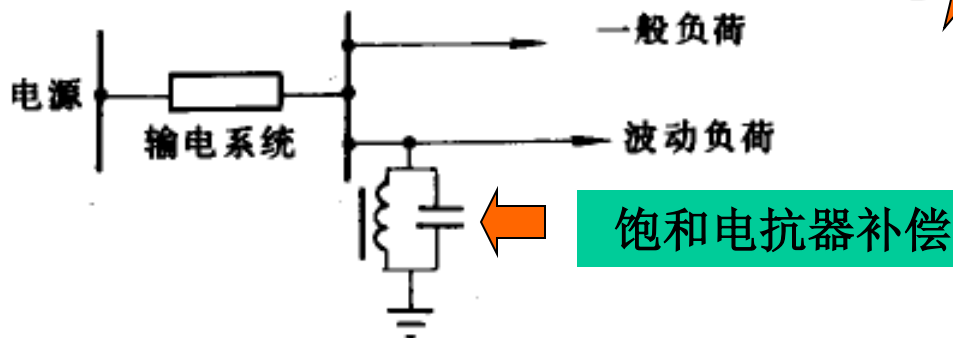
□ 设置串联电容器




□ 设置调相机和电抗器



□ 设置静补

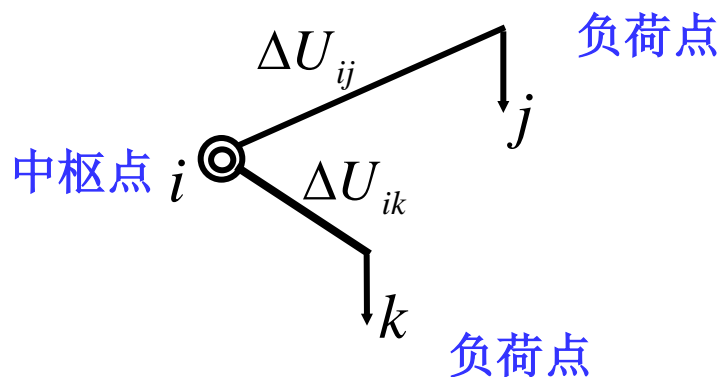


电压管理（电压调整）

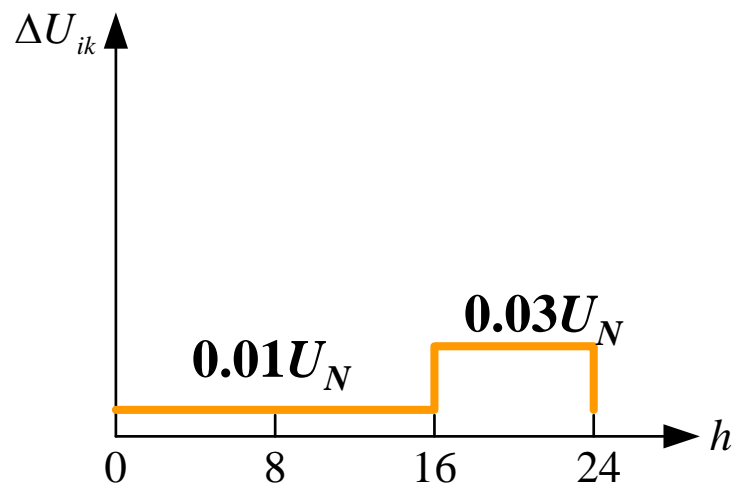
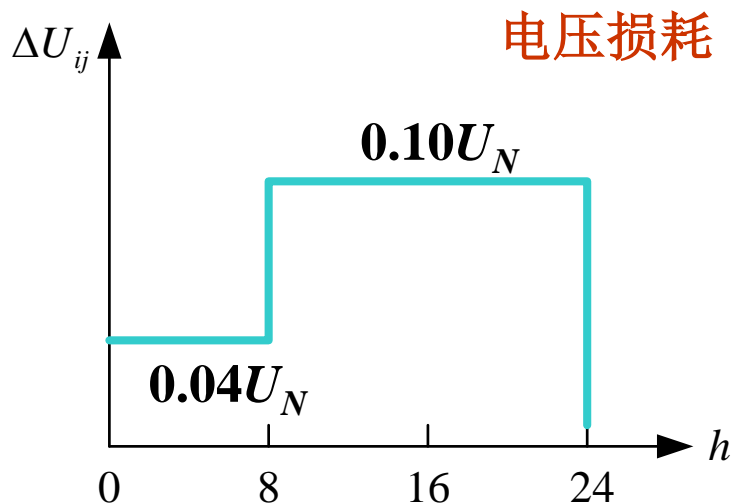
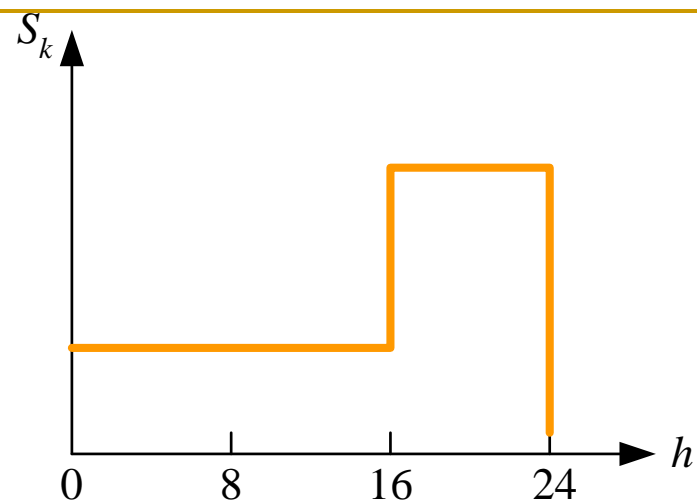
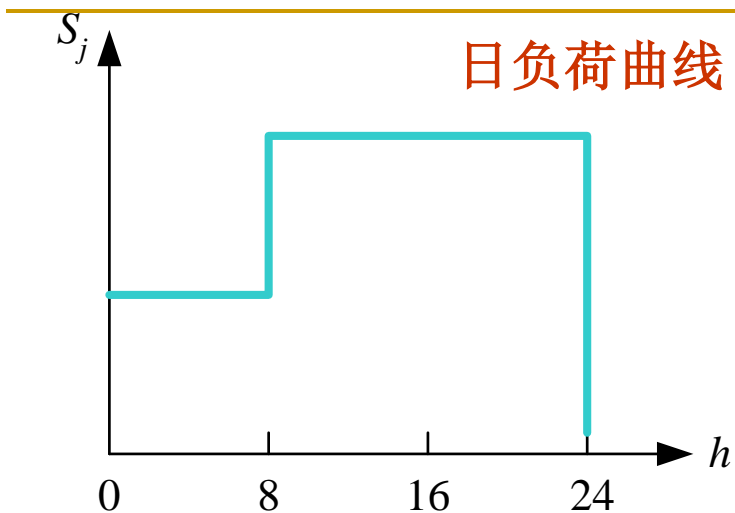
- 调整对象（针对以下原因引起的电压变动）：
 - 生产、生活、气象变化引起的负荷变动
 - 因系统接线方式改变、个别设备故障退出而造成网络阻抗和潮流分布的变化
- 实施方式：监视和调整电压中枢点的电压
 - 电压中枢点：系统电压的直接监视、调整点，通常是能反映系统电压水平的主要发电厂或枢纽变电站母线。
 - 电力系统的电压调整  保证中枢点电压偏移不超限

