

## 第二章 无功补偿方式及容量确定

### 2.1 低压配电网的无功补偿方式

电容器的补偿容量与采用的补偿方式、未补偿时的负载情况、电容器接法有关。补偿方式不同，补偿容量的计算公式也不相同。

按电容器安装的位置不同，低压电网利用并联电容器进行无功补偿的方式有三种：低压集中补偿方式、分散补偿方式和用户终端就地补偿方式。

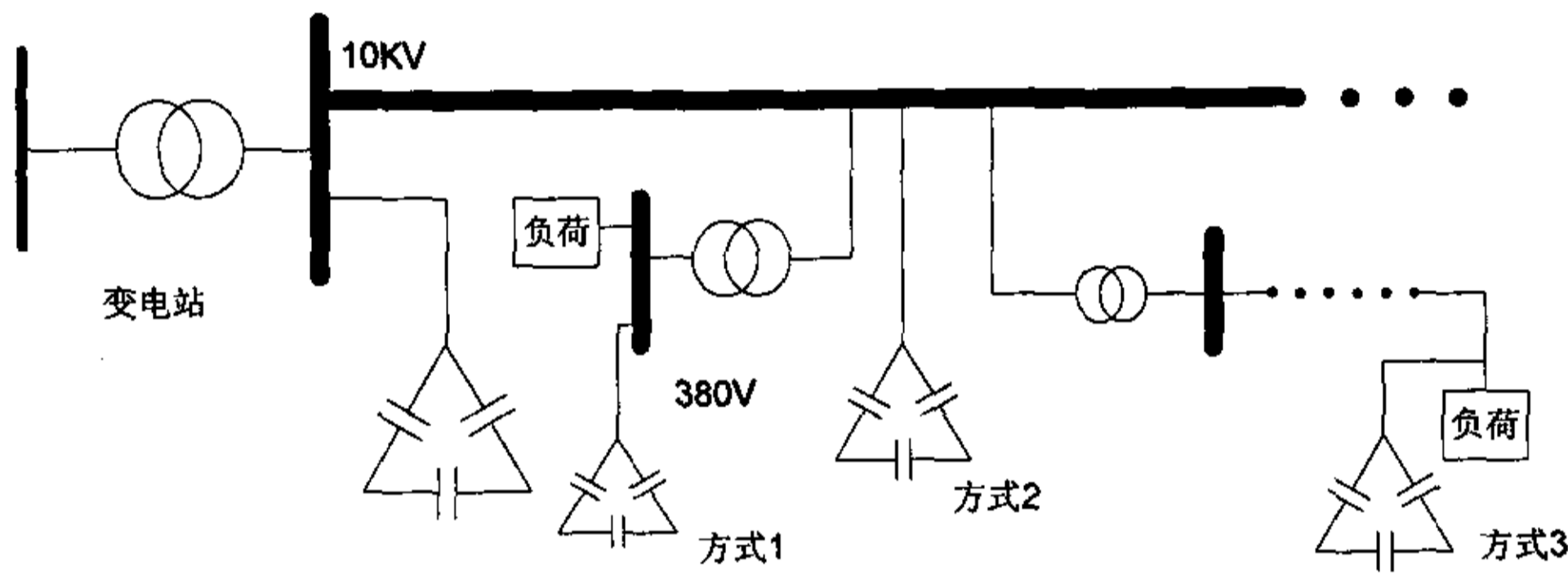


图 2-1 低压无功补偿装设方式

Fig.2-1 The installment way of low-voltage reactive power compensator

#### 2.1.1 低压集中补偿方式

目前国内较普遍采用的一种无功补偿方式是在用户专用变压器的低压母线上 380V 侧进行集中补偿（如图 2-1 的方式 1），通常采用微机控制的低压并联电容器柜，容量在几十至几百千乏不等，根据用户负荷水平的波动投入相应数量的电容器进行跟踪补偿。主要目的是提高专用变压器用户的功率因数，实现无功的就地平衡，对配电网和配电变压器的降损有一定的作用，也有助于保证该用户的电压水平。这种补偿方式的投资及维护均由专用变压器用户承担。目前国内各厂家生产的自动补偿装置有根据功率因数来进行电容器的自动投切的，也有为保证用户电压水平而以电压为判据进行控制的<sup>[24]</sup>，但都属于单一判据，容易造成投切振荡。

