

无功功率及电压控制

#电力系统分析

#郭庆来

✍ 要点

- 电压偏移有何影响？
- 电压水平取决与什么？
- 无功电源有哪些？
- 大电网的电压控制有什么特点？
- 主要的电压控制措施有哪些？

电压偏移

为什么不希望有电压偏移

电压偏移是指电压和额定电压之间的偏差。电力设备是在额定电压下设计的，在额定电压下才具有最好的经济性能，因此我们希望设备尽可能工作在其额定电压附近。

用户的视角：

- 电能是用户购买的商品，而电压合格是对这一商品 **质量** 的要求
- 电压不合格，可能带来一系列问题
 - 异步电动机：电压过低，定子电流增加，导致温升，加速老化甚至烧毁电机；电压过高，可能破坏绝缘
 - 电子设备：对电压极为敏感，要求很高

电力系统的视角：

- 电压低：电能损耗大，危及稳定性
- 电压高：破坏绝缘，超高压线路电晕损耗大

电压偏移是否能够避免

- 负荷随机变化
- 风光发电间歇性

- 电网结构变化
- 大电网节点众多

这些因素导致了电压一定会在时间尺度和空间尺度上变化，而且变化的随机性大。所以电压偏移无法避免

允许的电压偏移范围

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%

电压水平取决于什么——无功平衡

- 电压水平由无功平衡水平决定
- 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。但从全系统的无功平衡来看，不能单凭发电机来提供。

- 原因1 系统中总的无功损耗 远大于 有功损耗，因此基本上需要的无功电源约为无功负荷的2倍，全部有发电机提供，那么需要的装机容量过于庞大。
- 原因2 无功不能远距离输送

无功为什么不能远距离输送？

1. 功率损耗： $\Delta P_S = \frac{P_S^2 + Q_S^2}{U_S^2} R$ ， $\Delta Q_S = \frac{P_S^2 + Q_S^2}{U_S^2} X$ ，无功输送越多，有功和无功损耗越大
2. 电压损耗： $\Delta U_S \approx \frac{Q_S X}{U_S}$ ，无功输送越多，电压损耗也越大

因此，无功平衡的要求有两个层面：

- 全系统总体的平衡（运行、规划设计）
- 局部地区的基本平衡（就地平衡，避免无功远距离输送）

所以，除了发电机外，还必须就地布置其他的无功电源以满足电压要求，称之为**无功补偿**

电力系统中的无功电源

发电机

- 发电机是电力系统中**唯一的有功电源**和**基本的无功电源**。
- 其发出无功的能力与其有功输出相关，由发电机的PQ极限曲线决定。
- 因此，在有功备用足够时，可以让负荷中心的发电机少发有功，从而增加无功输出，有利于无功的局部平衡，提升电压水平

发电机无功输出可能为正，也可能为负

- 过激（迟相）运行，此时功率因数角 $0 < \phi < 180^\circ$ ，发出无功 Q_G ，相当于无功电源
- 欠激（进相）运行，此时功率因数角 $-180^\circ < \phi < 0$ ，吸收无功 Q_G ，相当于无功负荷

同步调相机

一种特殊的同步电机，不发有功的同步发电机，或者不带有功负荷的同步电动机。

优点：

- 调节平滑（可连续调节）
- 可以作为电源或者负荷使用，能升压，能降压
- 有强励作用，故障时能提高支撑能力，有利于稳定性

缺点：

- 旋转机械设备：投资大、维护工作量大、损耗大
一般安装在枢纽变，平滑调压，提高稳定性

静电电容器

应用最多的无功补偿设备，可以在负荷侧实现就地补偿，直接抵消负荷的无功需求，从而实现就地平衡。

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：

- $Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C$ ，因此当电压下降时其无功支撑能力也急剧下降，不利于电压稳定
- 不能连续调节，每天的动作次数受限

静止无功补偿器

基于电力电子的先进无功补偿装置，可以实现快速控制，保持电压维持不变（原理是通过本地的快速连续调节，将负荷的动态无功变化补偿掉）

优点：

- 调节能力强，特性平滑，可连续调节
- 反应速度快，可以应用与暂态支撑
- 可以分相补偿
- 损耗小、维护简单

缺点：

- 最大补偿量（电容决定）还是正比于电压平方，所以电压低的时候补偿量小
- 电力电子控制，带来谐波污染问题

高压输电线的充电电容

高压输电线固有的无功补偿，当无功过剩时导致电压偏高，因此需要采取措施，一般要并联电抗器（高抗）

大电网电压控制

大电网的主要问题是：节点众多，且每个节点电压都不一样，不可能对所有节点的电压进行直接控制。技术路线上上智能通过降维的方法来处理，也就是选择一些重要的节点，作为中枢点进行控制。一个基本假设是，如果中枢节点的电压能够控制好，那么其他母线的电压也都能跟着变好。难点在于，如何找到好的中枢节点？——基于电气距离的聚类分析。

中枢点的电压控制

- 逆调压（难）
 - 最大负荷时，将电压控制在贴近上限运行
 - 最小负荷时，将电压控制在贴近下限运行
 - 主要适用于中枢点到各个负荷点远，负荷变化比较大的场景
- 顺调压（易）
 - 最大负荷时，电压贴近下限
 - 最小负荷时，电压贴近上限
 - 适用于中枢点到各负荷点近，负荷变化小的场景
- 恒调压（难易居中）
 - 不管负荷如何变化，将电压始终保持在一个数值，一般比额定电压高2 – 5%

电压控制原理

利用发电机调压

通过调节励磁电压，改变发电机无功出力，实现系统电压调整。

易于实现逆调压。但难以兼顾机端负荷和远方负荷的要求，同时多机系统，需要协调不同发电机之间的无功分配，一般需要通过复杂的考虑约束的优化模型来计算。

改变变压器分接头

改变分接头，相当于改变变比。

普通变压器：只能停电来改变分头，所以选定分头的时候需要兼顾各种不同的负荷水平，计算很复杂。

现在采用有载调压变压器，能够在不停电的情况下，根据负荷变化来在线切换分接头。

注意：分接头档位只能在无功充裕的情况下调整。调节分接头不产生无功，只是改变了无功的分布，因此在无功缺失的情况下，越调分头可能越糟糕，甚至诱发稳定性问题。

利用无功补偿控制电压

并联补偿：主要是直接补偿负荷的无功需求，减少线路上的无功流动，从而达到调压的目的

串联补偿：主要是改变线路的电抗 X ，从而减少电压降落