

串联电抗器及其电抗率的选取

陶梅¹, 江钧祥²

(1 电力工业电力电容器质量检验中心, 安徽合肥 230022 2 合肥华威自动化有限公司, 安徽合肥 230011)

摘要: 为了抑制谐波的危害, 在电容器回路中串联电抗器是有效的技术措施。分析与计算结果表明, 因串联电抗器的电抗率不同, 其流进电容器回路的谐波电流也截然不同。据此提出电抗率选取原则与方法, 电抗率选取宜根据主谐波次数、电容器组容量、母线短路容量以及装置的运行条件等因素综合考虑。

关键词: 并联电容器装置; 串联电抗器电抗率; 谐波电流; 谐波放大; 谐波谐振
中图分类号: TM47 **文献标识码:** B **文章编号:** 1674-1757(2010)03-0058-04

Selectio n of Series Reactor and Its Reactance Ratio

TAOMei¹, JIANG Jun-xiang²

(1. Electric Industrial Power Capacitor Quality Test Center, Hefei 230022, China;
2. Hefei Huawei Automation Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: In order to suppress the danger of harmonics, one effective measure is to put reactor in series in the capacitor circuit. Analysis and simulation results show that different harmonic currents flowing into the capacitor circuit is different due to different reactance ratio of series reactor. Based on this conclusion, this paper proposes the principle and method of selecting the reactance ratio and it is thought that selection of reactance ratio depends on such factors as the main harmonic frequency, capacitor capacity, short circuit capacity of bus and permissible operation conditions of the device.

Keywords: shunt capacitor devices; series reactor reactance ratio; harmonic current; harmonic amplification; harmonic resonance

0 引言

并联电容器装置具有投资省、损耗低、安装与运行维护简单等优点在电力部门与电力用户中得到广泛应用。

近年来, 由于非线性负荷的迅速增加, 注入电网的谐波电流亦相应增加, 导致电网电压畸变日益严重, 包括对并联电容器在内的各种电气设备造成危害, 影响他们的安全运行。同时电容器投入电网后, 会产生所谓“谐波放大”现象, 加剧谐波危害, 为了抑制这些现象的发生, 一般在电容器

回路中串联电抗器。另外, 为了抑制电容器装置的合闸涌流, 也常在电容器回路中串联电抗率为 0.1% ~ 1% 的电抗器。

在电容器回路中串联不同电抗率的电抗器, 其对谐波源所产生的各次谐波电流的作用是不相同的。实际上电抗器及其电抗率的选择与谐波源的大小、主要的谐波电流次数、电容器组的容量以及接入处的短路容量等因素有关。

1 并联电容器装置对电网谐波的影响

供电系统等值回路如图 1 所示。

收稿日期: 2009-04-09

作者简介: 陶梅 (1964-), 女, 工程师, 主要从事高压电器试验工作。

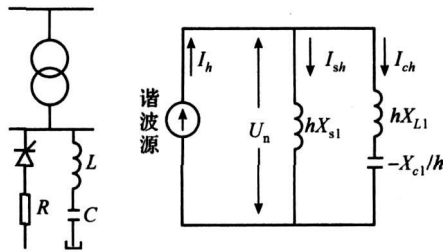


图 1 供电系统示意图与等值回路图

图中: X_1 —系统基波阻抗; X_C —电容器组基波容抗; X_s —串联电抗器基波电抗; h —谐波次数; I_h —谐波源产生的 h 次谐波电流; I_h —注入系统的 h 次谐波电流; I_h —电容器组回路的 h 次谐波电流; U_n —母线 h 次谐波电压。

由等值回路可得

$$I_h = \frac{hX_{s1} - X_C/h}{hX_1 + hX_{s1} - X_C/h} I_h \quad (1)$$

$$I_h = \frac{hX_{s1}}{hX_1 + hX_{s1} - X_C/h} I_h \quad (2)$$

根据串联电抗器电抗率 $k = X_s/X_C$, 代入式 (1) 与式 (2), 并整理后可得

$$I_h = \frac{X_1 (k - \frac{1}{k})}{X_1 + X_1 (k - \frac{1}{k})} I_h \quad (3)$$

$$I_h = \frac{X_1}{X_1 + X_1 (k - \frac{1}{k})} I_h \quad (4)$$

对于 k 取不同值, 并联电容器装置对电网谐波的影响可能出现下列几种情况:

1) $k=0$ 即没有串联电抗器时, 由于一般 $X_1 \gg X_C$, 所以 $I_h > I_h$ 也即注入系统的 h 次谐波电流得到放大。

2) $k - \frac{1}{k} = 0$ 这时 $I_h = 0$ $I_h = I_h$ 所有的 h 次谐波电流均进入电容器回路, 即为理想的滤波状态, 也就是所谓谐波串联谐振状态, 并联电容器装置应避免在此状态下运行。

3) $k - \frac{1}{k} > 0$ 这时 $I_h < I_h$ $I_h < I_h$ 也即电容器回路对 h 次谐波电流进行了分流, 注入系统的 h 次谐波电流得到抑制 (减少), 这是所要求的

运行状态。

4) $k - \frac{1}{k} < 0$ $X_1 + X_1 (k - \frac{1}{k}) \neq 0$ 这时

$I_h > I_h$ 也即注入系统的 h 次谐波电流得到放大, 使 h 次谐波电压增加。 I_h 为负值, 即电流方向与等值回路中标注方向相反。

5) $k - \frac{1}{k} < 0$ $X_1 + X_1 (k - \frac{1}{k}) = 0$ 这时,

$I_h \rightarrow -\infty$; $I_h \rightarrow +\infty$

也就是谐波电流 I_h 在电容器回路阻抗与系统阻抗之间发生并联谐振, I_h 得到极大的放大, 这是绝对需要避免发生的。

从上述讨论可知, 对同一系统, 由于 k 值不同, 其运行状况截然不同, 因此正确选择 k 值是十分重要的。

2 串联电抗器电抗率 k 值的选取

2.1 选取原则

1) 在并联电容器装置的允许运行条件 (包括缺台运行) 下, 对所需抑制的主谐波次数, 串联电抗器的谐波感抗与电容器组的谐波容抗之和应大于零;

2) 因为并联电容器装置不是滤波装置, 所以流入电容器支路的主谐波电流 I_h 宜控制在不超过主谐波电流 I_h 的 50% 以内, 即 $I_h \leq 50\% I_h$

3) 流过串联电抗器的总合成电流应不大于 $1.3 I_h$ 这是在 $1.1 U_n$ 作用下, 电容器组的基波电流与进入电容器支路的各次谐波电流的合成值。

即 $\sqrt{I_h^2 + \sum I_h^2} \leq 1.3 I_h$

4) 在任何运行工况 (包括缺台运行) 下, 均不得出现 “ $k - \frac{1}{k} = 0$ ” 与 “ $X_1 + X_1 (k - \frac{1}{k}) = 0$ ” 这

2 种工况;

5) 符合上述条件下, 选取较低电抗率为佳。

2.2 选取步骤

1) 对并联电容器装置接入点进行谐波测试, 以确定主谐波次数与各次谐波电流的大小。对主谐波为 3 次的, k 可在 0.12、0.13 中选取; 对主谐波为 5 次的, k 可在 0.045、0.05、0.06 中选取。

2) 根据电容器组的容量 Q 与并联电容器装置接入处的母线短路容量 S_h 计算对应于不同电

抗率 k 的流入电容器支路的各次谐波电流 I_h 一般可计算 3、5、7 次谐波电流即可。

由式 (4) 稍加变化可得

$$\frac{I_h}{I_1} = \frac{1}{1 + (k - \frac{1}{k}) \frac{X_q}{X_d}} \times 100\% \quad (5)$$

由于 $\frac{Q}{S_d} \approx \frac{X_q}{X_d}$

所以在 Q 、 S_d 已知的情况下, 可以根据不同的 k 与 h 计算得到 I_h / I_1 值。表 1 为根据不同的 Q_c / S_d 对应不同的 k 值计算 3、5、7 次谐波电流流入电容器回路的 I_h / I_1 百分数。