为了实现电压控制，通常无功补偿装置一般是使用并联电容器组来进行补

偿。电压/无功控制在国内已经积累了丰富的经验，九区图<sup>[21]</sup>便是一种电压/无功控制的有效方法。缺点是判据中电压和无功（功率因数）的边界是固定且无关的。在电力系统中，电压和无功的调节是相互影响的。按其固定规则的控制不一定能适应系统变化的要求。因为由于限值需要随不同运行方式进行相应的调整；在某些区域上会产生振荡现象。现行九区图的调节效果也不是数学上证明的最好效果，因此九区图的应用还有待进一步改善。

文献<sup>[22,23]</sup>利用模糊数学的概念建立了数学模型，得出了模糊边界的无功调节判据，它的特点是将九区图中固定的无功上下限边界改变成受电压影响的模糊边界，其边界的斜率可根据具体的投切边界条件进行调整。所设计的新型的电压无功微机综合控制装置，可在最大限度上保证电压合格和无功最佳补偿效果。

### 2.1.2 分散补偿方式

将电容器组按需求的无功容量，分别装设在相应的母线上，或者直接与低压干线相连，形成内部的分散补偿方式，如图 2-1 中的方式 2。由于电容器分散在各用户旁，可以就近补偿主要用电设备的无功功率。由于这部分无功功率不再通过线路向上传送，从而使用户上的变压器和配电线路的无功功率损耗相应地减少，当变压器下用户较多，用户配电线路分路多而且距离较远时，补偿效益最高<sup>[25]</sup>。

### 2.1.3 用户终端就地补偿方式

就地补偿将电容器装设在异步电动机或感性用电设备附近，就地进行无功补偿，也称为单独补偿或个别补偿方式，如图 2-1 中的方式 3。这种方式既可提高为用电设备供电回路的功率因数，又能改善用电设备得电压质量，对中、小型设备十分适用。近年来，随着我国逐步具备生产低压自愈式并联电容器的能力，且型号规格日渐齐全，为就地补偿方式的推广创造了有利条件。

但这种补偿方式也有缺点。因为这种补偿电容器组的容量只能按电动机的空载电流选择（避免在电动机退出时因电容器放电而产生自激磁和过电压），因而在电动机带负荷运行时长期处于欠补偿状态，仍需由电源端向受电端输送无功功率，配电网的无功损耗仍然存在。

综合以上三种无功补偿方式，这三种补偿方式各有利弊，若将三种补偿方

式统筹考虑、合理布局，将可以取得很好的技术经济效益。

## 2.2 并联电容器无功补偿容量的计算

电容器的补偿量与采用的补偿方式，未补偿时的负载情况、电容器接法等有关。

### 2.2.1 集中补偿和分散补偿电容器容量计算

采用集中补偿方式和分散补偿方式时，总的补偿容量由下式决定：

$$Q_C = \beta_{av} P_c (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) = \beta_{av} P_c \left( \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_2} - 1} \right) \quad (2-1)$$

式中： $Q_C$  为所需补偿容量 ( $kVar$ )； $P_c$  为由变配电所供电的月最大有功功率计算负载 ( $kW$ )； $\beta_{av}$  为月平均负载率，一般可取 0.7~0.8； $\cos \phi_1$  为补偿前功率因数角，可取最大负载时的值； $\cos \phi_2$  为补偿后希望达到的功率因数角，参照电力部门的要求确定，一般可取 0.9~0.95。

电容器接法不同时，电容器补偿能力也是不一样的。

电容器组为三角型联接时，每相电容承受线电压，所以有：

$$Q_{C\Delta} = U^2 / X_C = \omega C_\phi U^2 \times 10^{-3} kVar \quad (2-2)$$

式中： $U$  为装设地点电网线电压 ( $kV$ )； $C_\phi$  为每相电容器组的电容量 ( $\mu F$ )；

电容器为星型联接时，每相电容承受的是相电压，所以有：

$$Q_{CY} = \omega C_\phi (U/\sqrt{3})^2 = \omega C_\phi U^2 / 3 = \frac{1}{3} Q_{C\Delta} \quad (2-3)$$

