

无功补偿装置

作者：程艳磊

链接：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/684289955>

来源：知乎

著作权归作者所有。商业转载请联系作者获得授权，非商业转载请注明出处。

一、基础知识

（一）有功功率

有功功率（active power），是指在交流电路中一个周期内发出或负载消耗的瞬时功率的积分的平均值（或负载电阻所消耗的功率），也称平均功率，用符号 P 表示。

《GB/T 2900.1-2008 电工术语 基本术语》对有功功率的定义为：在周期状态下，瞬时功率 p 在一个周期 T 内的平均值。

在国际单位制（SI）中，有功功率的单位为瓦特（W，简称瓦），常用单位还有毫瓦（mW）、千瓦（kW）、兆瓦（MW）等。

瞬时电压为 $u(t)$ ，瞬时电流为 $i(t)$ ，瞬时功率为 $p(t)$ ，计算公式如下：

$$p(t) = u(t)i(t)。$$

有功功率为 P ，计算公式如下：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt。$$

对于交流电， T 为交流电的周期，对于直流电， T 可取任意值。

对于正弦交流电，经过积分运算可得：

$$P = UI \cos \varphi。$$

上式中， U 、 I 分别为正弦交流电的有效值， φ 为电压与电流的相位差。

正弦交流电路中，三相对称条件下，其三相电瞬时功率是恒定值，根据有功功率的定义，三相电有功功率等于三相电瞬时功率。

$$P = 3U_N I \cos \varphi \text{ 或 } P = \sqrt{3}U_L I \cos \varphi。$$

上式中， U_N 为相电压， U_L 为线电压。

（二）无功功率

无功功率（reactive power），是指在具有储能元件（电感或电容）的电路中，储能元件在半周期的时间里把电源能量变成磁场（或电场）能量储存，在另半周期的时间里再将磁场（或电场）能量释放给电源，这部分能量只是在储能元件与电源之间进行能量交换，并没有真正被消耗，能量交换的幅值称为无功功率，用符号 Q 表示。

《GB/T 2900.1-2008 电工术语 基本术语》对无功功率的定义为：对于正弦状态下线性二端元件或二端电路，其量值等于视在功率 S 和（端子间电压对电流的）相位移角 ϕ 的正弦之乘积的量。无功功率的绝对值等于非有功功率。

在国际单位制（SI）中，无功功率的单位为伏安（VA），在 IEC60027-1 中给出了无功功率的专用单位名称“乏”和符号 var，常用单位还有毫乏（mvar）、千乏（kvar）、兆乏（Mvar）等。

无功功率的计算公式如下：

$$Q = S \sin \varphi。$$

上式中， S 为视在功率， ϕ 为电压与电流的相位差。

在非正弦电路中，无功功率的定义有所改变，将基波和谐波电压、电流相位差引起的无功功率定义为位移无功功率，将由不同频率成分电压和电流引起的无功功率定义为畸变无功功率，而将两者的方和根称为广义无功功率。

（三）视在功率

视在功率（apparent power），也称表现功率，是指单口网络端钮电压和电流有效值的乘积，用符号 S 表示。

《GB/T2900.1-2008 电工术语 基本术语》对视在功率定义为：二端元件或二端电路端子间电压的方均根值 U 与该元件或电路中的电流的方均根值 I 的乘积。在正弦状态下，视在功率是复功率的模。

在国际单位制（SI）中，视在功率的单位为伏安（VA），常用单位还有千伏安（kVA）。

视在功率的计算公式如下：

$$S = UI。$$

上式中，U、I 分别为正弦交流电的有效值。

视在功率等于网络端钮处电流、电压有效值的乘积，有效值能客观地反映正弦量的大小和他的做功能力，因此，这两个量的乘积反映了为确保网络能正常工作，外电路需传给网络的能量或该网络的容量。

由于网络中既存在电阻这样的耗能元件，又存在电感、电容这样的储能元件，所以，外电路不仅需提供其正常工作消耗的功率（有功功率），同时应有一部分能量被贮存在电感、电容等元件中（无功功率），这样网络或设备才能正常工作。

因此，在实际中，通常用额定电压和额定电流来设计和使用用电设备，用视在功率来标示它的容量。

（四）功率因数

功率因数（Power Factor，简称 PF），是指有功功率和视在功率的比值，用符号 λ 表示。功率因数与位移因数两个概念容易被混淆，在正弦电路中，功率因数等于位移因数 $\cos \phi$ ，因此，很多人误认为 $\cos \phi$ 就是功率因数。在非正弦电路中，功率因数与位移因数有不同的物理意义，两者有本质的区别。

