

# 中频炉专用 无功补偿-谐波治理装置

项目负责人：张金刚（15091099983）

公司名称：西安德昌机电科技有限公司

公司地址：陕西西安市藺高工业园沔惠路 17 号

TEL/ FAX: 029-84527288

[HTTP://www.dczpl.com](http://www.dczpl.com)

[E-mail:15091099983@163.com](mailto:15091099983@163.com)

## 一、电能质量参数定义及计算方法

### 1. 谐波

谐波是指电流中所含有的频率为基波的整数倍的电量，一般是指对周期性的非正弦电量进行傅里叶级数分解，其余大于基波频率的电流产生的电量。从广义上讲，由于交流电网有效分量为工频单一频率，因此任何与工频频率不同的成分都可以称之为谐波，这时“谐波”这个词的意义已经变得与原意有些不符。正是因为广义的谐波概念，才有了“分数谐波”、“间谐波”、“次谐波”等等说法。

产生的原因：由于正弦电压加于非线性负载，基波电流发生畸变产生谐波。主要非线性负载有 UPS、开关电源、整流器、变频器、逆变器等。

谐波的几个重大危害：

- (1) 谐波使公用电网中的元件产生了附加的谐波损耗，降低了发电、输电及用电设备的效率，大量的 3 次谐波流过中性线时会使线路过热甚至发生火灾；
- (2) 谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波对电机的影响除引起附加损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，使变压器局部严重过热。谐波使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短，以至损坏；
- (3) 谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，这就使上述(1)和(2)的危害大大增加，甚至引起严重事故；
- (4) 谐波会导致继电保护和自动装置的误动作，并会使电气测量仪表计量不准确；
- (5) 谐波会对邻近的通信系统产生干扰，轻者产生噪声，降低通信质量；重者导致数据丢失，使通信系统无法正常工作。

### 2. 功率因数

在交流电路中，电压与电流之间的相位差( $\Phi$ )的余弦叫做功率因数，用符号  $\cos \Phi$  表示，在数值上，功率因数是有功功率和视在功率的比值，即  $\cos \Phi = P/S$ 。其中，P 表示有功功率，S 表示视在功率。视在功率 S 又可用下式表示：

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

式中 Q 表示无功功率。

### 3. 电压偏差

电压偏差是指电力系统正常运行的电压偏移，其计算公式如下：

$$\text{电压偏差 (\%)} = \frac{\text{实测电压} - \text{标称系统电压}}{\text{标称系统电压}} \times 100\%$$

### 4. 三相电压不平衡度

指三相电力系统中三相不平衡的程度用电压或电流负序分量与正序分量的方均根值百分比表示。电压或电流不平衡度分别用  $e_U$  或  $e_I$  表示。其表达式为：

$$e_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\%$$

式中： $U_1$ ——三相电压的正序分量方均根值，V；

$U_2$ ——三相电压的负序分量方均根值，V。

如将式  $U_1$ ， $U_2$  中换为  $I_1$ ， $I_2$ ，则为相应的电流不平衡度  $e_I$  的表达式。

### 5. 电压波动和闪变

电压波动是指电压方均根值一系列的变动或连续的改变。

闪变指灯光照度不稳定造成的视感。

## 二、无功补偿-谐波治理的意义

随着现代电力电子技术的快速发展，用电设备和电网之间存在大量无功往复交往，无功的存在使电网的利用率降低；大量功率开关器件的使用产生了大量高次谐波，降低了电网电能质量，影响其他同母线用电设备的正常使用。

采用无功补偿-谐波治理具有如下意义：

### I 提高功率因数

对无功功率进行快速跟踪补偿，用容性无功电流抵消负荷产生的感性无功电流，减少无功电流在用电设备和电网之间的往复，提高 PCC 点(考核点)的功率因数。

### I 提高供配电系统的利用率

用电设备和电网之间存在的大量往复交换的无功功率占用了电网的许多容量，使得配电设备的利用率降低。“无功补偿-谐波治理”装置可以减少配电设备提供的无功功率，使得配电设备提供的有功容量接近设备的使用容量。从另外一个角度看，即提高了配电设备的带负荷能力（相当于增容）。