电压管理（电压调整）

- 中枢点电压曲线的编制
 - 目的：确定中枢点的电压允许变动范围
 - 编制方法：根据各负荷点的负荷曲线和电压要求，计及中枢点到负荷点的电压损耗，从而确定对中枢点电压的要求。
 - 举例说明

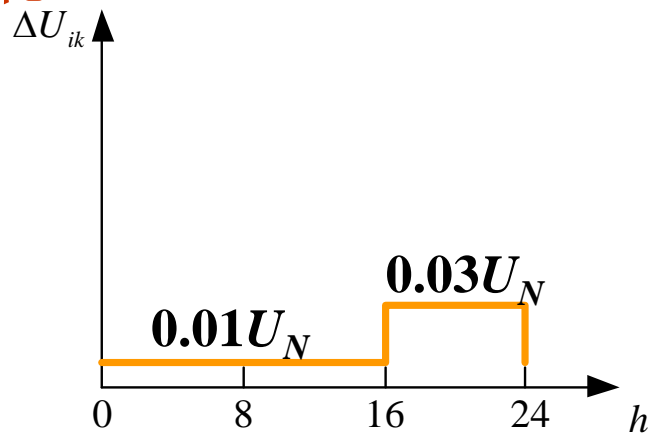
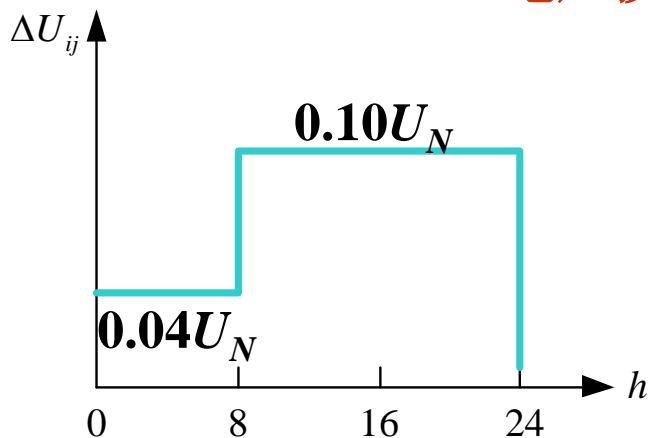