《GB/T 2900.1-2008 电工术语 基本术语》对功率因数的定义为：在周期状态下，有功功率 P 的绝对值与视在功率 S 的比值。取值范围为：0~1。

功率因数的计算公式如下：

$$\lambda = \frac{|P|}{S}。$$

上式中，P 为有功功率，S 为视在功率。

在 IEC60375 标准中，功率因数 $PF=P/S$ ，正负号由有功功率的方向决定。有功功率为正值，表示消耗有功功率；有功功率为负值，表示输出有功功率。依此标准，功率因数的取值范围为：-1~+1。

(五) 有功功率、无功功率及视在功率的关系

在正弦交流电中，有功功率、无功功率、实在功率的计算公式分别为：

$$P = UI \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi, \quad S = UI。$$

因此，在正弦交流电路中，下式成立：

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \lambda = \cos \varphi。$$

可见，在正弦电流电路中，有功功率、无功功率和视在功率三者之间是一个直角三角形的关系。

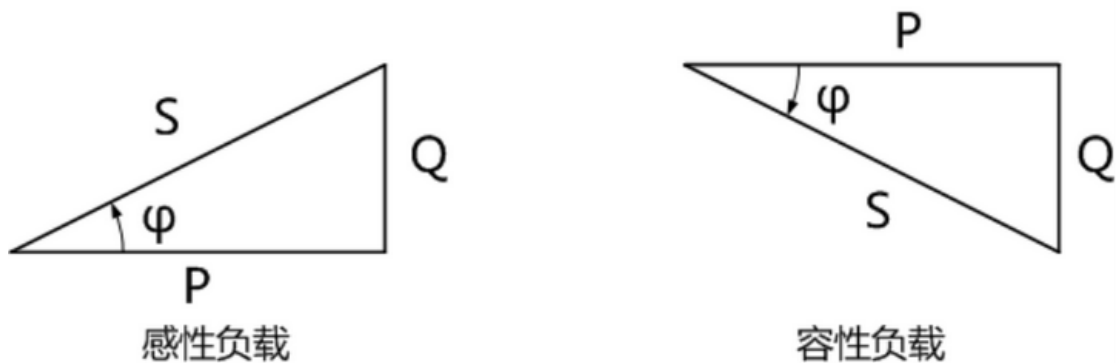


图 2.4.4-1 有功功率、无功功率和视在功率关系图

若用视在功率 \tilde{S} 表示复功率，则有功功率 P 为复功率的实部，无功功率 Q 为复功率的虚部，视在功率 S 为复功率的模。

若将电压相量与电流相量的共轭复数的乘积用复功率表示，其表达式为：

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = UI \angle \varphi_u - \varphi_i。$$

$$\tilde{S} = UI \cos(\varphi_u - \varphi_i) + jUI \sin(\varphi_u - \varphi_i)。$$

$$\tilde{S} = P + jQ。$$

(六) 有功功率和无功功率的几何表示

以电流矢量 I 为参考矢量（取向右为正方向），电压矢量 U 随相位角 ϕ 改变方向，电压 U 和电流 I 的相位角 ϕ 在数学意义上取正（逆时针方向），有功功率和无功功率的几何表示，如下图所示：

