无功补偿用电容器的选择与计算

在电力系统中，发电机是唯一的有功电源，也是基本的无功电源。如果只依靠发电机来提供无功功率，电力系统之间由于无功功率不断地、来回地交换引起发电、输电及供配电设备上的电压损耗及功率损失，况且发电机发出的所有功率等于有功功率与无功功率的矢量和，提供的无功功率多时，提供的有功功率就少了，这种运行方式也很不经济。因此，当电网不能满足电网无功功率的要求时，就需要加装无功补偿设备进行无功功率补偿，此时正确地选择无功补偿设备就显得尤其重要了。针对上述情况，对并联电容器的接入点、串联电抗器的选择及电容器的继电保护整定计算进行了详细的探讨并举例说明。

柴　静/武汉炼化工程设计有限责任公司

柴　静/工程师

关键词/Keywords
电力系统·
发电机·
无功功率补偿·
电容器·
电抗器·
继电保护整定计算·

0　引言

供电部门一般要求用户的月平均功率因数达到0.9以上。当用户的自然总平均功率因数较低，单靠提高用电设备的自然功率因数达不到要求时，应装设必要的无功功率补偿设备，以进一步提高用户的功率因数。

1　并联电容器接线入点

1）从满足供电部门对用户功率因数要求的角度出发，可以只在企业总变电所或总配电所集中补偿。如用电负荷较小的企业通常采用这种方式。

2）既考虑供电部门的要求，又兼顾节能效益及电压偏移的影响，应适当分散补偿，即在企业总变电所、大部分6(10) kV配电所和低压0.4 kV母线进行补偿。对于用电负荷较大的企业一般应采用这种方式。

3）对于具有6(10) kV负荷，又有0.4 kV负荷的变电所，宜根据两级的负荷大小、功率因数决定是在两级都补还是仅在一级补偿。

4）大型机组（异步电动机）一般在现场母线段补偿，但备用机组可不补偿。

2　串联电抗器选择

电容器回路应串联接入电抗器，用于限制合闸涌流或限制n次谐波。

1）电抗器的额定电流不小于回路的工作电流，$I_L \geqslant I$。

2）电抗率计算。电抗率为串联电抗器的感抗与并联电容器组的容抗之比，即$K=X_L/X_C$，以百分数表示。设6 kV母线经计算需补偿无功功率$Q=1\ 800$ kvar$=1.8$ Mvar，选用$(6.3/\sqrt{3}$ kV)，$3\times6\times100$ kvar电容器，星形联结，电抗器装设于电容器组的电源侧。

电容器组的容抗计算。首先，电容器电流为

$$I_C=\frac{Q}{\sqrt{3}\times U_C}=\frac{1\,800}{\sqrt{3}\times6.3}\ \text{A}=165\ \text{A} \quad (1)$$

其次，电容器容抗为

$$X_C=\frac{U_C}{\sqrt{3}\times I_C}=\frac{6\,300}{\sqrt{3}\times165}\ \Omega=22.04\ \Omega \quad (2)$$

串联电抗器的感抗计算。当要求电抗率$K\geqslant4.5\%$时，即$K=X_L/X_C=4.5\%$，得$X_L=KX_C=4.5\%\times22.04\ \Omega=0.991\ 8\ \Omega$。如：选用6 kV，200 A（0.2 kA），额定电抗6%的干式电抗器，电抗器电抗为

$$X_L=\frac{KU}{\sqrt{3}\times I_L}=\frac{0.06\times6}{\sqrt{3}\times0.2}\ \Omega=1.039\ \Omega \quad (3)$$