中枢点电压曲线的编制

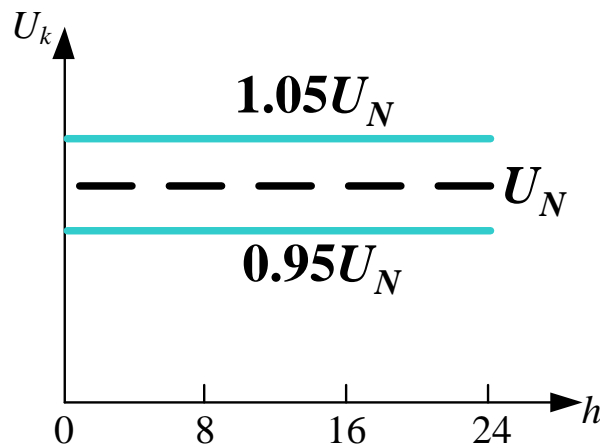
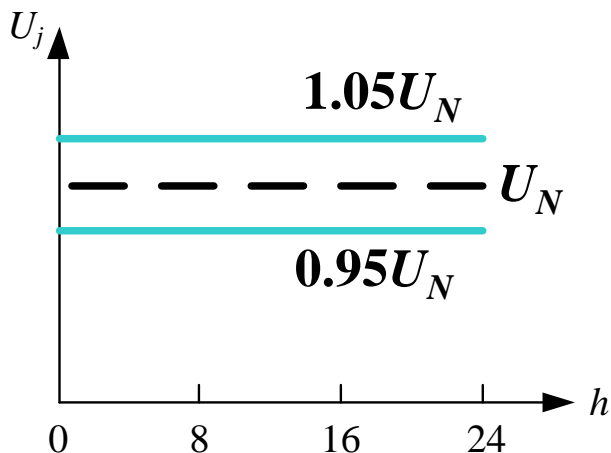