### I 稳定网压，改善运行条件

配网电压波动主要由无功功率的变化引起的，采用“无功补偿-谐波治理”装置对无功功率进行就地补偿，减少负荷侧的无功波动，即可以减少配网母线的电压波动，有利于同母线精密设备的安全稳定运行。

### I 滤除谐波，净化电网

采用“无功补偿-谐波治理”装置对无功功率进行补偿的同时，并针对 3 次、5 次、7 次、11 次、13 次谐波电流分别设计滤波器，滤波器对 3 次、5 次、7 次、11 次、13 次谐波电流呈低阻抗，由负载产生的谐波电流流入专门设计的滤波器（被滤除），使流入变压器的谐波电流及电压畸变率满足国标 GB/T14549-93 的要求，从而达到净化电网，提高电网电能质量的目的。

### I 自动补偿，实现无人值守

“无功补偿-谐波治理”装置为自动补偿装置，通过检测负荷无功电流和系统电压综合判断需要投入的无功补偿容量，不需要人工干预，适合于无人值守变电站。

### I 降低供配电损耗，获得节能效益

采用“无功补偿-谐波治理”装置对无功功率进行补偿的同时进行谐波治理，由于功率因数的提高，使变压器及供配电线路中的视在电流下降，降低了供配电损耗；由于高、

中频电流的趋肤效应，使供配电线路及变压器铁芯的等效截面积减小，加大了供配电系统的阻抗，谐波电流被滤除，降低了高频电流的趋肤效应，从而降低了供配电损耗。损耗的降低给用户带来了节能效益。

根据水利电力部《功率因数调整电费办法》，功率因数的提高可以减少用户功率因数调整电费或者获得功率因数调整电费奖励，取得直接的经济效益；治理谐波可以减少设备故障率，提高设备利用率，提高生产效率，获得间接的经济效益。

### 电力系统电压和无功电力管理条例

#### 第四章 电力用户的功率因数及无功补偿设备的管理

**第十二条** 用户在供电局规定的电网高峰负荷时功率因数，应达到下列规定：

- (1) 高压供电的工业用户和高压供电装有带负荷调整电压装置的电力用户功率因数为0.90及以上；
- (2) 其他100kVA(kW)及以上电力用户和大、中型电力排灌站功率因数为0.85及以上；
- (3) 趸售和农业用电功率因数为0.80及以上。

凡功率因数未达到上述规定的新用户，供电局可拒绝接电。

**第十四条** 为调动用户改善电压，管好无功设备的积极性，凡受电容量在100kVA(kW)及以上的用户均应按国家批准的《功率因数调整电费办法》的有关规定，实行功率因数考核和电费调整。

## I 减小变压器温升和损耗

变压器的温升与流过变压器的视在电流成正比，变压器的损耗与流过变压器的视在电流的平方成正比。采用“无功补偿-谐波治理”装置补偿和滤波可以使流过变压器的视在电流降低，因此可以减小变压器的发热和损耗，延长变压器的使用寿命。

### 三、无功补偿与谐波治理的关系

无功补偿主要用于补偿系统无功功率，谐波治理主要用于净化电网谐波污染，虽然二者分属不同的领域和研究方向，但他们之间的紧密联系以体现在实际应用的各个方面。总结来说主要有以下几点原因：

- a) 谐波治理属改善电能质量的范畴，无功补偿同样可以改善供电系统的电压质量，因此在电能质量领域二者有此紧密联系。
- b) 在无谐波的情况下，无功功率有其固定的概念和定义，而在含有谐波的情况下，无功功率的定义和谐波有密切的关系，谐波除其本身的问题外，也影响负载和电网的无功功率，谐波功率不产生任何效益，也可认为是“无功”功率。
- c) 产生谐波的装置同时也大都是消耗基波无功功率的装置。
- d) 目前为止谐波治理装置大都是补偿基波无功功率的装置，如广泛应用于各领域的 LC 滤波器。