实际电抗率

$$K_L=\frac{X_L}{X_C}=\frac{1.039}{22.04}=4.7\% \quad (4)$$

3 电容器容量和电压选择

1）电容器组的额定容量应按CECSS 33:91规定的容量等级选择。上述举例中，补偿容量1 800 kvar＝1.8 Mvar符合容量等级要求。

2）对于不分组投切的电容器组容量或分组投切每一级投切后的运行容量，应避开发生谐振的可能。发生谐振的电容器容量按下式计算

$$Q_{Cn}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right) \quad (5)$$

式中，Q_{Cn}为发生n次谐振的电容器容量，Mvar；S_d为电容器安装处母线短路容量，MV·A；n为谐波次数；K为电抗率。

3）在负荷变化范围内，都不宜向系统反送无功（例如负荷较小时）。

4）电容器的额定电压选择。电容器组每相额定电压的选择除与接入系统的额定电压有关外，还与回路的电抗率有关，可按下式计算

$$U_{Cn}=\frac{1.05U_{sn}}{\sqrt{3}(1-K)} \quad (6)$$

式中，U_{sn}为接入电网的额定电压，kV；U_{Cn}为每相电容器的额定电压，kV；K为装置的额定电抗率。

上述举例中，$U_{Cn}=1.05\times6$ kV/$[\sqrt{3}(1-0.047)]=3.818$ kV≌$(6.6/\sqrt{3})$ kV。但此时，电容器组额定电流为$I_C=[1\ 800/(\sqrt{3}\times6.6)]$ A＝157.5 A；电容器组容抗为$X_C=[6\ 600/(\sqrt{3}\times157.5)]\ \Omega=24.2\ \Omega$；电抗率为$K=1.039/24.2=4.3\%$；验算每相电容器组额定电压$U_{Cn}=1.05\times6$ kV/$[\sqrt{3}(1-0.043)]=3.80$ kV≌$(6.6/\sqrt{3})$ kV＝3.81 kV。

5）运行中实际发出无功功率（供给系统的）计算。当母线电压为6.3 kV时，回路电流为

$$I=\frac{U}{\sqrt{3}\times(X_L-X_C)}=\frac{6\,300}{\sqrt{3}\times(1.039-24.2)}\text{ A}=-157\text{ A} \quad (7)$$

实际发出无功功率

$$Q=3I^2(X_L-X_C)^2=3\times(-157)^2\times(1.039-24.2)\times10^{-3}\text{ kvar}=-1\,712.68\text{ kvar} \quad (8)$$

同理，当母线电压为6.0 kV时，$Q=-1\,554.4$ kvar；当母线电压为5.7 kV时，$Q=-1\,402.9$ kvar。

4 操作过电压保护

为限制电容器操作过电压，应紧靠电容器组的电源侧装设避雷器，通常采用无间隙氧化锌避雷器，每个避雷器采用相对地接线。

5 继电保护设置与整定计算

例：带串联电抗器、单星形联结6 kV电容器组的保护。

电容器组额定容量1 200 kvar，共24个BFM6.6/$\sqrt{3}$－50－1 W，每相8个电容器并联。为抑制5次以上谐波，取电抗率$K=X_L/X_C=4.5\%$，即$X_L=4.5\%X_C$，6 kV母线最小三相短路电流为8.5 kA，系统单相总接地电容电流为12 A。

5.1 容抗及电抗计算

每相电容器容抗及串联电抗器电抗为

$$X_C=\frac{U_C^2}{Q}=\frac{\left(6.6/\sqrt{3}\right)^2\times10^3}{8\times50}\Omega=36.3\,\Omega \quad (9)$$

$$X_L=KX_C=0.045\times36.3\,\Omega=1.634\,\Omega \quad (10)$$

电容器组额定电流为

$$I_{rC}=\frac{U\times10^3}{\sqrt{3}}/(X_C-X_L)=\left[\frac{6\,000}{\sqrt{3}}/(36.3-1.634)\right]\text{A}=99.93\text{ A} \quad (11)$$

选电流互感器电流比$n_{TA}=150/5=30$。

5.2 串联电抗器选择

选用6 kV、150 A，要求的电抗百分数计算如下

$$X_L\%=\frac{X_L\times\sqrt{3}\times I_1}{U}=\frac{1.634\times\sqrt{3}\times0.15}{6}=7\% \quad (12)$$

5.3 保护配置及整定计算

根据《工业与民用配电手册》第三版127页，表4-1 常用基准值（$S_j=100$ MV·A）。选取基准值：$U_j=6.3$ kV，$I_j=9.16$ kA。

根据《工业与民用配电手册》第三版317页，表7-20 6～10 kV电力电容器组的继电保护整定计算，进行计算。

5.3.1 短路短延时速断保护

电抗器后最小三相短路电流计算。

系统标幺电抗

$$X_{*S}=\frac{9.16}{8.5}=1.077\,6 \tag{13}$$

电抗器标幺电抗

$$X_{*L}=X_L\times\frac{100}{U_j^2}=1.634\times\frac{100}{6.3^2}=4.117 \tag{14}$$

当忽略馈线电缆阻抗时

$$I''_{min}=\frac{I_j}{X_{*S}+X_{*L}}=\frac{9.16}{1.077\,6+4.117}\text{ kA}=1.763\text{ kA}=1\,763\text{ A} \tag{15}$$