中枢点电压曲线的编制

电压损耗

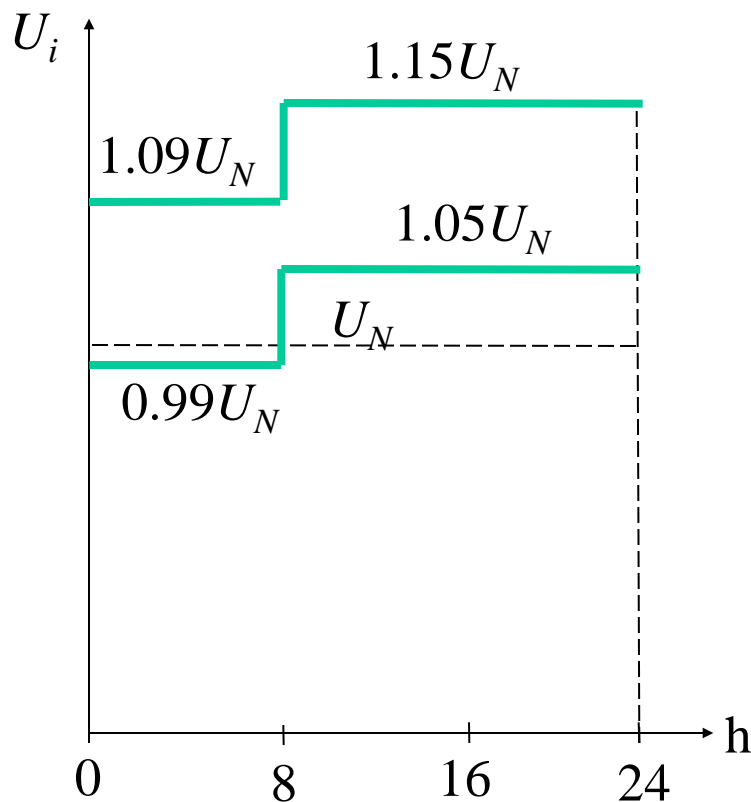


假设：负荷点允许电压偏移为 $\pm 5\%$

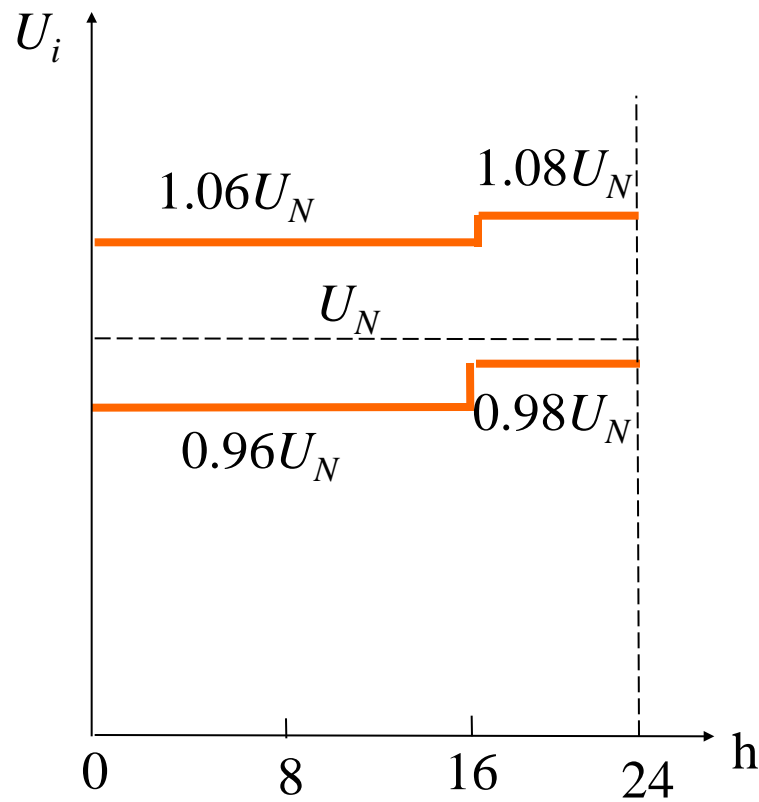


中枢点电压曲线的编制

若负荷点允许电压偏移为 $\pm 5\%$

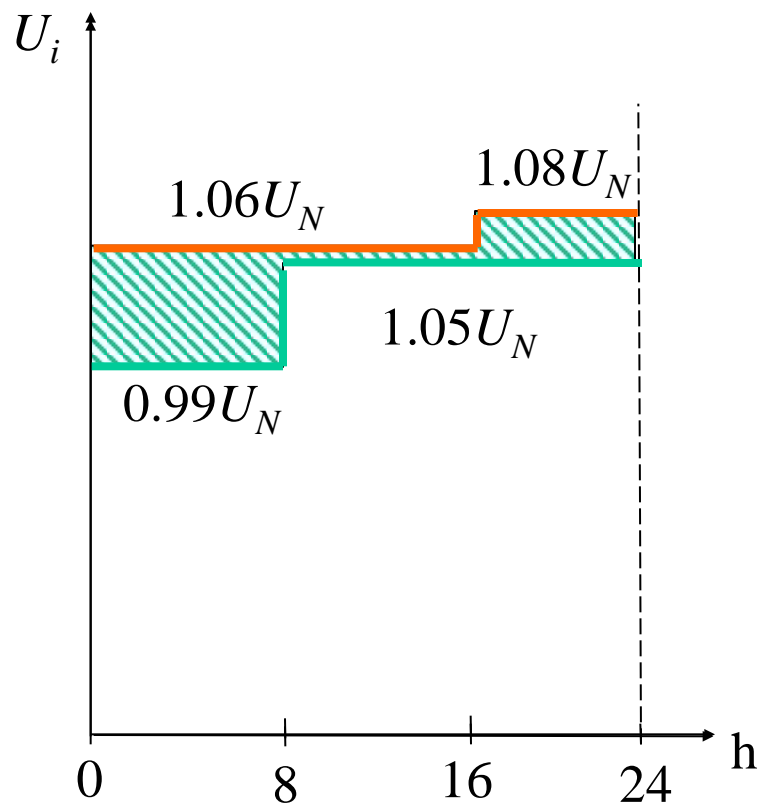


负荷 j 对中枢点 U_i 的要求



负荷 k 对中枢点 U_i 的要求

中枢点电压曲线的编制



同时满足负荷 j 、 k 的要求

➤ 要同时满足多个负荷的电压需求，**中枢点电压的允许变动范围大大缩小**

➤ 若各支路电压损耗变动大小和规律相差大，**仅控制中枢点电压可能不能满足所有负荷点的电压，必须采取其它措施**

中枢点调压方式（调压要求）

□ 中枢点电压调整方式

■ 逆调压（与电压的自然特性相反）

高峰负荷时，提高中枢点的电压， $U = 1.05U_N$

低谷负荷时，降低中枢点电压， $U = U_N$

适用：供电线路较长，负荷变动大的电压中枢点

■ 顺调压（与电压的自然特性相同）

高峰负荷时允许中枢点电压略低，但要求 $U \geq 1.025U_N$

低谷负荷时允许中枢点电压略高，但要求 $U \leq 1.075U_N$

适用：供电线路短，负荷变动不大的电压中枢点

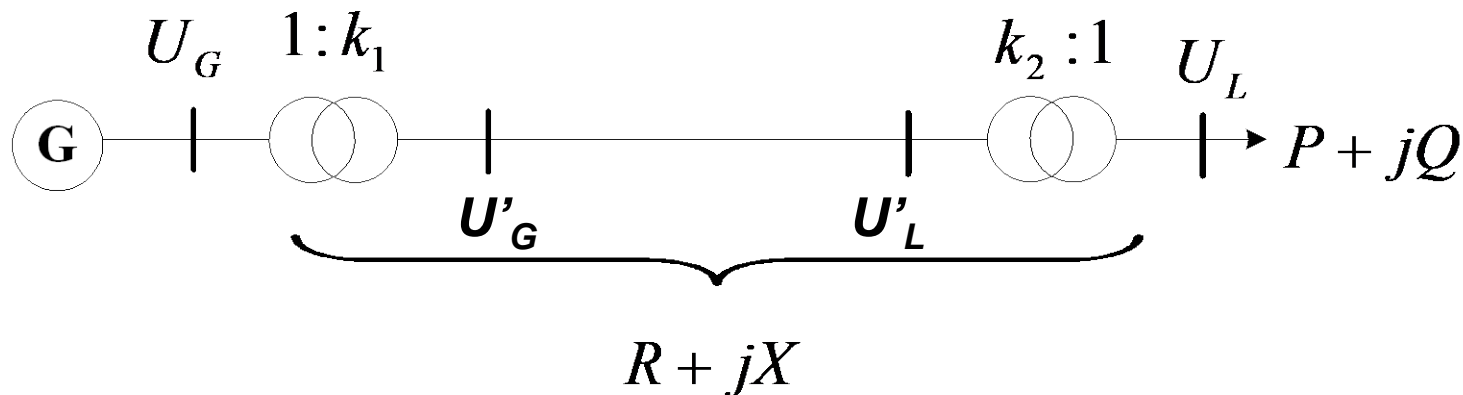
■ 常调压（不考虑电压的自然特性）

任何负荷时中枢点电压都基本保持不变， $1.02U_N \leq U \leq 1.05U_N$

适用：两者之间的电压中枢点

3.3 电压调整的手段

□ 电压调整的基本原理



假设:

- 不计线路充电功率和变压器的励磁功率
- 设所有的阻抗均归算到高压侧
- 不计功率损耗
- 不计电压降落横分量

3.3 电压调整的手段

□ 电压调整的基本原理

■ 负荷侧母线归算到高压侧的电压

$$U'_L = U'_G - \Delta U = U_G k_1 - \frac{PR + QX}{U_N}$$

■ 负荷侧母线的实际电压

$$U_L = \frac{U'_L}{k_2} = (U_G k_1 - \frac{PR + QX}{U_N}) / k_2$$



改变负荷点电压可以采用以下手段：

- 改变 U_G —借改变发电机机端电压调压
- 改变 k_1, k_2 —借改变变压器变比调压
- 改变 Q —借无功补偿设备调压
- 改变 X —借串联电容调压（较少采用）
- 组合调压

3.3 电压调整的手段—改变机端电压

- 调压手段之一：借改变发电机端电压调压
 - 实施：调节发电机的励磁
 - 方式：机端无负荷时，调节范围95%~105%；有负荷时，一般采用逆调压方式
 - 优点：不需要另外增加设备，应首先考虑，充分利用，是最直接、最经济的调压方式
 - 局限性：
 - 受发电机无功功率极限的限制
 - 对于线路较长且有多级电压的网络，单靠发电机调压往往不能满足各点电压的要求

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 调压手段之二：借改变变压器变比调压

□ 电力变压器的高、中压绕组一般有多个分接头
有载调压变压器：

- 可以带负荷调分接头
- 分接头多
$$\begin{cases} U_N \pm 3 \times 2.5\% \\ U_N \pm 4 \times 2\% \\ U_N \pm 8 \times 1.5\% \end{cases}$$

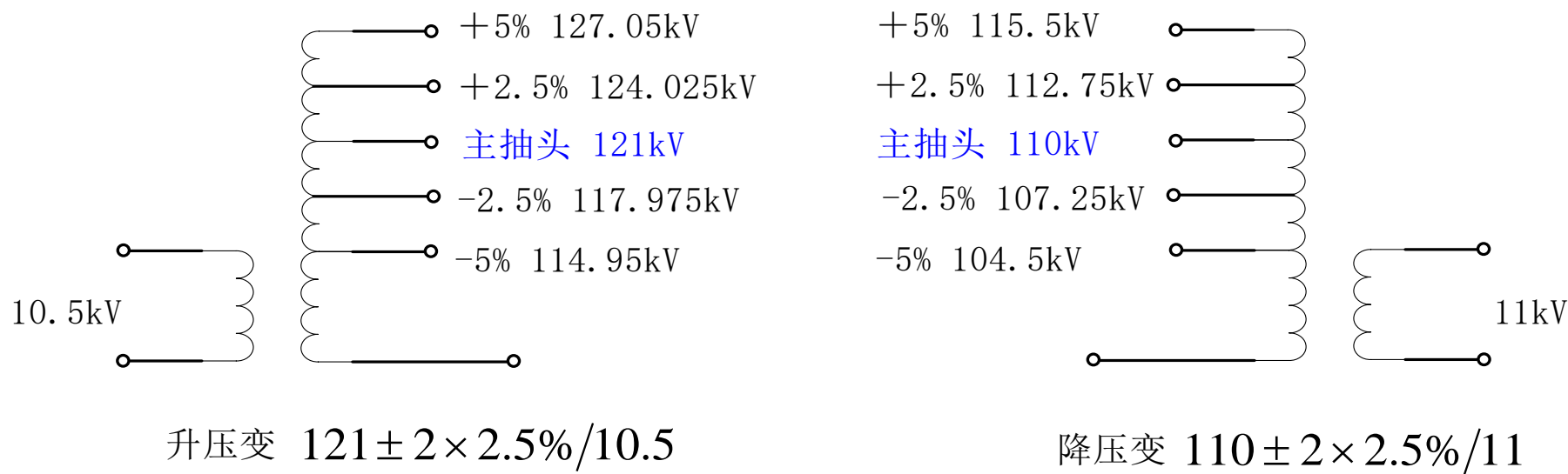
无载调压变压器：

- 停电调分接头
- 分接头少
$$\begin{cases} U_N \pm 5\% \\ U_N \pm 2 \times 2.5\% \end{cases}$$



3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 变压器分接头标称电压



$$U_t = U_N (1 \pm n \times 2.5\%)$$

挡位

高压侧额定电压

挡距 (分接头电压级差)