正因此，谐波治理和无功补偿在实际应用领域经常被提在一起。

### 四、无功补偿装置与谐波治理装置的现状

介于无功补偿和谐波治理在生活生产中的现实意义，国内外在无功补偿和谐波治理装置的研究方面作了大量的工作。无功补偿装置从最早期的同步调相机补偿，到如今广泛应用的电力电容器补偿，再到结合现代电力电子技术的各种静止补偿装置，谐波治理装置从广泛应用的 LC 滤波器到基于电力电子技术和现代控制技术的有源电力滤波器（APF），都经历几代的变迁和技术的飞跃。

#### （1）无功补偿装置的类型和特点

无功补偿装置种类繁多，随着时代和技术的发展主要经历了以下几种：同步调相机、电力电容器和并联电抗器、静止补偿器等。相对于旋转机械的同步调相机而言，后三种可称为静止设备。

- a) 同步调相机实际上是一台空载运行的同步电动机，在过励磁时可发出无功功率，欠励磁时可以吸收无功功率，调节均匀简单，其自动励磁调节装置能使同步调相机在端电

压波动时自动调节无功功率，维持电压及系统的稳定，适用于大型变电站所进行集中补偿，其缺点是投资大，功率损耗大，动态响应的时间也较长，因为是旋转设备运行维护工作量也较大。总体上来说，这种补偿手段已显陈旧，已有逐渐被取代的趋势。

b) 电力电容器能够补偿负荷感性无功以提高功率因数，故又称为移相电容器，它常并接于 6.3、10.5 或 35KV 母线上，故又称为并联电容器，在电力系统常用的无功功率补偿设备中并联电容器的费用最低，有功功率损耗最小，运行维护最简便，可集中安装，也可分散安装在用户处或近负荷中心的地点，实现无功的就地补偿，因此应用广泛。它的主要缺点是电压调节效应差，并且不能像同步调相机那样连续调节无功功率和吸收滞后的无功功率，在系统中含有谐波时还有可能与系统发生并联谐振，使谐波放大。

在实际应用领域并联电容器补偿装置按电压等级可分为低压补偿装置和高压补偿装置，按投切方式可分为自动投切补偿装置和手动投切补偿装置，按响应速度可分为动态补偿装置和静态补偿装置，按补偿方式还可分为集中补偿、分散补偿和就地补偿。

c) 并联电抗器并接于系统输电线路，用于吸收高压电力网过剩的无功功率和远距离输电线路的参数补偿。含有超高压架空线路和高压电缆的电力网中，轻负荷运行时各线路分布电容产生的无功功率大于线路电抗中消耗的无功功率，因此会出现无功功率过剩现象，利用并联电抗器可以就近吸收线路的无功功率，防止电力网电压过高。

d) 静止补偿装置是近年来随着大功率可控型电力电子开关的发展而发展起来的，是柔性交流输电系统的重要组成部分。静止无功补偿装置(SVC)，广泛应用于输电系统波阻抗补偿及长距离输电的分段补偿，也大量应用于负载无功补偿。其典型代表是晶闸管控制电抗器+固定电容器(TCR+FC)，静止无功补偿装置的重要特性是它能连续调节补偿装置的无功功率，这种连续调节是依靠调节 TCR 中晶闸管的触发延迟角实现的。另外一种常见的 SVC 形式是晶闸管投切电容器(TSC)，但它只能分组投切，不能连续调节，只有和 TCR 配合使用才能实现补偿装置整体无功功率的连续调节。SVC 的调节连续且响应迅速，因此可以对无功功率进行动态补偿，使补偿点的电压接近维持不变，是目前同步调相机的主要替代

方案。比 SVC 更先进的现代补偿装置是静止无功发生器（SVG），它也是一种电力电子装置，其最基本的电路是三相桥式电压型或电流型变流电路，目前使用的主要是电压型。SVG 在其直流侧只需较小容量的电容器维持其电压即可，通过不同控制可使其发出无功功率也可吸收无功功率，采用 PWM 控制，可使其输入电流接近正弦波。

## 五、谐波治理装置的类型和特点

解决电力系统的谐波污染问题主要有**两点解决思路**，一是抑制谐波的产生，对电力电子装置进行改造使其不产生谐波，这是从根本上解决谐波问题的途径，但也只适用于作为主要谐波源的电力电子装置；另一条就是装设谐波治理装置滤除谐波。这是目前普遍可行也应用广泛解决方法。

