

无功与电压的关系

交流电网的核心黄金铁律是：在电力传输中，无功功率（ Q ）直接控制节点电压的“幅值”（ U ），而有功功率（ P ）主要控制电压的“相位角”（ δ ）。

在 110kV/220kV 这样的大容量主干网中，变电站调节无功的首要任务就是保电压稳定，防止电网电压过高击穿绝缘或电压过低引发全网崩溃。

一、无功与电压的关系（公式推导）

在电力传输线路中，假设首端变电站电压为 U_1 ，末端变电站电压为 U_2 ，传输的有功功率为 P ，无功功率为 Q ，线路电阻为 R ，线路电抗为 X ，额定电压为 U_N 。

输电线路上的纵向电压降落 $\Delta U = U_1 - U_2$ 可以表示为：

$$\Delta U \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_N}$$

为什么在 110kV/220kV 主干网中，无功完全决定了电压？

- 在低压网（0.4kV / 10kV）中：导线相对较细，电阻 R 较大，电阻和电抗处于同一数量级（ $R \approx X$ ），所以 P 和 Q 都会显著改变电压。
- 在高压/超高压主干网（110kV / 220kV）中：导线非常粗，相间距离大，线路电抗 X 远远大于电阻 R （通常 X 是 R 的 5 到 10 倍以上，即 $X \gg R$ ）。

因为 $R \approx 0$ ，上面的电压降落公式可以简化为：

$$\Delta U \approx \frac{Q \cdot X}{U_N}$$

这个公式揭示了高压电网中无功与电压的直接对应关系：

- ΔU 几乎完全由无功功率 Q 决定：线路上流过的无功功率 Q 越多，末端电压降落 ΔU 就越大，末端母线电压 U_2 就越低。
- 向母线“注入”无功 → 电压抬高：如果在末端变电站投入电容器或 SVG 注入无功（就地满足无功需求，减少了线路上流过的无功 Q ），线路电压降 ΔU 就会变小，末端母线电压 U_2 会显著上升。

3. **从母线“吸收”无功 → 电压压低**：如果深夜电网轻载，高压电缆的电容效应导致电压过高，变电站投入电抗器吸收无功（相当于增大线路上的无功流动），末端母线电压 U_2 会被拉低。

二、举例计算说明

假设一个 220kV 变电站 B，通过一条长 50 公里的 220kV 输电线路连接到上级主网变电站 A。

- 线路参数**：假设线路总电抗 $X = 20 \Omega$ （电阻 R 忽略不计），电网额定电压 $U_N = 220 \text{ kV}$ 。

场景 1：无功不足导致变电站 B 母线电压下跌

中午用电高峰期，变电站 B 下方的工业负荷激增，需要从上级电网拉取 $Q = 110 \text{ Mvar}$ 的无功功率。

此时，线路上的电压降落为：

$$\Delta U \approx \frac{110 \text{ Mvar} \times 20 \Omega}{220 \text{ kV}} = \frac{110 \times 10^6 \times 20}{220 \times 10^3} = 10000 \text{ V} = 10 \text{ kV}$$

如果上级变电站 A 的电压维持在 220kV，那么变电站 B 的 220kV 主干母线电压就会掉到 **210kV**（偏离额定值接近 5%），可能导致电机闷车发热、继电保护误动。

场景 2：变电站 B 调节无功，拯救母线电压

变电站 B 的自动化系统发现母线电压只有 210kV 后，立刻开启站内的大型并联电容器组，就地向变电站 B 母线注入 $Q_C = 110 \text{ Mvar}$ 的无功。

- 由于变电站 B 自给自足了无功，220kV 输电线路上的无功瞬间降为 $Q_{\text{line}} = 110 - 110 = 0 \text{ Mvar}$ 。
- 此时线路上的电压降落：

$$\Delta U \approx \frac{0 \times 20}{220} = 0 \text{ kV}$$

- 变电站 B 的母线电压瞬间从 **210kV** 稳稳拉回到了 **220kV** 的标准理想值。

三、为什么高压网的首要任务是“保电压”而不是“降线损”？

1. **防止发生“电压 collapse（电压崩溃）”大停电事故** 如果高压电网无功严重不足，母线电压会持续下跌。电压越低，变电站为了维持相同的功率输出，电流就会急剧变大；电流越大，线路上的无功损耗（ $I^2 X$ ）又呈指数级暴增，进一步抢夺无功，导致电压再次剧烈下跌。这种恶性循环会在几秒钟内导致整个区域电网电压归零，引发**大面积瘫痪停电**。
2. **保护高压设备绝缘（防止过压击穿）** 深夜负荷低谷时，超高压线路自身的电容效应会产生海量无功，如果变电站不及时投入电抗器去“吃掉”这些无功，220kV 母线电压可能会被抬高到 245kV 以上，这极易击穿变电站内价值数千万元的主变压器或 GIS 开关设备。
3. **高压网电流小，线损基数本身较低** 根据 $P = \sqrt{3}UI \cos \phi$ ，高压网输电电压 U 极高，因此导线中的电流 I 相对很小。高压线路本身的 $I^2 R$ 损耗比例远低于低压配电网。因此，高压变电站的无功调度主要是**安全红线管理（防瘫痪、防击穿）**，而低压台区的无功调度才更偏向于**经济运行（降线损）**。