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

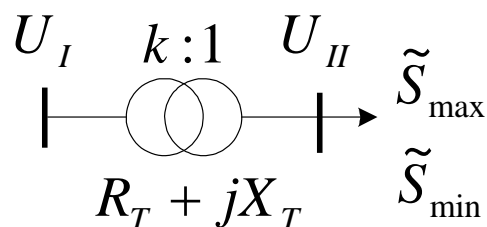
■ 变压器的变比

$$\text{额定变比} = \frac{\text{高压侧额定电压}}{\text{低压侧额定电压}}$$

$$\text{实际变比} = \frac{\text{高压侧实际分接头标称电压}}{\text{低压侧额定电压}}$$

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 无载调压变压器的分接头选择—降压变



已知：最大负荷、最小负荷时变压器高压侧母线电压 $\begin{cases} U_{I \max} \\ U_{I \min} \end{cases}$

归算到高压侧的电压损耗 $\begin{cases} \Delta U_{\max} \\ \Delta U_{\min} \end{cases}$

低压侧母线的调压要求 $\begin{cases} U_{II \max} \\ U_{II \min} \end{cases}$


求：满足低压侧母线的调压要求，实际变比 k ？


3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ **解：** 根据调压要求

① 最大负荷时


$$\frac{U_{I \max} - \Delta U_{\max}}{k_{\max}} = U_{II \max}$$



$$k_{\max} = \frac{U_{I \max} - \Delta U_{\max}}{U_{II \max}}$$



$$U_{tI \max} = k_{\max} U_{T2N} = \frac{U_{I \max} - \Delta U}{U_{II \max}} U_{T2N}$$

② 最小负荷时

$$\frac{U_{I \min} - \Delta U_{\min}}{k_{\min}} = U_{II \min}$$


$$k_{\min} = \frac{U_{I \min} - \Delta U_{\min}}{U_{II \min}}$$


$$U_{tI \min} = k_{\min} U_{T2N} = \frac{U_{I \min} - \Delta U}{U_{II \min}} U_{T2N}$$


$$\textcircled{3} U_{tI} = \frac{U_{tI \max} + U_{tI \min}}{2}$$

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

4 选择标准档位

根据第3步所得分接头电压 U_{tI} 选择最接近的标准档位 $U_{tI\text{标}}$

$$k = \frac{U_{tI\text{标}}}{U_{T2N}}$$

5 变比的校验

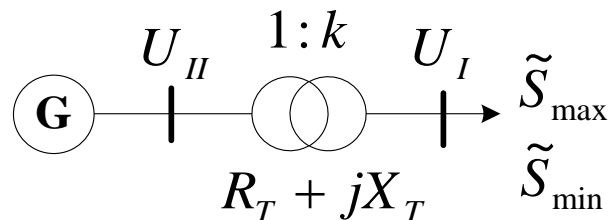
根据选定的变比，计算低压侧母线的实际电压，校验是否满足调压要求。

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 无载调压变压器的分接头选择—升压变

□ 与降压变变比选择的区别：

■ 潮流方向不同



$$kU_{II} = U_I + \Delta U$$

■ 有时调压要求针对高压侧母线给出

$$U_{tI \max} = \frac{U_{I \max} + \Delta U}{U_{II \max}} U_{T2N}$$

$$U_{tI \min} = \frac{U_{I \min} + \Delta U}{U_{II \min}} U_{T2N}$$

$$U_{tI} = \frac{U_{tI \max} + U_{tI \min}}{2}$$

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 有载调压变压器的分接头选择

- 与无载调压变分接头选择的区别：分别根据最大负荷和最小负荷时的调压要求确定分接头电压

$$\frac{U_{I \max} - \Delta U_{\max}}{k_{\max}} = U_{II \max}$$



$$U_{tI \max} = k_{\max} U_{T2N} = \frac{U_{I \max} - \Delta U}{U_{II \max}} U_{T2N}$$



$$k_{\max} = \frac{U_{tI \max \text{ 标}}}{U_{T2N}}$$

$$\frac{U_{I \min} - \Delta U_{\min}}{k_{\min}} = U_{II \min}$$



$$U_{tI \min} = k_{\min} U_{T2N} = \frac{U_{I \min} - \Delta U}{U_{II \min}} U_{T2N}$$



$$k_{\min} = \frac{U_{tI \min \text{ 标}}}{U_{T2N}}$$

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 三绕组变压器的分接头选择

□ 三绕组变压器高、中压侧均设有分接头

□ 高压侧有电源的三绕组降压变

■ **第一步**：根据低压母线的调压要求，在高一低压绕组之间进行计算，选择 $k_{1-3} = U_{t1} / U_{T3N}$

■ **第二步**：根据中压母线的调压要求和计算所得的高压侧分接头，在高一中压绕组之间进行计算，选择

$$k_{1-2} = U_{t1} / U_{t2}$$

■ 变压器变比： $k = U_{1t} / U_{2t} / U_{T3N}$

□ 低压侧有电源的三绕组升压变

■ 按两台双绕组升压变考虑

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ P239/例6-5

■ 例题点评:

□ 选变比一类题目的解题关键:

用含变比的式子将调压要求表达出来

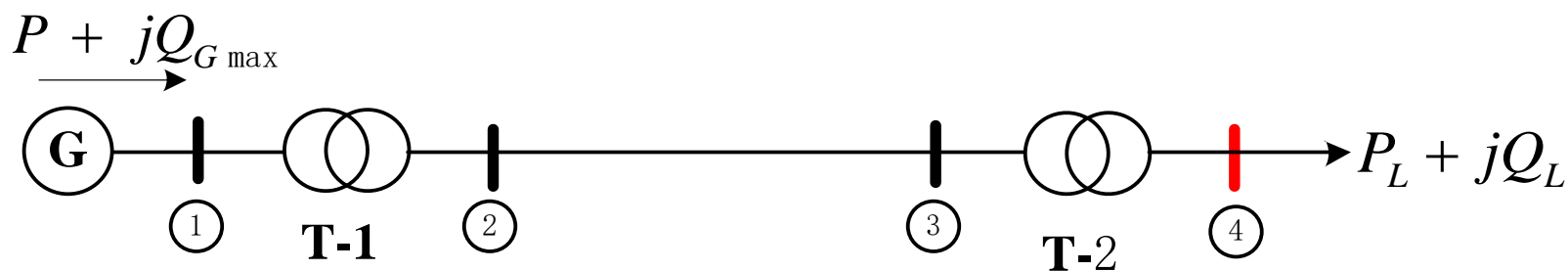
□ 若题目没有明确要求选用有载调压变，应首先考虑选用无载调压变

□ 校验步骤必不可少

3.3 电压调整的手段—改变变压器变比

■ 注意：借改变变压器变比调压的局限性

只有当系统无功电源充足时，借改变变比调压才有效。



3.3 电压调整的手段——借补偿设备调压

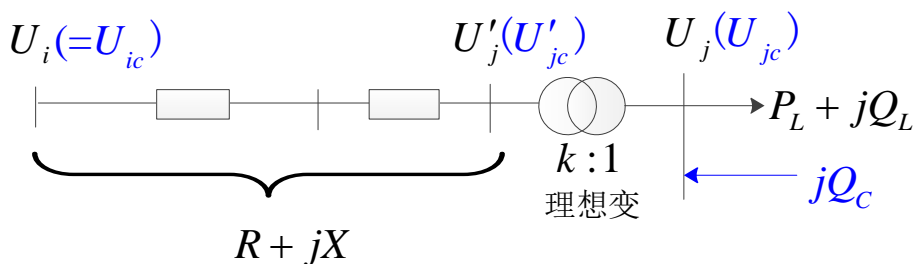
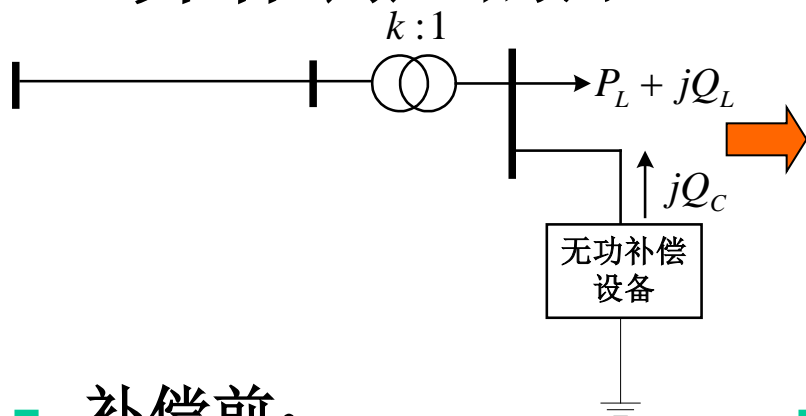
■ 调压手段之三：借补偿设备调压

——并联补偿和串联补偿

- 串联电容器补偿主要用于提高线路的输电能力和系统的稳定性
- 并联补偿：
 - 电容器
 - 调相机
 - 静止无功补偿器
 - 并补的实质：改变网络中无功功率分布，从而降低电压损耗

3.3 电压调整的手段—借补偿设备调压

■ 并补调压的原理



- 不计对地支路、不计电压降落横分量
- 补偿前后送端电压 U_i 不变

■ 补偿前：

$$U_i = U'_j + \frac{P_L R + Q_L X}{U'_j}$$

■ 补偿后：

$$U_i = U'_{jc} + \frac{P_L R + (Q_L - Q_C) X}{U'_{jc}}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{U'_{jc}}{X} \left[(U'_{jc} - U'_j) + \left(\frac{P_L R + Q_L X}{U'_{jc}} - \frac{P_L R + Q_L X}{U'_j} \right) \right] \approx \frac{U'_{jc}}{X} (U'_{jc} - U'_j)$$

$$\Rightarrow Q_C \approx \frac{k U_{jc}}{X} (k U_{jc} - U'_j) = \frac{k^2 U_{jc}}{X} \left(U_{jc} - \frac{U'_j}{k} \right)$$

(6-25)