保护装置的动作电流

$$I_{op\cdot k}=\frac{K_{jx}\times0.866I''_{min}}{n_{TA}\times K_{sen}}=\frac{1\times0.866\times1\,763}{30\times2}\text{ A}=25.4\text{ A} \tag{16}$$

保护装置一次动作电流

$$I_{op}=\frac{I_{op\cdot k}n_{TA}}{K_{jx}}=\frac{25.4\times30}{1}\text{ A}=762\text{ A} \tag{17}$$

式中，K_{jx}为接线系数，接于相电流时取1，接于相电流差时取$\sqrt{3}$；I''_{min}为三相短路电流；n_{TA}为电流互感器电流比；K_{sen}为保护装置的灵敏系数。

动作时限应大于电容器组合闸涌时间：$t\geqslant0.2$ s。

5.3.2 过电流保护

保护装置的动作电流

$$I_{op\cdot k}=K_{rel}K_{jx}\frac{K_{gh}I_{rC}}{K_r n_{TA}}=1.2\times1\times\frac{1.3\times99.93}{0.85\times30}\text{ A}=6.1\text{ A} \tag{18}$$

保护装置一次动作电流

$$I_{op}=\frac{I_{op\cdot k}n_{TA}}{K_{jx}}=\frac{6\times30}{1}\text{ A}=180\text{ A}$$

式中，$I_{op\cdot k}$取6 A；K_{rel}为可靠系数，取1.2；K_{jx}为接线系数，接于相电流时取1，接于相电流差时取$\sqrt{3}$；K_{gh}为过负荷系数，取1.3；I_{rC}为电容器组额定电流，A；K_r为继电器返回系数，取0.85；n_{TA}为电流互感器电流比。

保护装置灵敏度系数

$$K_{sen}=\frac{0.866I''_{min}}{I_{op}}=\frac{0.866\times1\,763}{180}=8.48>1.5 \tag{19}$$

动作时限应较短延时速断保护大一时限阶段$\Delta t=0.5\sim0.7$ s。

注：上述两项保护可合并，即只装设带短延时过电流保护，此时保护装置的动作电流

$$I_{op\cdot k}=\frac{K_{rel}K_{jx}I_{rC}}{n_{TA}}=\frac{2.5\times1\times99.93}{30}\text{ A}=8.3\text{ A} \tag{20}$$

保护装置一次动作电流

$$I_{op}=\frac{I_{op\cdot k}n_{TA}}{K_{jx}}=\frac{8.3\times30}{1}\text{ A}=249\text{ A} \tag{21}$$

保护装置动作时间：$t_{op}=0.15$ s。

5.3.3 过负荷保护

保护装置的动作电流

$$I_{op\cdot k}=\frac{K_{rel}K_{jx}I_{rC}}{n_t K_r}=\frac{1.2\times1\times99.93}{30\times0.85}\text{ A}=4.7\text{ A} \tag{22}$$

保护装置一次动作电流

$$I_{op}=\frac{I_{op\cdot k}n_{TA}}{K_{jx}}=\frac{4.7\times30}{1}\text{ A}=141\text{ A} \tag{23}$$

式中，K_{rel}为可靠系数，取1.2；K_{jx}为接线系数，接于相电流时取1，接于相电流差取$\sqrt{3}$；K_{gh}为过负荷系数，取1.3；I_{rC}为电容器组额定电流，A；K_r为继电器返回系数，取0.85；n_{TA}为电流互感器电流比。

5.3.4 开口三角电压保护－单星形联结不平衡保护

保护装置动作电压

$$\begin{aligned}U_{op}&\leqslant\frac{1}{K_{sen}n_{TA}}\cdot\frac{3\beta_C U_{rph}}{\{3n[m(1-\beta_C)+\beta_C]-2\beta_C\}}\\&=\frac{1}{1.5\times60}\cdot\frac{3\times0.6\times3\,810.6}{\{3\times1[8(1-0.6)+0.6]-2\times0.6\}}\text{ V}\\&=\frac{1}{90}\cdot\frac{6\,859}{10.2}\text{ V}=7.47\text{ V}\end{aligned} \tag{24}$$

式中，n_{TA}为电流互感器电流比；K_{sen}为保护装置的灵敏系数；β_C为单台电容器元件击穿相对数，取0.5～0.75；m为每相各串联段电容器并联台数；n为每相电容器的串联段数；U_{rph}为电容器组的额定相电压，V。U_{op}取7.4 V。