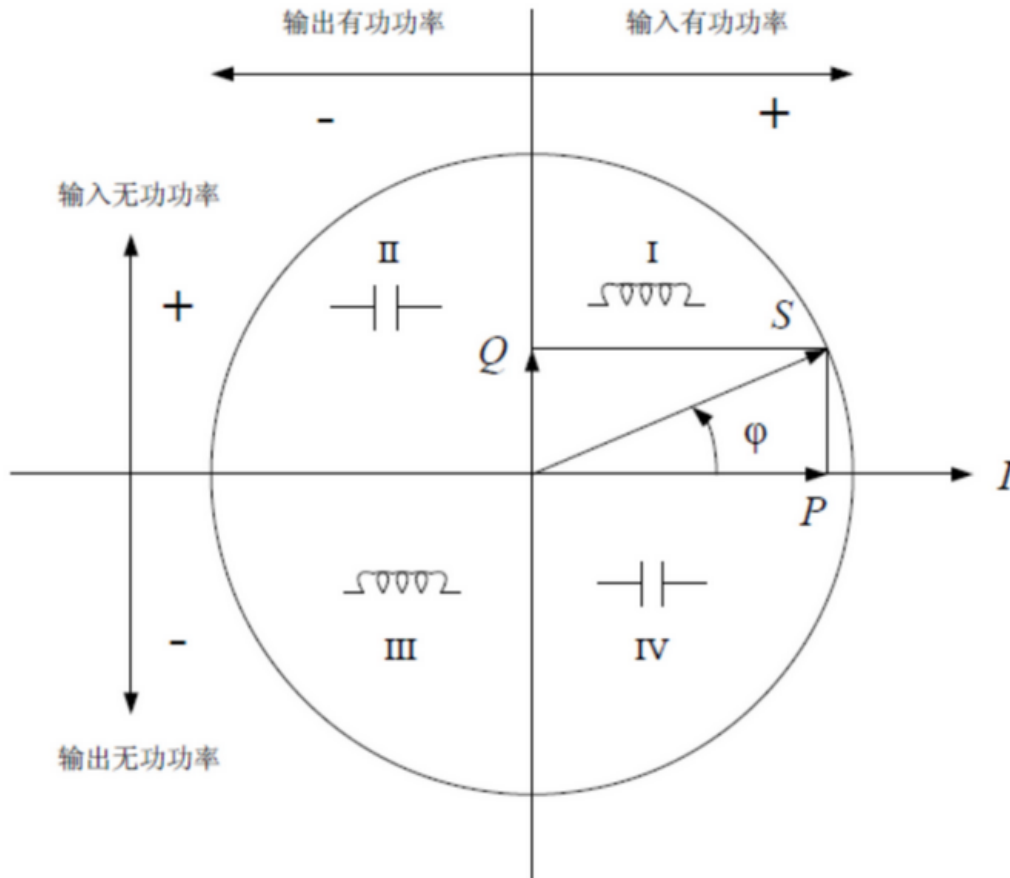


图 2.4.4-2 有功功率和无功功率四象限示意图

在四个象限内，有功功率和无功功率的正负号不同，含义也不同。

第一象限，输入无功功率为正，输入有功功率为正，可用 $L+$ 表示，为感性负载；

第二象限，输入无功功率为正，输入有功功率为负，可用 $C+$ 表示，为容性电源；

第三象限，输入无功功率为负，输入有功功率为负，可用 $L-$ 表示，为感性电源；

第四象限，输入无功功率为负，输入有功功率为正，可用 $C-$ 表示，为容性负载。

二、无功补偿的意义

电力系统中的很多电气设备（如变压器、电动机等），属于既有电感又有电阻的感性负载，不但要从电网取得有功功率，同时还需要从电网取得无功功率，如果电网中的无功功率过低，这些电气设备就没有足够的无功来建立正常的电磁场，不能维持在额定情况下工作，设备的端电压就要下降，从而影响设备的正常运行。

提供无功功率有两条途径：一是由输配电系统提供；二是由补偿装置提供。当输配电系统提供的无功不能满足要求，或用户为了提高功率因数以保证设备安全经济运行，需要设置无功补偿装置，这就是我们所说的无功功率补偿。

无功补偿的效益，主要包括以下几个方面：

（1）提高供电能力

对于配电变压器，由 $P=S \cdot \cos \phi$ 可知，在容量一定的情况下，如果功率因数提高，则有功功率随之增大，变压器的有功出力也就提高了。例如一台容量为 1000kVA 的变压器，当 $\cos \phi = 0.6$ 时，输出有功负荷的能力为 600kW；当 $\cos \phi = 0.9$ 时，输出有功负荷的能力为 900kW。可见，提高功率因数，即提高变压器的利用率，因此，为了充分发挥配电变压器的供电能力，尽量在变电端补偿无功。

对于输配电线路，在导线截面积一定的情况下，输送的经济电流为定值。合理加装无功补偿装置，提高功率因数后，可大幅减少线路中的无功电流，线路上“释放”出来空间可承载更多有功电流，也就是说，同样长度的线路，可以输送的有功功率增大，即增加了负荷距，可以节省新建线路投资。

（2）改善电压质量

线路上的电压损失 ΔU ，计算公式如下：

$$\Delta U = (P \times R + Q \times X_L) / U_e \times 10.$$

上式中， ΔU 为线路上的电压损失，单位是 kV；R 为线路总电阻，单位是 Ω ； X_L 为线路感抗，单位是 Ω ； U_e 为额定电压，单位是 kV；有功功率 P 的单位是 MW；无功功率 Q 的单位是 Mvar。

