

浅析感应电动机无功功率的就地补偿

电容器作为配电系统无功功率补偿的重要设备，在配电系统中被广泛使用。通过在配电系统中合理地配置和控制电容器，可以提高配电系统的电压质量，改善功率因数，降低网络损耗，增加系统容量。感应电动机无功功率就地补偿，投资省，同时可减少无功电流的流动，节电效果好；另一方面，提高供电质量，而且使整个线路有更多的富裕载流量。现对感应电动机就地无功补偿容量选择方案进行讨论、综合比较，给出合理而又简单的选择感应电动机就地补偿电容器容量的计算方法。

黄 旭/中国石化工程建设有限公司



黄 旭/高级工程师

关键词/Keywords

电力电容器·
无功功率·
功率因数·

在正常运行情况下，工业企业的用电设备不仅要系统电源中获取有功功率，同时还需要从系统电源中获取无功功率。如果电力系统网络中的无功功率供应不足，工业企业用电设备就不能得到足够的无功功率来建立正常的电磁场，那么这些用电设备就无法维持在额定情况下工作，用电设备的端电压就会下降，从而影响到用电设备的正常运行。无功功率供给不足对供、用电均会产生一定的不良影响，主要有以下几个方面的表现：①降低输、变电设备的供电能力，电气设备不能充分利用；②造成线路电压损失和电能损耗增加，效率降低；③造成供配电系统低功率因数运行和电压下降，使电气设备容量得不到充分发挥；④限制电网的输电能力。

可见，功率因数的提高不仅对电力系统，同时对工业企业的经济运行有着重大意义。一般情况下工业企业消耗的无功功率中，异步感应电动机约占70%，变压器约占20%，线路以及电抗器等约占10%，异步感应电动机是工业企

业中无功功率的主要消耗者，所以合理地选择和运行电动机对提高功率因数是一个十分有效的措施。在考虑提高功率因数时，首先应提高企业用电设备的自然功率因数，当采用提高自然功率因数措施后，仍不能达到电网合理运行要求时，应考虑采用人工补偿。

在工业企业中，采用电力电容器作为无功补偿装置时，宜用平衡补偿。容量较大，负荷平稳且经常使用的用电设备的无功功率宜单独就地补偿。下面就感应电动机采用电力电容器作为无功单独就地补偿装置时，对电力电容器容量的选择进行探讨。

感应电动机的无功补偿

1. 感应电动机无功功率就地补偿原理

因为在电容负载中产生的超前无功电流与在电感负载中产生的滞后无功电流能够相互补偿，所以在感应电动机电源终端并联一个适当容量的电容器，就可以使电动机所需的无功电流大部分由并联的电容器供给，从而最大限度地减少线损和释放系统容量，在某些情况下还可以缩小馈电线路的截面积，减少有色金属消耗。

投入补偿容量为 Q_c 的就地补偿电容器后，功率因数从 $\cos \varphi_c$ 提高到 $\cos \varphi'_c$ 。那么投入电容器的容量 Q_c 为多少，功率因数 $\cos \varphi'_c$ 提高到多少更为合理，值得认真地讨论和研究。

下图为感应电动机无功功率就地补偿相量图。

感应电动机在额定状态下运行时，

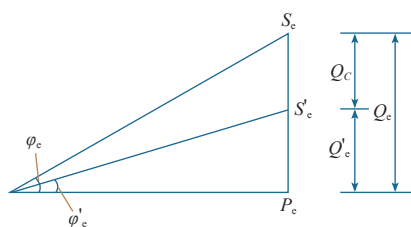


图 感应电动机无功功率就地补偿相量图

其额定无功功率 Q_c 为

$$Q_c = P_c \tan \varphi_c \quad (1)$$

式中, Q_c 为感应电动机额定无功功率量, kvar; P_c 为感应电动机有功功率, kW; φ_c 为额定功率因数角。

2. 感应电动机就地补偿容量的计算

正确合理地选择感应电动机就地补偿电容器容量 Q_c 的计算方法如下。

1) 按感应电动机的空载电流 I_0 选择 Q_c , 即

$$Q_c \leq \sqrt{3} U_c I_0 \quad (2)$$

感应电动机空载电流可用瑞典通用电气公司的方法求得

$$I_0 = 2I_c (1 - \cos \varphi_c) \quad (3)$$

$$Q_c = \sqrt{3} U_c I_0 = \sqrt{3} \times 2 \times \frac{P_c}{\eta_c \sqrt{3} U_c \cos \varphi_c} (1 - \cos \varphi_c) \\ = \frac{2P_c}{\eta_c \cos \varphi_c} (1 - \cos \varphi_c) = \frac{P_c}{\eta_c} \left(\frac{2}{\cos \varphi_c} - 2 \right) \quad (4)$$