以上两式表明，具有相同电容量的三个单相电容器组，采用三角形接法时的补偿容量是用星形接法的三倍。

### 2.2.2 就地补偿电容器容量计算

单台异步电动机装有就地补偿电容器时，若电动机突然与电源断开，电容器将对电动机放电而产生自励磁现象。如果补偿电容器容量过大，可能因电动机惯性转动而产生过电压，导致电动机损坏。为防止这种情况发生，不宜使电容器容量过大，应以电容器在此时的放电电流不大于电动机空载电流  $I_0$  为限：

$$Q_C = \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3} \quad (2-4)$$

式中： $U_N$  为电系统额定电压 ( $V$ )； $I_0$  为电动机额定空载电流 ( $A$ )。

若电动机空载电流  $I_0$  在产品样本中不能查到，本论文采用下式估算：

$$I_0 = 2I_{N.M} (1 - \cos \phi_N) \quad (2-5)$$

$$I_0 = I_{N.M} \left( \sin \phi_N - \frac{\cos \phi_N}{2\eta_r} \right) \quad (2-6)$$

式中： $I_{N.M}$  为电动机额定电流(A)； $\phi_N$  为电动机未经补偿时的功率因数角； $\eta_r$  为电动机最大转矩倍数，一般取 1.8~2.2。

### 2.3 补偿电容器组的接线方式

本低压动态无功补偿装置的主电路是指电容器组及其附件构成的与电网直接相连接的部分电路。三相电容的接线方式有两种形式： $Y$  接线和  $\Delta$  接线，其中  $Y$  接法又包括中性点接地和中性点不接地两种接线方法。电容器为  $Y$  接线时，电路相对简单，复合开关和每相电容器串联接入电网，组成无功补偿的主电路。电容器为  $\Delta$  接线时，只适用于三相共补电路，如果三相负荷不平衡、三相功率因数角和电流差异较大，主电路就只能采用  $Y$  接法，以满足分相补偿的要求。但是，采用  $\Delta$  接线方式，也有一定的优势：第一，可以降低复合开关的电流容量；第二，电容器电压能够保证，没有中性点引起的电压漂移；第三，避免中线电流。

在低压电网中，常见的主接线方式有以下三种（以复合开关为例）：

1、三相控制的  $\Delta$  接线方式（图 2-2）。这种方式在复合开关进行投电容时，需要考虑电容器的残压，系统电压和电容器残压相等的时刻，就是晶闸管投入的触发点。否则，由于电容器两端电压不能突变，系统电压和电容器残压的差值较大时触发晶闸管会产生很大的冲击电流，这一冲击会直接损坏晶闸管。

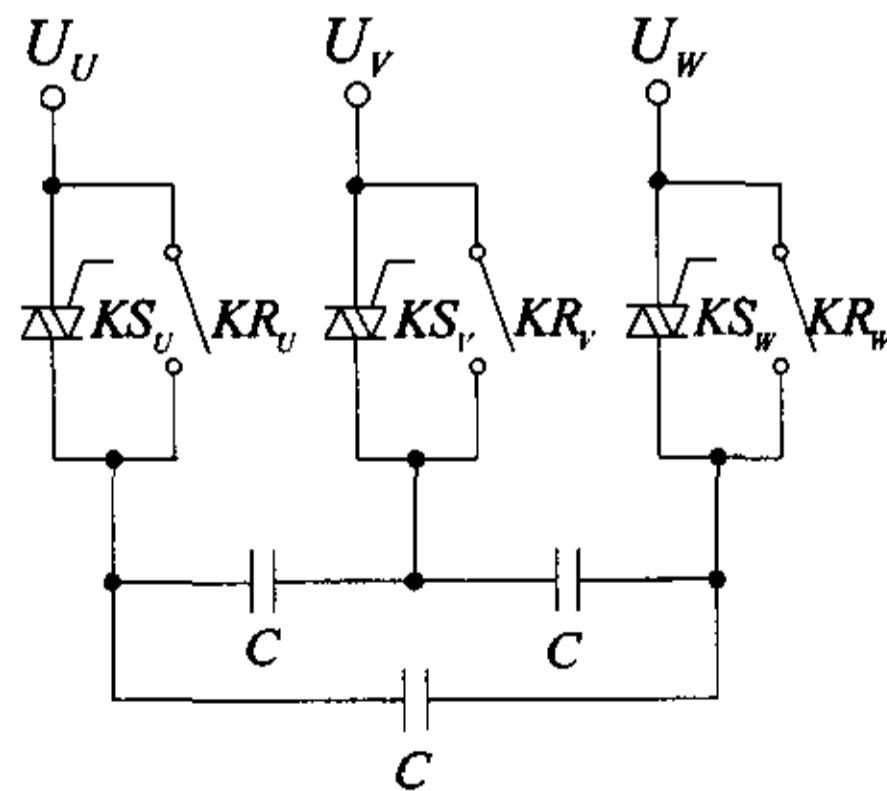


图 2-2 并联电容器组的  $\Delta$  接法

Fig.2-2 The  $\Delta$  connection of parallel connection capacitors

2、三相控制的 $Y_N$ 接线方式（图 2-3）。这种接线，晶闸管电压定额可以降低，但电流定额增大。电容器电压降低会提高其单位价格，同时投入时会产生短时不平衡中线电流。