由上式可知，线路上的无功功率 Q 减少，电压损失 ΔU 也随之减少。

（3）降低电网的功率损耗和电能损失

负荷电流在通过线路、变压器时会产出功率损耗和电能损失，由公式 $P=3UnI\cos\phi$ 可知，在输送有功功率一定的情况下，电流与功率因数成反比，即功率因数越高，负荷电流就越小，从而是线路损耗减低。安装无功补偿装置的主要目的，就是降低电网的功率损耗，当负荷的功率因数由 0.7 提高到 0.9 时，线损可降低 39.5%。

(4) 无功补偿还有减少设备容量，节省电网投资，减少用户电费支出，降低生产成本等作用。

三、无功补偿的容量计算

合理地选择无功补偿装置，可以最大限度地降低线损、提高电能质量。反之，选择或使用不当，则可能造成电网电压波动、谐波增大等不利影响。无功补偿的容量选择，有以下几种计算方式。

合理地选择无功补偿装置，可以最大限度地降低线损、提高电能质量。反之，选择或使用不当，则可能造成电网电压波动、谐波增大等不利影响。无功补偿的容量选择，有以下几种计算方式。

1. 按提高功率因数数值确定补偿容量

若设备最大负荷的有功功率为 P_{max} ，补偿前的功率因数为 $\cos\phi_1$ ，补偿后功率因数 $\cos\phi_2$ ，补偿所需电容器的容量计算公式如下：

$$Q_c = P_{max} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_2} - 1} \right)$$

上式中，有功功率 P_{max} 的单位是 kW；补偿容量 Q_c 的单位是 kvar。

2. 按提高电压值确定补偿容量

补偿容量 Q_c 计算公式如下：

$$Q_c = \Delta U \cdot U_2 / X \cdot \cdot (\text{kvar})$$

上式中，需要提高的电压值 ΔU ，单位是 kV；目标电压值 U_2 ，单位是 kV；线路电抗 X ，单位是 Ω 。

3. 按感应电动机空载电流值确定补偿容量

电动机的无功补偿一般采用就地补偿方式，电容器随电机的运行和停止投退，容量以不超过电机空载的无功补偿，计算公式如下：

$$Q_C = \sqrt{3}U_e I_0 \cdot \cdot \text{(kvar)} .$$

上式中，电动机额定电压 U_e 的单位是 kV，电动机空载电流 I_0 的单位是 A。

4. 按配电变压器的容量确定补偿容量

配电变压器低压侧安装电容器时，应考虑在轻负载情况下，防止向 10kV 配电网倒送无功，以取得最大的节能效果，计算公式如下：

$$Q_C = (0.1 - 0.3) \times S_n \cdot \cdot \text{(kvar)} .$$

上式中， S_n 为配电变压器的容量，单位是 kVA。

四、无功补偿的配置原则

电力系统无功补偿的原则是“统一规划、分级补偿、就地平衡”，降损与调压相结合，以减损为主；集中补偿与分散补偿相结合，以分散补偿为主；高压补偿与低压补偿相结合，以低压补偿为主。按拓扑层级，补偿方式可分为集中补偿、分散补偿、就地补偿。国家电网公司《Q/GDW 10212-2019 电力系统无功补偿技术导则》，规定了 750kV 及以下电压等级交流电力系统无功补偿装置的总体技术要求，包括基本原则、补偿装置适用原则、变电站及配电网无功补偿、电源侧无功补偿、电力用户无功补偿。

1. 变电站的无功补偿配置

变电站应采用集中方式配置补偿装置，主要补偿变电站和线路的无功功率，稳定电压，以及补充分散补偿和就地补偿后的剩余无功。

330kV 及以上变电站，容性补偿容量宜按照主变压器容量的 10%~20%配置。

220kV 变电站，补偿容量宜按照主变压器容量的 15%~25%配置。

35~110kV 变电站，补偿容量宜按照主变压器容量的 15%~30%配置。

10（20）kV 及以下电压等级，补偿容量按照配电变压器容量的 10%~30%进行配置。

2. 配电网的无功补偿配置

配电网应采用分散补偿，以降损为主，补偿容量一般按线路上配电变压器总容量的 7%~10%配置（或经计算确定）。配电网的电能损耗占电网的 65%以上，因此，全网补偿容量的 70%应装设在配电网，电网补偿与用户补偿相结合。