装设谐波治理装置最传统的方法就是采用 LC 无源调谐滤波器，其原理是利用滤波电抗器（L）和滤波电容器（C）和滤波电阻器（R）组成调谐支路，给特征谐波形成公用电网之外的低阻抗通路，使流入公用电网的谐波满足相应要求，这种方法治理谐波简单可靠，滤除谐波的同时还能补偿基波无功功率，结构简单，综合计算起来投资少、维护简便，是目前应用最广泛的谐波治理装置。这种方法主要的缺点是治理效果受电网运行方式和阻抗影响较大，参数设置不正确易与系统发生并联谐振，导致谐波放大甚至滤波器过载烧毁。

谐波治理装置的另一个发展趋势是有源电力滤波器（APF），有源电力滤波器也是一种电力电子装置，其基本原理是先从需治理的线路中检测出谐波电流，然后由滤波器产生一个与检测的谐波电流大小相等极性相反的电流与线路中的谐波电流叠加，从而使电网电流只含基波分量。

与无源滤波器相比，APF 具有高度可控性和快速响应性，其具体特点如下：

- a) 不仅能补偿各次谐波，还可抑制闪变、补偿无功，有一机多能的特点，在性价比上较为合理；
- b) 滤波特性不受系统阻抗的影响，可消除与系统阻抗发生谐振的危险；



c) 具有自适应功能，可自动跟踪补偿变化着的谐波。

有源滤波器这种优异的治理效果，目前已得到广泛的重视，但因其成本偏高，应用范围受到一定限制，随着电力电子工业的发展，器件的性价比将不断提高，APF 必然会得到广泛应用。

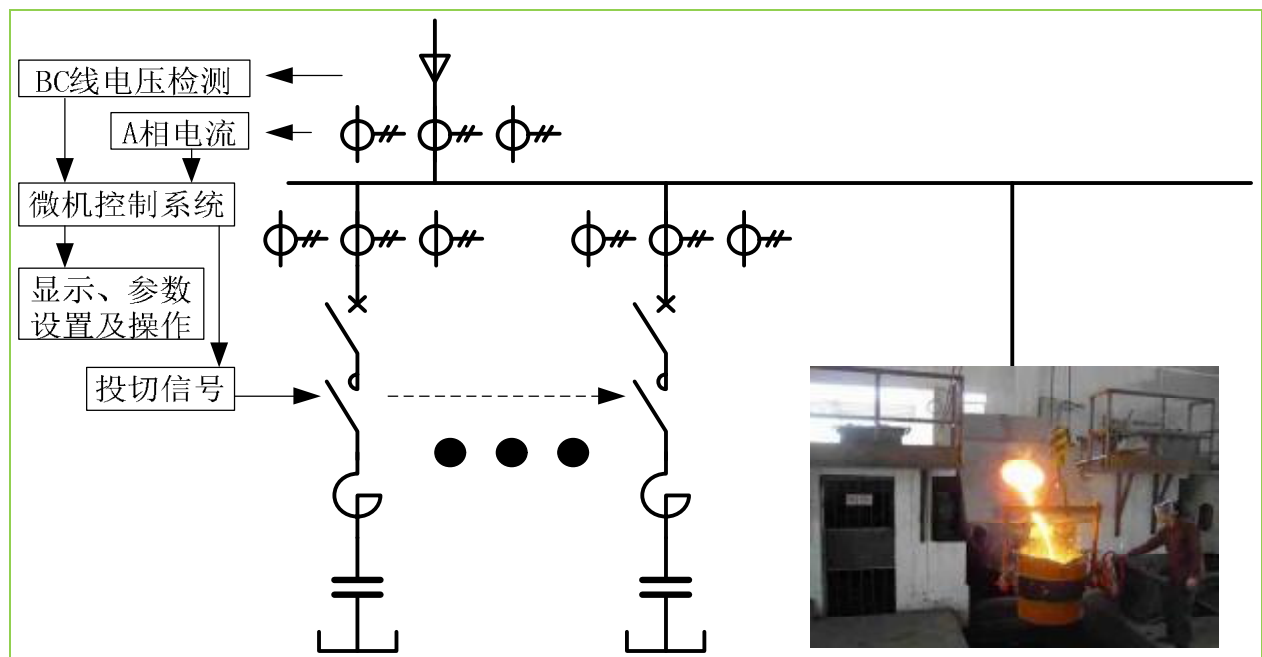
为了综合无源滤波器的低成本和有源滤波器优异的滤波性能，**混合型滤波器应运而生**，该型滤波器通过无源滤波器进行无功功率补偿并滤除特征谐波的主要部分，其余谐波通过有源滤波器滤除，能同时实现大容量无功补偿和谐波治理的要求，并同时降低投资成本，混合型滤波器是谐波含量较大且成分复杂工况的有效解决方案。

