

[无功补偿]

化工企业无功补偿装置串联电抗器分析

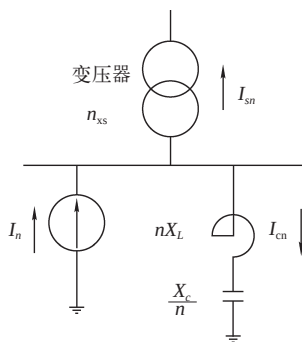
文/湖北省化学工业研究设计院 李长启

在化工企业中，设置电容无功补偿装置对提高功率因数、降低损耗有非常重大的作用。根据化工企业用电负荷特点和相关规范，分析了无功补偿装置中电抗器的选用原则，并就串联电抗器后电容器的参数选择做了论述。

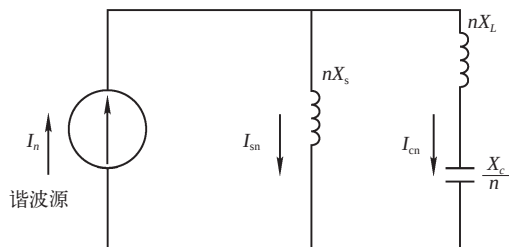
随着电力电子技术的广泛应用与发展，化工企业用电设备中存在大量产生谐波的非线性用电设备，主要有调速变频器、照明设备、UPS和EPS等。由于电网谐波电流的增加，不仅导致电压畸变，同时也对包括并联电容器在内的用电设备造成危害。在用于无功补偿的并联电容器中串联电抗器，可在一定程度上抑制谐波。本文以化工企业低压配电系统为应用背景，着重分析电抗率的选择，以及对串联电抗器后电容器的参数选择做了论述。

原理和分析

在低压系统母排上有非线性用电设备形成的谐波电流源时（略去电阻），在并联电容器装置中串联电抗器后的简化模型如图所示。



(a) 原理图



(b) 等效电路图

图 电容器装置侧有谐波源时的原理图和等效电路图

图中， X_s 是系统基波阻抗； X_c 是电容器组基波容抗； X_L 是串联电抗器基波电抗； n 是谐波次数； I_n 是谐波源产生的 n 次谐波电流； I_{sn} 是注入系统的 n 次谐波电流； I_{cn} 是电容器组的回路的 n 次谐波电流。

由等效电路图可得，并联谐波阻抗 Z_n 、流入系统的谐波电流 I_{sn} 和流入电容器组的谐波电流 I_{cn} 为

$$Z_n = \frac{nX_s(nX_L - \frac{X_c}{n})}{nX_s + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \quad (1)$$

$$I_{sn} = I_n \frac{nX_L - \frac{X_c}{n}}{nX_s + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \quad (2)$$

$$I_{cn} = I_n \frac{nX_s}{nX_s + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \quad (3)$$

系统谐波阻抗 nX_s 与系统最大、最小运行方式的短路容量有关。根据式(1)、式(2)可以看出 Z_n 的大小关键在于 X_L 与 X_C 的取值。现讨论如下。

当 $nX_L = X_C/n$ 时, $Z_n = 0$, 并联谐波阻抗为零, 表示电容器装置与电网在第 n 次谐波发生串联谐波。 n 次谐波电流全部流入无功补偿回路。电容器组可能会出现谐波过负荷现象。

当 $nX_L > X_C/n$ 时, $Z_n > 0$, 回路阻抗呈感性, 串联 X_L 可阻止谐波放大。

当 $nX_L < X_C/n$ 时, $Z_n < 0$, 回路阻抗呈容性, 系统和电容器两支路谐波电流都受到不同程度的放大(没有串联电抗器也属于此种情况); 特别是当 $nX_s = X_C/n - nX_L$ 时, 将产生谐波电流共振, 谐波电流被极度放大。

综上所述, 为避免谐波放大, 需满足条件 $nX_L > X_C/n$, 即 $K = X_L/X_C > 1/n^2$, 其中 K 为电抗率。根据上式, 当电抗率 K 已知时, 可以列出谐波次数 $n = \sqrt{1/k}$ 及谐振点与之对应关系, 如下表所示。

表 电抗率和谐振点的对应关系

电抗率(%)	折合谐波次数 n	谐振点频率/Hz
4.00	5.00	250
4.50	4.71	236
5.00	4.47	224
6.00	4.08	204
7.00	3.78	189
8.00	3.54	177
9.00	3.33	167
10.00	3.16	158
11.00	3.02	151
12.00	2.89	144
13.00	2.77	139
14.00	2.67	134

从上表可以看出, 当系统谐波为5次及以上时, 电抗率须 $\geq 4.5\%$; 当系统谐波为3~5次时, 电抗率须 $\geq 12\%$, 方可满足要求。

电抗率的选择

在化工企业中, 一般为三相平衡用电设备, 谐波源主要为调速变频器, 产生的谐波主要为5次及以上谐波。根据上表电抗率须 $\geq 4.5\%$, 另根据GB 50227—2017《并联电容器装置设计规范》规定, 电抗率宜取5%。故电抗率一般选用5%~7%。鉴于目前在电网系统设计及电容器厂家产品中, 采用7%电抗率较多, 笔者便以7%电抗率为例进行分析。

选用7%电抗率的系统分析

由上表可知, 若串联电抗器的电抗率为7%, 则回路抑制谐波的最低次数为3.78, 即7%串联电抗器可抑制4次及以上次数的谐波。根据GB 50227—2017《并联电容器装置设计规范》的第5.2.2条规定, 电容器的额定电压 U_c 应计入串联电抗器引起的电容器运行电压升高。

$$U_c = 1.05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3S}} \cdot \frac{1}{1-K} = 1.05 \times \frac{400}{\sqrt{3 \times 1}} \times \frac{1}{1-7\%} = \frac{452}{\sqrt{3}} \text{ V} \quad (4)$$

式中, U_c 是电容器的端子运行电压; U_s 是并联电容器装置的母线运行电压, 为0.4 kV; S 是电容器组每相的串联段数, 取1; K 是电抗率, 取7%。

经计算, 当电容器为三角形接线时, 串联电抗器后的电容器组额定电压应 ≥ 452 V。目前各厂家的电容器额定电压一般为480 V, 满足要求。也可理解为电容器组若串联7%电抗器, 则电容器的额定电压应选择480 V。若串联14%电抗器 U_c 应 ≥ 489 V, 目前各厂家的电容器额定电压一般为525 V, 满足要求。

确定了串联电抗器以及电容器额定电压后, 电容器组安装容量与实际输出容量是不同的。两者关系可按照下式计算

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{U_1^2}{U_2^2} \times \frac{1}{1-K} \quad (5)$$

式中, Q_2 是电容器输出容量; Q_1 是电容器安装容量; U_1 是电容器运行电压; U_2 是电容器额定电压。

以电容器额定电压480 V、电抗器电抗率7%为前提, 假设变压器容量为1 000 kV·A, 需要无功补偿容量为300 kvar (配电系统电压400 V时电容器输出容量)。

结束语

在化工企业中, 设置电容无功补偿装置对提高功率因数、降低损耗有非常重大的作用。因配电网中不可避免存在谐波, 合理选择电抗器的电抗率对系统谐波的抑制有很大影响。在条件允许时, 可通过对系统谐波进行测量, 选择正确的电抗率, 同时电容器的额定电压和容量要作相应的提高。在电容器组中串联电抗器的方式对谐波的抑制作用有限, 若系统中有大量谐波源 (比如有大量调速变频器), 可考虑设置有源滤波器。EA

(收稿日期: 2020.03.23)

(编辑: 朱金凤)