5.3.5 过电压保护

按母线电压不超过110%额定电压整定，即保护装置动作电压：$U_{op}=1.1\times100$ V$=110$ V。保护装置动作于信号或跳闸，若动作于跳闸，则$t=3$ min。

5.3.6　低电压保护

保护装置动作电压：$U_{op}=0.5\times100\ V=50\ V$，保护装置通常动作于信号。

5.3.7　单相接地保护

保护装置的一次动作电流：$I_{op}=(12/1.5)\ A=8\ A$。

当选用50/5 A的零序电流互感器，继电器动作电流：$I_{op}=[12/(10\times1.5)]\ A=0.8\ A$。保护装置动作于信号或跳闸，若动作于跳闸，则$t=0.1$ s。

5.3.8　中性线不平衡电流保护－双星形联结

由制造厂负责整定，信号送到开关柜保护器。

6　结束语

综上所述，因为串联电抗器，应选用较高额定电压的电容器，电抗率越大（即串联电抗值越大）所选电容器额定电压越高。母线电压越高，运行中实际发出的无功功率越大。因此，正确地选择各个元器件才能满足通过选用无功补偿设备来提高功率因数要求，从而达到经济性的要求。

参考文献

[1] 中国航空工业规划设计研究院．工业与民用配电设计手册 [M]．3版．北京：中国电力出版社，2005．

[2] 中国机械工业联合会．GB 50052—2009 供配电系统设计规范 [S]．北京：中国计划出版社，2010．

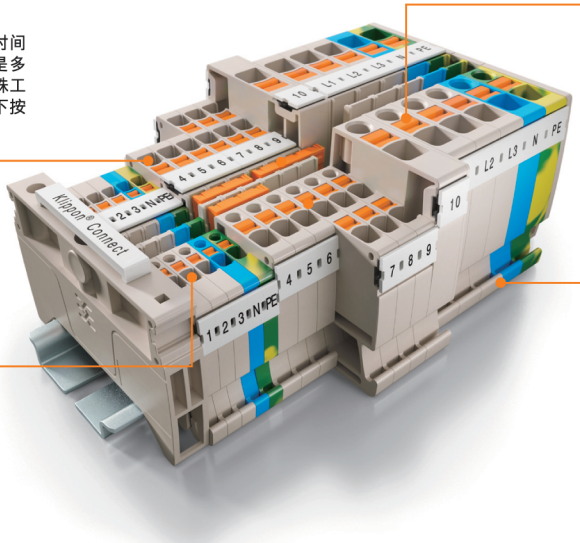
[3] 中国电力企业联合会．GB 50227—2008 并联电容器装置设计规范 [S]．北京：中国计划出版社，2009．

[4] 能源部西部电力设计院，河北省电力工业局．CECS32：91 并联电容器用串联电抗器设计选择标准 [S]．北京：中国计划出版社，1991．

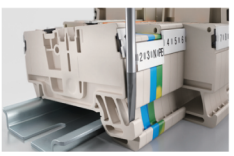
（收稿日期：2016－09－07）EA

广告 | AD

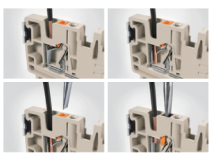
轻松插入
直插式接线技术使得安装时间最大可以节省50%。即使是多股线，也无需使用任何特殊工具，而是通过简单地按一下按钮轻松插入导线。



每个端子上标准化的检测点
标准化的检测点和测试适配器使得电气柜内的维护和故障排除变得简单。



带有补偿功能的安装卡脚
带有弹性的安装卡脚可以补偿导轨尺寸带来的差异，使得端子的安装和拆卸变得非常容易。



直插式接线技术
导线可以轻松地插入接线孔的底部。就是这样 — 你就有了一个安全的，气密性的联接。

Weidmüller

魏德米勒Klippon® Connect A系列通用类接线端子
— 标准化安装的有效解决方案

日益增长的竞争和成本压力，要求更高的安装效率，基于功能导向的魏德米勒Klippon® Connect A系列通用类接线端子可用于实现合适的解决方案。创新的直插式接线技术在联接单股硬导线和带管状端头的软导线时可减少达50%的布线时间，并实现无工具联接，在安全的前提下提高安装效率。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008　网址: www.klippon-connect.com

扫一扫，即刻了解Klippon® Connect

Let's connect.