## 六、“无功补偿-谐波治理”装置简介

### 6.1 基本原理

电网向用电设备提供的负载电流由有功电流和无功电流两部分组成，无功电流在电源和负载之间往复交换，大大占用电网，使供电设备的供电能力大大降低，使功率因数降低。SYQF 装置的基本原理就是用装置产生的容性无功电流快速、准确地跟踪抵消电网中的感性无功电流，从而提高功率因数，保证用电质量，提高供电设备的供电能力，并减小电路中的损耗，成套装置针对用户系统含有的谐波情况分为不同的滤波支路，分别对相应的特征次谐波呈现低阻抗，滤波阻抗和系统阻抗分流后实现滤除大部分谐波电流，同时避免对其它特征次谐波的放大。

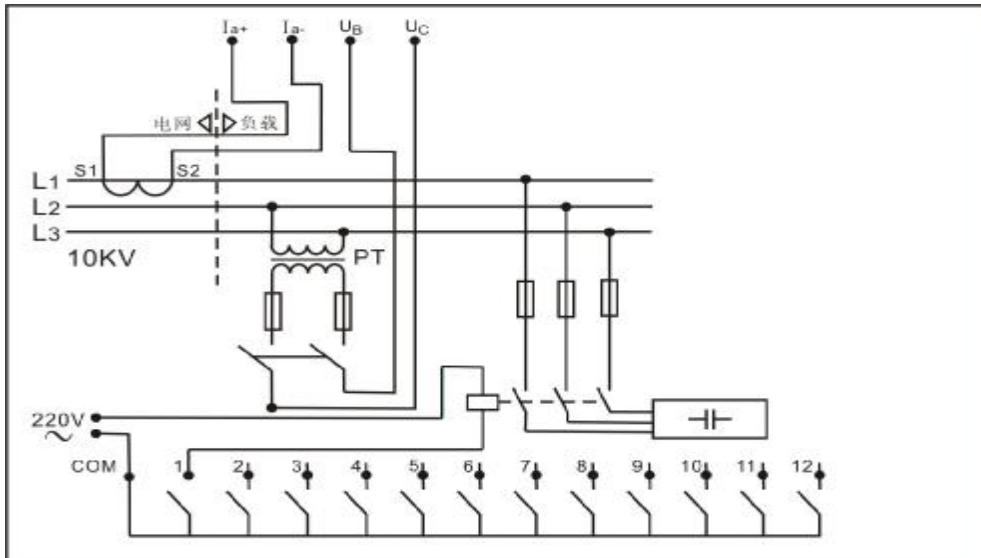
### 6.2 系统组成



- Ⅰ 电压检测和无功电流检测，用于无功计算和仪表显示。
- Ⅰ 控制器（包括微机控制系统、液晶汉字显示板和操作按键），完成无功电流计算、投入退出命令的发送、参数设定和存储等功能。
- Ⅰ 补偿控制单元，包括真空接触器、控制继电器及继电保护。
- Ⅰ 滤波电容器、滤波电抗器，完成无功补偿和谐波治理。
- Ⅰ 温控器及散热风机，完成柜内温度控制。