对于负载分布比较均匀的配电线路，装设一组电容器时，安装位置应位于线路长度的 2/3 处；装设两组电容器时，安装位置应分别位于线路长度的 2/5 和 4/5 处。

对于负载分布不均匀的配电线路，安装位置应位于线路长度的 3/5~2/3 之间。

对于负载集中于末端的配电线路，应由电力用户进行补偿。

3. 电力用户的无功补偿配置

容量为 100kVA 及以上的配电变压器，应在 0.4kV 侧配置集中无功补偿装置。在容量为 100kVA 及以上的相对集中负荷点宜配置分散无功补偿装置；供电距离 250 米及以上，单机功率为 75kW 及以上的大功率电动设备宜配置就地动态无功补偿装置。

按接线方式，无功补偿可分为三相共补、分相补偿、混合补偿。

对于三相负荷平衡电力用户，应采用三相三线制三相共同补偿。

对于三相负荷不平衡电力用户，应采用三相四线制对不平衡部分容量进行分相补偿。

对于部分三相负荷不平衡电力用户，宜采用混合补偿方式，即：采用三相四线制和三相三线制分别对不平衡部分容量进行分相补偿；对平衡部分容量进行三相三线制补偿；当不平衡部分容量不确定时，宜采用 30%分相补偿，70%三相共同补偿。

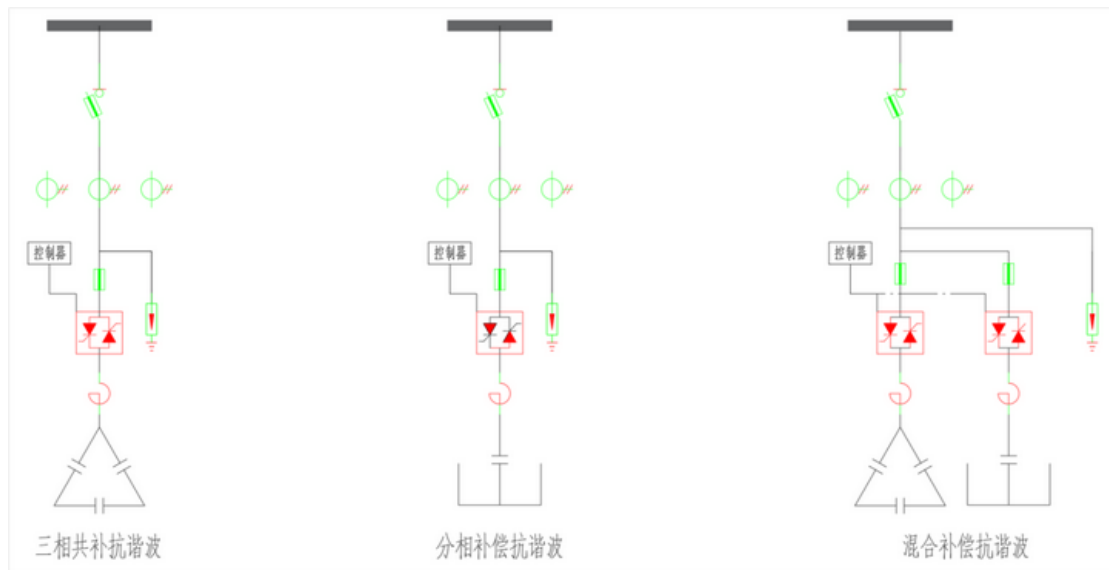


图 2.4.4-3 抗谐波型三相共补、分相补偿、混合补偿接线图

五、无功补偿的装置类型

无功补偿装置（reactive compensation equipment），是指安装于电力系统（包括发电、输电、变电、配电、用电各环节）用于补偿、平衡无功功率的装置总称，包括并联电容器装置、并联电抗器装置、同步调相机和静止无功补偿装置等。