式中, Q_c 为补偿的无功功率量, kvar; U_c 为感应电动机额定电压, kV; P_c 为感应电动机额定功率, kW; η_c 为感应电动机额定效率; I_0 为感应电动机空载电流或励磁电流值, A; $\cos \varphi_c$ 为感应电动机额定功率因数。

2) 选择电容器容量 Q_c 时需要考虑的因数。

从理论上讲, 当电容器容量选择小于式(4)的计算值时, 可以防止感应电动机自励磁过电压。但是由于电容器对电压特别敏感, 当其受到的电压超过其额定电压时, 气隙中电离现象的形成速度加快, 有功功率损耗增加, 使电介质击穿, 电容器损坏。电容器的主要缺点是损坏后不能修复, 因此, 在运行中必须严格监视加在电容器上的电压。同时, 电网的频率对电容器的输出也有影响。电容器的容量 $Q_c = \sqrt{3} U_c I_c$, I_c 为电容器初始放电电流。另有 $Q_c = 2\pi f C U_c^2$, 电容器 C 不变,

而实际电力系统电压和频率允许的偏差范围如下: 20 kV及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$; 电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 ± 0.2 Hz; 当系统容量较小时, 偏差限值可以放宽到 ± 0.5 Hz; 当电动机从电网中断开时, 由于惯性关系仍继续旋转, 使作为发电工况运行的异步感应电动机产生自励, 自励电压的大小与电动机技术特性、电容器容量及感应电动机旋转速度有关, 当感应电动机为空载且在过补偿条件下, 自励电压可能达到感应电动机额定电压的1.4~1.6倍。此外, 当感应电动机未停止转动重又投入工作时, 有可能产生约为感应电动机额定转矩20倍左右的瞬时扭矩。防止的办法是在将感应电动机与电网断开的同时, 也将电容器断开。这些因素必须考虑。

电压和频率波动时, 电容器的容量 Q_c 就有可能比标准状态下增大, 若在此时切断电源, 其初始放电电流也相应地增加, 增加的比例与 fU_c^2 成正比, 这就有可能使感应电动机产生自励磁过电压。因此, 在选择电容器的容量时必须相应地减少, 用系数 K_u 表示: 对6(10) kV和0.38 kV电压, $K_u = 0.865$ 。并联电容器要留有一定的安全裕度, 应考虑 K_0 (0.85~0.9)。对于电压等级为6 kV的电容器来说, 取 $K_0 = 0.85$; 对于电压等级为0.38 kV的电容器来说, 取 $K_0 = 0.90$ 。高压感应电动机 $\eta = (89 \sim 95)\%$; 低压感应电动机(考虑10 kW以上) $\eta = (88 \sim 97)\%$ 。这样综合系数 $K = K_u K_0 / \eta$ 。对于6(10) kV电压的电容器 $K = 0.77 \sim 0.82$; 对于0.38 kV电压的电容器 $K = 0.80 \sim 0.88$ 。

3. 防止低功率因数时 Q_c 偏大的计算公式

(1) 就地补偿电容器容量计算

理论分析表明, 当功率因数较低时, 用式(3)求出感应电动机空载电流 I_0 比实际值偏大得多, 因此, 用式(4)求出的容量 Q_c 也是偏大的, 这也可能造成感应电动机自励磁过电压。如何使所选电容器的容量既能满足补偿要求, 又能确保产生自励磁过电压, 经充分考虑上述因素和实际, 得出合理而又简单地选择就地补偿电容器容量计算公式

$$Q_c = K P_c \sin \varphi_c \tan \varphi_c \quad (5)$$

1) 计算公式 $Q_C = KP_e \sin \varphi_e \tan \varphi_e$ 的合理性。不同容量的功率因数 $\cos \varphi_e$ 及相应的 $\sin \varphi_e$ 、 $\tan \varphi_e$ 、 $(2/\cos \varphi_e - 2)$ 和 $\sin \varphi_e \tan \varphi_e$ 值如下表所示。从表中可以看出,采用式(5)(假定 $K=1$)中的 $\sin \varphi_e \tan \varphi_e$ 代替式(4)中的 $(2/\cos \varphi_e - 2)$ 求电容器的容量,数值可减少10% ($\cos \varphi_e = 0.8$) ~ 14% ($\cos \varphi_e = 0.72$),因此可克服用 $(2/\cos \varphi_e - 2)$ 求 Q_C 致使补偿电容器容量偏大的缺点。