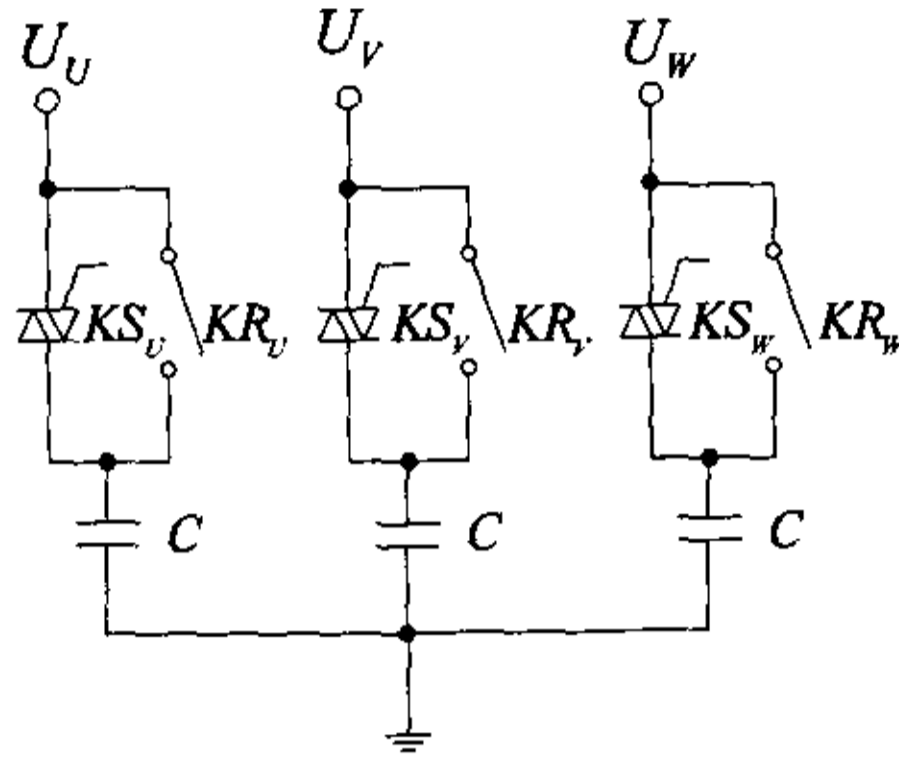


图 2-3 并联电容器组的 $Y_N$ 接法

Fig.2-3 The  $Y_N$  connection of parallel connection capacitors

3、三相控制的 $Y$ 接线方式（图 2-4）。这种无中性线的接法，电容器组可以选择任何一种三相电容器。采用此种接法时，每相承受的是相电压，所以具有相同电容量的三个单相电容器组，补偿容量是采用 $\Delta$ 接法的三分之一。