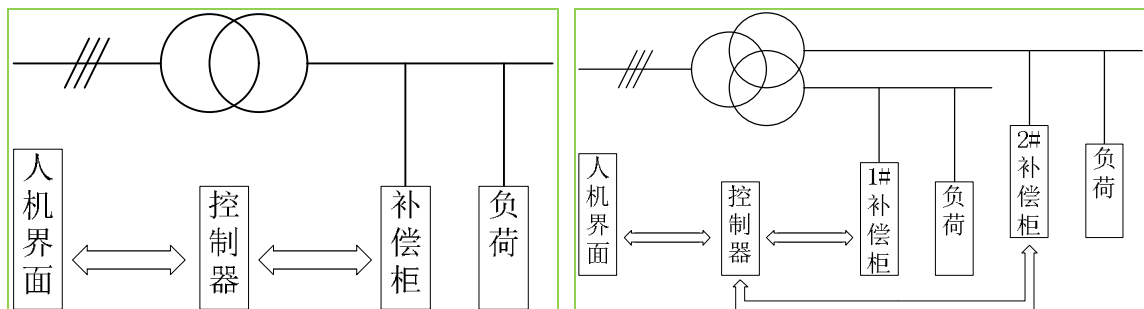
根据装置容量情况和补偿要求，可以分为基础柜和扩展柜，扩展柜是基础柜容量的补充，基础柜可以单独进行补偿，扩展柜必须与基础柜配合使用。

### 6.3 控制原理



由上图可以看出控制器主要完成无功电流计算、投切命令分配。控制器计算出当时的负载无功容量，根据各路补偿的容量，判断并延时投入与当前无功容量最接近的补偿支路的补偿滤波支路。反之，退出与投入动作原理相同。

控制器通过液晶屏和按键进行人机对话，可以进行控制方式切换和参数设置。



补偿单副边系统图

补偿双副边系统图

为了对消高压侧低次谐波，要求变压器的副边各次谐波电流相当。采用上图补偿后，可以保证在任何瞬间，变压器的副边投入的基波无功量相等，任何瞬间副边流入变压器原边的各次谐波电流相当。

### 6.4 工作步骤

- 1 系统带电断路器合闸或者断路器合闸系统停电后又上电。

- | 闭合控制器控制电源。控制器上电指示灯亮，人机界面开始显示。
- | 控制器对系统电压、电流进行自动检测，然后分析三相电网电压的幅值和相位、无功功率等情况，并开始上电延时；检查控制状态或切换控制方式。
- | 控制器显示正常，温控器显示正常。
- | 装置正常工作时，控制器通过对滤波器电压检测，进行过压、欠压分析，如果满足再检测系统无功功率是否达到滤波器投入条件，如果全部条件满足，则根据系统设置开始投入滤波器。
- | 滤波器先投低次滤波器，后投高次滤波器。
- | 退出时先退高次滤波器，后退低次滤波器
- | 温控器对柜体内部环境温度进行检测，判断并驱动风机散热。

## 6.5 技术特点

我公司谐波治理兼无功补偿装置的基本作用有两点：

第一点是用装置发出的容性无功功率自动跟踪补偿负载产生的感性无功功率，使补偿后供电功率因数达到用户规定的要求。

第二点是让补偿装置对负载谐波呈现很小的感抗，使负载产生的谐波流入补偿装置而不通过变压器注入上级电网，谐波含量达到国家标准。

实现以上两点即可以实现稳定供电电压，降低母线电压畸变率，降低供电容量，进而达到降低谐波干扰电网、降低变压器温度和降低供配电损耗的目的。

无功补偿和谐波治理装置在技术和结构上就是围绕上述两点来考虑和设计的。

我公司动态无功补偿兼谐波治理装置的技术和结构特点如下：

- | 我公司产品电容器一般采用星型接法。此种接法电容器承受较低的电压；故障时较小的短路电流；电容器单相可调，因此在和电抗器构成滤波支路时可以有更理想的调谐特性，滤波效果更好。
- | 采用快速无功算法，而且特殊处理电容器放电方式，可实现快速投切，具体投切速率可以由用户设定；
- | 补偿装置的滤波器由高次滤波器组(通常是5、7、11次滤波器)按4：2：2比例分配。通常在设计上，负载基波无功功率小于补偿装置额定基波容量的60%即可以投入各次滤波器，从而保证在负载变化的全范围内按照国家标准滤除谐波。这种结构要求高次滤波器谐波电流与基波电流的比值高于2.5，远远高于一般生产厂家谐波电流与基波电流的比值为0.5的技术指标；