表 $(2/\cos \varphi_e - 2)$ 与 $\sin \varphi_e \tan \varphi_e$ 两数值比较表

$\cos \varphi_e$	$\sin \varphi_e$	$\tan \varphi_e$	$2/\cos \varphi_e - 2$	$\sin \varphi_e \tan \varphi_e$
0.90	0.435 9	0.484 3	0.222 2	0.211 1
0.89	0.456 0	0.512 3	0.247 2	0.233 6
0.88	0.475 0	0.539 7	0.272 7	0.256 4
0.87	0.493 1	0.566 7	0.298 9	0.279 4
0.86	0.510 3	0.593 4	0.325 6	0.302 8
0.85	0.526 8	0.619 7	0.352 9	0.326 5
0.84	0.542 6	0.645 9	0.381 0	0.350 5
0.83	0.557 8	0.672 0	0.409 6	0.374 8
0.82	0.572 4	0.698 0	0.439 0	0.399 5
0.81	0.586 4	0.724 0	0.469 1	0.424 6
0.80	0.600 0	0.750 0	0.500 0	0.450 0
0.79	0.613 1	0.776 1	0.531 6	0.475 8
0.78	0.625 8	0.802 3	0.564 1	0.502 1
0.77	0.638 0	0.828 6	0.597 4	0.528 7
0.76	0.649 9	0.855 2	0.631 6	0.555 8
0.75	0.661 4	0.881 9	0.666 7	0.583 3
0.74	0.672 6	0.908 9	0.702 7	0.611 4
0.73	0.683 4	0.936 2	0.739 7	0.639 9
0.72	0.694 0	0.963 9	0.777 8	0.668 9

2) 为了不造成补偿容量过大,除考虑综合系数 K 以外,再乘以一个小于1的数值 $\sin \varphi_e$ 显然是合理的。乘以 $K \sin \varphi_e$ 后,式(1)即变成了式(5)。

3) 式(5)除以式(1)(假定 $K=1$),比值为 $\sin \varphi_e$ 。因此, $\sin \varphi_e$ 的数值反映了补偿的程度(占完全补偿的百分数)。这就把补偿容量的选择与补偿前的功率因数角直观地联系了起来,因此,式(5)的形式显然有明显的优点。

4) 从三角函数关系可知 $\cos \varphi_e$ 越小, $\sin \varphi_e$ 越大(此点从上表中也可看出)。这样,对于额定状态下功率因数 $\cos \varphi_e$ 越低的感应电动机, $\sin \varphi_e$ 值越大,也即所需补偿的电容量 Q_C 占全补偿电容量 $P_e \tan \varphi_e$ 的比例也就越大,这显然也是合理的。

(2) 补偿电容器规格的选定

电容器容量可根据式(5)直接计算而得;也可按感应电动机额定功率因数 $\cos \varphi_e$,查上表找出相对应的 $\sin \varphi_e \tan \varphi_e$,将其与 KP_e 相乘算得。然后按现有电容器规格,选择电压等级相符、容量接近并小于计算值的规格即可。

(3) 补偿后功率因数 $\cos \varphi_e'$ 的计算

按现有电容器规格选定 Q_C 后,可根据下式计算

$$\tan \varphi_e' = \frac{Q_e'}{P_e} = \frac{Q_e - Q_C}{P_e} = \tan \varphi_e - \frac{Q_C}{P_e} \quad (6)$$

按式(6)求出 $\tan \varphi_e'$,即可由三角函数表查得相应的 $\cos \varphi_e'$ 。

容量较大的感应电动机,功率因数较好,配置补偿电容相应可小一些;容量较小、极对数较多的感应电动机功率因数较差,补偿电容量比例可取大一些。无功补偿深度越深(补偿到的功率因数越大)需要的补偿容量越大,补偿的功率因数越趋近于1,所需要的补偿电容量迅速甚至成倍增加,而补偿减少的无功电流减少量却越有限。所以感应电动机不宜过深补偿,过深补偿是不经济的,也易造成自励过电压,故其剩余无功应采用集中补偿方法解决。

电动机就地无功补偿的计算实例

1. 感应电动机的参数

感应电动机额定功率为7 500 kW;感应电动机额定电压为10 kV;感应电动机额定电流为503 A;感应电动机额定功率因数为0.89;感应电动机额定效率为96.9%。

2. 感应电动机就地补偿电容器容量的计算

感应电动机空载电流按式(3)计算: $I_0 = 2I_e(1 - \cos \varphi_e) = 2 \times 503 \text{ A} \times (1 - 0.89) = 110.66 \text{ A}$ 。

感应电动机就地补偿电容器容量按式(4)计算: $Q_C = \sqrt{3} U_e I_0 = (1.732 \times 10 \times 110.66) \text{ kvar} = 1\,916.63 \text{ kvar}$ 。

应选择10 kV电容器的容量为:1 900 kvar。

3. 感应电动机就地补偿电容器容量的计算

感应电动机就地补偿电容器容量按式(5)