3.3 电压调整的手段—组合调压

■ 选变比与并补组合调压的计算

□ 选变比与电容器补偿的组合调压

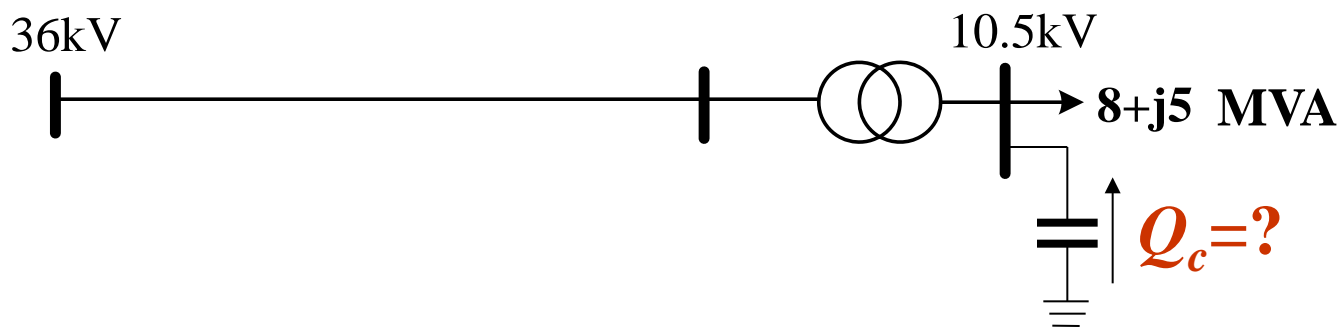
- 最小负荷时，退出全部电容，按调压要求确定变压器变比
- 最大负荷时，按调压要求计算补偿容量
- 校验选定的变比和电容器容量

□ 选变比与调相机补偿的组合调压

- 最小负荷时，调相机吸收感性无功，容量 $Q_{SC}/2$
- 最大负荷时，调相机发出感性无功，容量 Q_{SC}
- 根据调压要求，同时确定变比和调相机容量
- 校验选定的变比和调相机容量

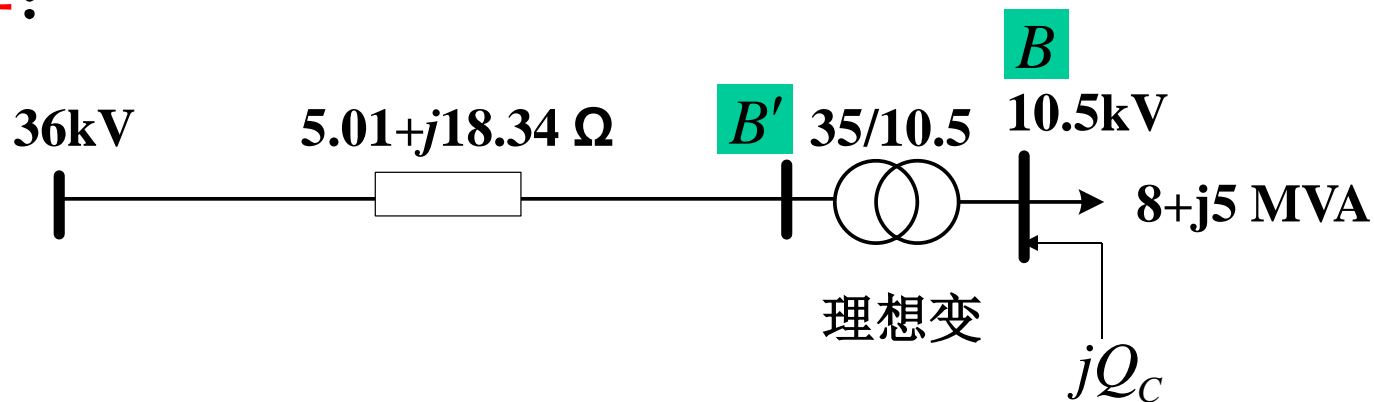
算例2：确定补偿容量

- **例2：**某变电所由35kV线路供电。变电所低压母线负荷为 $8+j5\text{MVA}$ ，线路送端母线电压为36kV，要使变电所10kV母线实现常调压，保持10.5kV，试确定电容器的补偿容量。线路和变压器的参数同例1，变比为35/10.5kV。计算时不计电压降落横分量。



算例2：确定补偿容量

■ 解：



$$U_{B'} = 36 - \frac{8 \times 5.01 + (5 - Q_C) \times 18.34}{10.5 \times \frac{35}{10.5}} = 10.5 \times \frac{35}{10.5}$$

➡ $Q_C = 5.28 \text{ MVar}$

3.3 电压调整的手段

■ 几种调压措施的比较

- 首先应考虑利用发电机调压。机端无负荷时，调节范围（95%~105%）；有机端负荷时，常采用逆调压方式。
- 借变比调压用于无功充足的系统，通常只能是采用有载调压变压器或串联加压器。
- 系统无功不足，首要问题是增加无功电源，可采用并联电容器、调相机或静止补偿器。
- 串联补偿电容器作为调压措施，因其设计、运行方面的问题很少采用。
- 为合理选择调压措施，应进行综合技术经济比较。

本章小结

- 调压和调频的比较
- 各种无功电源及其特点
- 无功负荷变动及其调整的分类
- 抑制电压波动的方法
- 中枢点调压方式
 - 逆调压、顺调压、常调压含义及其适用范围
- 调压的手段
- 基本计算
 - 变压器的变比，无功补偿设备容量的计算