1. 按使用场所，可分为：

1) 户内型装置；

2) 户外型装置。

2. 按安装位置，可分为：

1) 集中补偿装置；

2) 分组补偿装置；

3) 末端补偿装置。

3. 按补偿相数，可分为：

1) 单相补偿装置；

2) 相间补偿装置；

3) 三相补偿装置；

4) 混合补偿装置（以上三种方式中两种或两种以上混合补偿）。

4. 按投切电容器的元件类型，可分为：

1) 机电开关（如：交流接触器）；

2) 半导体电子开关（如：晶闸管）；

3) 复合开关（半导体电子开关和机电开关并联的组合物，微处理器 MCU 控制+磁保持继电器）。

5. 按有无抑制谐波或滤波功能，可分为：

1) 无抑制谐波或滤波功能；

2) 有抑制谐波功能：装置投入运行不能使系统谐波含量增加，投入电容器的工作电流应不超过电容器的额定电流；

3) 有滤波功能：装置投入运行使系统谐波含量减少。

并联电容装置，是指由并联电容器和相应的一次及二次配套设备组成，并联连接与三相交流电力系统中，能独立完成投运的一套设备。

静止无功补偿装置，是指静止无功补偿器（SVC）和静止无功发生器（SVG）的总称。有静止元件构成的并联可控可调无功功率补偿装置，通过改变其容性或（和）感性等效阻抗来快速准确地调节无功功率，维持系统电压稳定。静止无功补偿器包括晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）、晶闸管控制变压器（TCT）、晶闸管投切电抗器（TSR）、磁控电抗器型高压静止无功补偿装置（MSVC）等。

无功补偿装置应优先考虑采用投资省、损耗小、可分组投切的并联电容器和并联电抗器。为满足系统稳定和电能质量要求能需装设静止无功补偿器或静止无功发生器时，应通过经济技术及环境等综合比较确定。

（一）低压成套无功补偿装置

低压无功补偿装置用于低压电网的无功功率补偿，以提高电网功率因数，降低线路损耗，改善电能质量。

低压无功补偿柜以智能型无功功率控制器为核心，利用电容器专用接触器、无功功率调节器、复合开关等作为电容器组的投切器件，根据电网功率因数自动投切电容，确保电网始终具有较高的功率因数。低压无功补偿装置的补偿元件为电容器，对于谐波较高的场合，可采用电容器串联电抗器，抑制电容器的谐波电流或通过串联谐振进行滤波。



主要技术参数:

额定电压: 400V, 690V

额定频率: 50Hz

额定补偿容量: 30~1000kvar

运行电压范围: 0.8~1.1Un

电容器接线方式: “ Δ ” 或 “Y”

测量误差: 电压: $\pm 0.5\%$; 电流: $\pm 1.0\%$; 无功: $\pm 1.0\%$ 。

投切方式: 自动循环投切、可编程投切、分相投切等方式

投切延时: 0~60 秒, 可调

最大允许过电流: 1.30 倍额定电流

控制路数: 1~12

功率因数: 0.9~0.98(可调)

电抗器电抗率选用: 5.5%、6%、7%、12%、13%、14%等规格, 根据电网谐波状况或根据用户要求确定。

(二) 智能组合式低电压并联电容器

智能组合式低电压并联电容器(简称智能电容器), 是由智能测控单元、智能型过零投切继电器、智能保护单元、两台(Δ 型)或一台(Y型)低压自愈式电力电容器组成一个独立完整的智能补偿单元。

替代由智能无功控制器、熔丝(或微断)、晶闸管复合开关(或接触器)、热继电器、指示灯、低压电力电容器多种分散期间组装而成的自动无功补偿装置。既可单台使用, 也可多台组网构成补偿系统使用; 既可三相补偿, 也可三相和分相混合补偿。



主要技术参数:

(1) 环境条件

环境温度: 普通型-25~40℃, 抗谐型-25~55℃;

相对湿度: 30%~90%RH;

海拔高度: ≤2000m。

(2) 电源条件

额定电压：220V/380V；

电压偏差：±20%；

电压波形：正弦波，总畸变率不大于 5%；

工频频率：50Hz±5% ；

功率消耗：<0.2W/1kvar。

(3) 测量误差

电压：≤±0.2%； 电流：≤±0.2%，≤0.5%； 功率因数：±1%； 温度：±1℃。

(4) 保护误差

电压：≤0.5%； 电流：≤0.5%； 温度：±1℃(电容器)； 时间：±0.1s。

(5) 无功补偿参数

电容器投切间隔：>10s；

无功容量：单台≤三相(30+30)kvar，分相 30kvar； 联机≤30 台。

(6) 可靠性参数

控制准确率：100%； 投切允许次数：100 万次；

电容器容量运行时间衰减率：≤2%/年。

(7) 执行标准

GB/T 15576-2020 低压成套无功功率补偿装置

(三) 低压无功自动补偿控制器

低压无功自动补偿控制器（简称控制器），采用液晶菜单操作模式，实现人机交互，适用于低压配电监测和共补、分补兼顾的无功补偿。



采用 ASIC 处理芯片，通过 FFT(快速傅立叶计算)对采集的三相电压和三相电流进行计算和电能质量分析，以无功功率作为依据，并结合功率因数，可按循环、编码或任意值组合，进行对单相或三相电容的匹配或投切。