(下转第163页)

1) 考虑到线缆本身规格不达标以及线缆端接引起的线路电阻增大等不利因素的影响, 本文认为应该为这些不利因素预留10%的电压损失, 即按照20%的线路压降来计算不同导体截面积的电缆极限长度较合理。

2) 尽量将消防控制室设于小区中心, 使得消防控制室至每栋单体建筑的距离均不要过长, 以降低导线截面积。

3) 从本文正压送风机的电路图中可以看出, 消防控制室到各个正压送风机之间最少要敷设3芯电缆才能满足需求, 如果考虑备用, 则选用4芯电缆为宜, 即使每个正压送风机需要的电缆芯数不多, 但由于小区正压送风机数量往往很多, 则总的控制电缆用量很大, 从经济角度看不建议采用2.5 mm²及其以上截面积的导线。

4) 如果距离超过了1.5 mm²导线供电能力, 可以从以下两个方面来解决此问题: 一方面采用小功耗的中间继电器; 另一方面提高控制电压等级, 例如采用220 V。但是为了满足《火灾自动报警系统设计规范火规》第4.1.2条规定, 在消防控制室与建筑单体之间, 则必须增设电压转换装置。

(上接第139页)

计算: 由于 $\cos \varphi_c = 0.89$, 查上表可得 $\sin \varphi_c \tan \varphi_c = 0.2336$, 又对于6(10) kV电压的电容器, 有 $K = 0.77 \sim 0.82$; $Q_C = KP_c \sin \varphi_c \tan \varphi_c = (0.77 \sim 0.82) \times 7\,500 \times 0.2336 \text{ kvar} = 1\,349.04 \sim 1\,436.64 \text{ kvar}$ 。

应选择10 kV电容器的容量为1 300~1 400 kvar。

4. 补偿后功率因数 $\cos \varphi_c'$ 的计算

补偿后功率因数 $\cos \varphi_c'$ 按式(6)计算: 由于 $\cos \varphi_c = 0.89$, 查上表可得 $\tan \varphi_c = 0.512\,3$, $\tan \varphi_c' = Q_c'/P_c = (Q_c - Q_C)/P_c = \tan \varphi_c - Q_C/P_c = 0.512\,3 - 1\,900/7\,500 = 0.512\,3 - 0.253\,3 = 0.259\,0$ 。得 $\cos \varphi_c' = 0.968\,1$ 。

通过计算 $\cos \varphi_c' > 0.95$ (此值接近自励磁过电压点)。当电容器的容量按上述计算的投入, 感应电动机可产生自励磁过电压现象, 将直接危及感应电动机的安全运行。

另 $\tan \varphi_c' = Q_c'/P_c = (Q_c - Q_C)/P_c = \tan \varphi_c - Q_C/P_c =$

结束语

本文对建筑电气消防手动直接控制电缆截面选择问题进行了研究, 以正压送风机控制电路为例提出了消防手动直接控制电缆截面选择中, 应充分考虑中间继电器的功率问题, 给出了不同电压损失下24 V铜导体线路的极限长度, 同时给出了在实际设计时应该考虑的注意事项。

参考文献

- [1] 陈晓旭. 智能消防系统设计[J]. 电气应用, 2014, 33(2): 82-84.
- [2] 鞠永健. 消防栓泵远程控制分析[J]. 建筑电气, 2014(2): 15-22.
- [3] 中建国际设计顾问有限公司. 10D303—2常用风机控制电路图[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [4] 中国建筑标准设计研究院. 04DX 101—1建筑电气常用数据[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [5] 中机中电设计研究院有限公司. GB 50054—2011低压配电设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

$0.512\,3 - (1\,300 \sim 1\,400)/7\,500 = 0.512\,3 - (0.173\,3 \sim 0.186\,6) = 0.339\,0 \sim 0.325\,7$ 。得 $\cos \varphi_c' = 0.947\,1 \sim 0.950\,8$ 。

5. 感应电动机就地补偿电容器容量的选择

最后选择10 kV电容器的容量为1 300 kvar, 补偿后的功率因数约为0.95。

结束语

感应电动机采用无功功率就地补偿技术具有很多优点, 接线简单, 维护管理方便, 能有效地补偿配电变压器空载无功, 使该部分无功就地平衡, 从而提高配电变压器的利用率, 降低无功网损, 同时具有较高的经济性。选用电容器时应提出订货的特殊要求, 要求电容器标称电压比原来提高10%, 即高压为6.9 kV或11.5 kV, 低压为0.45 kV, 这样做可以提高电容器的使用寿命, 同时也简化了电容器的保护, 减少了电容器的事故率。

(收稿日期: 2015-10-01) EA