- | 补偿装置属于有级补偿方式，为了保证在补偿容量范围内补偿后功率因数大于 0.95，补偿精度必须小于负载最小有功功率的三分之一，按 4：2：2 比例分配的低次滤波器虽然滤波器路数增多，但是可以保证补偿后的功率因数指标；
- | 控制系统采用工业级 DSP，设定参数均存入 EEPROM，装置断电参数不会丢失；
- | 本装置的自诊断系统可对多种故障进行处理，如过电流、过载、过电压、超温等等；控制器对消失的故障（如过压、欠压）可以自动恢复装置运行，提高了补偿装置在无人值守下运行的可靠性；
- | 网压支持算法随电网电压高低不同采用不同的补偿算法，确保不发生欠补偿和过补偿；
- | 采用自愈式电容器，自身具有断电 2 分钟后完全放电的能力；
- | 补偿装置设计有手动投入功能，在没有负载时可以手动投入任何支路滤波器，方便了设备的检修和调试；
- | 补偿装置的容错技术，可以保证在补偿设备中一路滤波器出现故障时，其它各路滤波器仍然可以正常工作；
- | 各系列补偿装置的配置分为控制柜和扩展柜，主要的控制系统在控制柜内，扩展柜内的控制部分主要解决扩展柜自身的工作需要，如果补偿容量不足可以直接增加扩展柜，一个控制柜可以控制 6 路滤波器；
- | 装置采用标准柜体，为冷弯模数化带孔型钢组合成的 GGD 系列柜体，电源进线方式可以根据需要设计为上部、下部进线；

## 6.6 关键部件

### | 电容器

电容器选用滤波电容器，该电容器可以在谐波电流比基波电流大 3 倍并承受 1.5 倍额定电压下长期工作，可以承受 2 倍 250Hz 的额定电流长期工作。电容量制造精度 1%，保证滤波器有较低的谐振阻抗。到目前为止，我中心产品还没有出现过电容器质量问题。

### | 电抗器

电抗器选用无电磁辐射铁心电抗器。该电抗器相间和对外壳绝缘电压 4000V 以上，可以在额定电流全是谐波电流的情况下长期运行。电抗器设计的关键技术是解决高频谐波涡流铁损和集肤效应铜损问题，使对于谐波的品质因数大于 60。

### | 真空接触器

我中心采用的真空接触器比普通接触器安全性能提高4倍左右，主要用于交流50Hz、额定工作电压至1140V，额定工作电流至1000A的电路中。接触器由磁系统，接触系统和辅助触头组成。接触器为立体结构布置，上部为接触系统，下部为电磁系统。磁系统由线圈、铁芯和整流装置组成，装在用铝合金制成的底座内。接触器系统由动、静触头和真空灭弧室组成，装在用绝缘材料制成的基座内。真空灭弧室采用新型触头材料且体积小，电磁系统采用直流双线圈，双绕组的节能方案，增加了接线端子，便于用户接线，产品结构紧凑、外观新颖，为国内外同类产品体积最小者，便于组装防爆电磁起动器及开关柜。

#### I 其他元器件

- 控制器
- 熔断器
- 柜体
- 温度控制器
- 进线开关
- 显示仪表
- 继电保护
- 散热风机

### 6.7 结构特点

补偿装置一般分为控制补偿柜和扩展补偿柜，扩展补偿柜是控制补偿柜容量的补充，控制补偿柜对扩展补偿柜进行管理和指挥，扩展补偿柜除由控制补偿柜管理外，自身还有一些检测和故障处理的功能。整个系统由多路L-C滤波器组成。滤波型成套装置先投入低次滤波器，然后投入高次滤波器；退出过程相反。

控制器首先对采集的负载无功电流进行快速的分析计算，算出无功电流，然后根据电网的电压现状，确定实际需要的无功功率，准确地投入/退出最佳的补偿容量，达到最佳的补偿效果。

当电网电压超过支持网压时（可设定），主机采用网压支持算法，这时投入的电容逐步减少，以防止网压升高。

西安德昌机电科技有限公司

2011/8/12