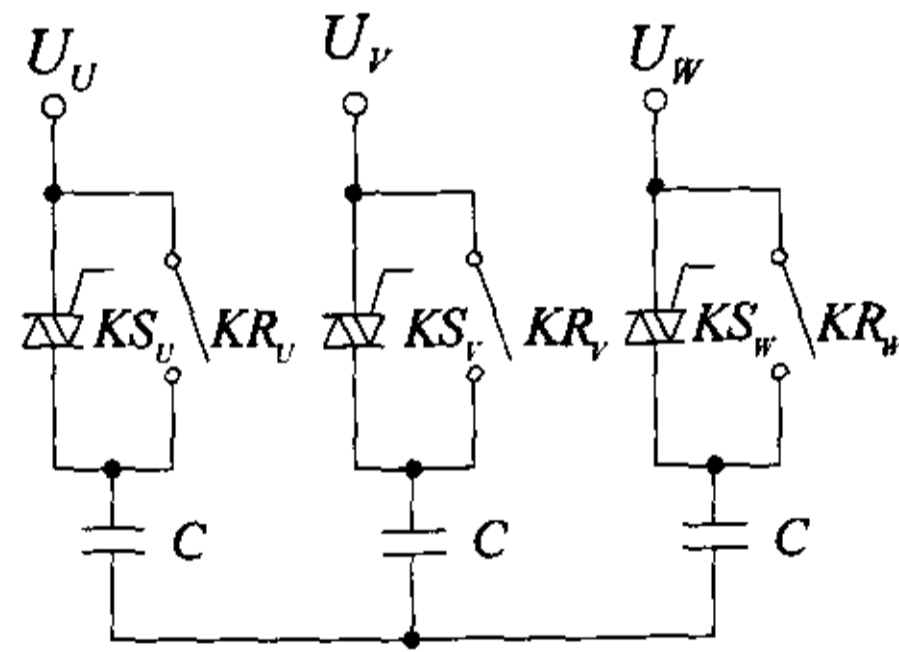


图 2-4 并联电容器组的 $Y$ 接法

Fig.2-2 The  $Y$  connection of parallel connection capacitors

## 2.4 不同电容器投切功率元件的比较

电容器投切功率元件的任务是在投切电容的过程中尽量减少电容器投切涌流，目前主要采用机械开关、晶闸管和复合开关等几种不同形式，下面分别说明其特点。

### 2.4.1 机械开关

常规的机械开关一般采用真空断路器或真空接触器，这在国内的一些大型无功补偿装置和国外的一些主要的托卡马克装置中得到广泛的应用，它具有成本相对低，导通电阻小的优点，但存在以下的缺点：

- 1、分断电容回路易重燃，引起过电压，此外开关操作时，可能出现触点的弹跳，这也会产生过电压；
- 2、合闸时产生很大的涌流；
- 3、分闸时产生电弧，影响开关寿命；
- 4、开关动作的时延较大。

可见，机械开关的投切操作频率过高，对补偿电容器及开关本身都有很大的危害，故这类开关不适合用于对变化快速的无功进行补偿的装置中。

### 2.4.2 晶闸管

为了适于频繁操作，出现了晶闸管开关，这种开关在低压系统中应用广泛，它具有操作无电弧、寿命长、动作迅速等优点，但考虑到晶闸管截止时，电容器上可能有残压，这类开关中晶闸管应能耐受峰峰电压。为了使这种开关能用在高压场合，一种方法是采用多个晶闸管串联，这需要配套完善的动、静态均压措施，同时一般设计时还给了3~4倍的裕量，并留有一定数量的备用。因此晶闸管开关的成本高，并且可靠性较差。但在低压系统中，晶闸管控制电容器投入或者切除存在以下问题：晶闸管发热量大，存在散热问题，散热片体积大，不适合柜式集成装置；需要选择高耐压产品，成本相对过高。

### 2.4.3 复合开关

复合开关是将常规的继电器与晶闸管有机结合，充分利用各自的优点，例如继电器导通电阻小，晶闸管开关可以实现软开通和软关断，导通比较迅速，相位可控等，提高开关整体性能，并节约投资。目前，国外直流复合开关已有应用。这里提出了一种低压交流复合开关，它具有合闸涌流小，不易发生重燃、可以频繁投切的特点，同时这种开关与全晶闸管开关相比，投资大大减少。

复合开关的特点：

- 1、准确地控制三相合闸时刻，抑制合闸涌流，保护了开关及电容器；
- 2、继电器在低电压条件下合闸，有利于延长其寿命；



3、继电器分断时，其电流向晶闸管侧换流，大大减小了燃弧时间，延长了继电器的寿命；

4、开关动作时间短。

从以上特点可以看出，复合开关更适宜频繁操作，投切电容过程无涌流冲击，无操作过电压，无电弧重燃，整机使用寿命长，维修量少，无功补偿动态响应快，可频繁投切，可分相补偿，具有自动运行功能（停电退出，送电后自动恢复），运行中无压降，耗能少，不产生谐波。既有可控硅开关过零投切的优点，又有继电器功耗小的优点。

#### 2.4.4 根据实际需要选择不同的投切元件

根据不同负荷类型要求，选择不同的执行机构。晶闸管适合要求响应速度要求不是很高且非长期频繁使用无功补偿的场合；继电器适合不要求快速响应，对限制涌流要求不高，对成本较敏感的无功补偿场合；复合开关适合快速响应，限制涌流，适当节约成本的无功补偿的场合。因此本文选用了复合开关作为电容器的投切开关。