表 1 不同 k 值时对应 3、5、7 次谐波电流的 I_h / I_1 百分数

Q_c / S_d	h	k							
		0.13	0.12	0.06	0.05	0.045	0.01	0.001	0
		I_h / I_1							
0.005	3	20.93	36.00	-10.84	-8.91	-8.18	-5.20	-4.76	-4.71
	5	5.26	5.88	20.00	33.33	50.00	-20.00	-14.71	-14.29
	7	4.36	4.78	11.21	14.45	16.90	-92.45	-34.70	-32.45
0.01	3	34.62	52.94	-24.32	-19.57	-17.82	-10.98	-9.99	-9.89
	5	10.00	11.11	33.33	50.00	66.67	-50.00	-34.48	-33.33
	7	8.36	9.12	20.16	25.26	28.91	-24.50	-106.29	-96.08
0.015	3	44.26	62.79	-41.54	-32.53	-29.35	-17.42	-15.77	-15.61
	5	14.29	15.79	42.86	60.00	75.00	-100.00	-62.5	-60.00
	7	12.04	13.09	27.48	33.64	37.89	326.67	-340.28	-277.36
0.02	3	51.43	69.23	-64.29	-48.65	-43.37	-24.66	-22.19	-21.95
	5	18.18	20.00	50.00	66.67	80.00	-200.00	-105.26	-100.00
	7	15.43	16.72	33.56	40.33	44.85	208.51	3379.31	-4900.00
0.025	3	56.96	73.77	-95.74	-69.23	-60.81	-32.85	-29.37	-29.03
	5	21.74	23.81	55.56	71.43	83.33	-500.00	-178.57	-166.67
	7	18.57	20.07	38.70	45.79	50.41	171.33	447.08	544.44
0.03	3	61.36	77.14	-142.11	-96.43	-83.08	-42.19	-37.45	-36.99
	5	25.00	27.27	60.00	75.00	85.71	∞	-333.33	-300.00
	7	21.49	23.15	43.11	50.34	54.95	153.13	283.24	312.77

从表 1 中可知, 若需抑制 5 次谐波时:

$Q / S_d \leq 0.005$ 时, 可考虑选取 $k=0.045$

$0.005 \leq Q / S_d \leq 0.01$ 时, 可考虑选取 $k=0.05$

$0.01 \leq Q / S_d \leq 0.02$ 时, 可考虑选取 $k=0.06$

当需抑制 3 次谐波时:

$Q / S_d < 0.01$ 时, 可考虑选取 $k=0.12$

$Q / S_d \geq 0.01$ 时, 可考虑选取 $k=0.13$

由于投切电容器组会引起所在母线电压变动, 一般不宜超过母线电压的 2.5%, 而 $\Delta U / U \approx Q_c / S_d$ 所以电容器组的分组容量不宜过大。

从表 1 可知, 当 $Q / S_d > 0.02$ 时, 若 $k=0.06$

其 $I_5 / I_1 > 50\%$, 而且对 3 次谐波电流的放大比较严重。

3) 核算电容器支路的合成电流为 $I = \sqrt{I_1^2 + \sum I_h^2} \leq 1.3 I_1$ 是否成立

式中: I_1 为基波电流, 应考虑 1.1 U_n 与电容器组正偏差 (0 ~ +5%) 的综合作用, 所以 $I_1 = 1.1 \times (1 \sim 1.05) I_n = (1.10 \sim 1.16) I_n$

$$\sum I_h \approx I_3 + I_5 + I_7$$

一般, $I_n = I_1$

4) 根据并联电容器装置的设计与保护方式, 核算当电容器组因缺台运行后, 其容抗 X_c 增加为 X'_c , 而电抗器电抗率 k 下降为 k' 是否会出现

$k' - \frac{1}{h} \leq 0$ 的状况。式中 $k' = \frac{X_q}{X'_q} k$

$$k' - \frac{1}{h} = 0.0417 - \frac{1}{5} > 0$$

因此,在此方案中是可选取 $k=0.05$ 。

3 注意事项

1) 要防止因电容器容抗增加,引起电抗率下降而出现电容器回路阻抗与电源阻抗发生并联谐波谐振的可能,应根据装置的允许运行条件加以核算;

2) 因抑制涌流而串联电抗率为 0.001~0.01 的电抗器会导致 5 次与 7 次谐波电流的放大,严重时甚至可能出现并联谐振,这一点可以从表 1 中看到,应引起我们的注意。

4 结论

1) 串联电抗器电抗率的选取,应根据主谐波次数,电容器组容量,母线短路容量以及装置的允许运行条件等因素进行计算确定;

2) 高压并联电容器装置可能因各种原因在运行中出现容抗增加而导致电抗率下降的情况,在允许运行条件下应保证 $k - \frac{1}{h} > 0$ 避免出现串联谐振或并联谐振的情况;

3) 要控制流过电抗器的合成电流不超过 1.3 I_N ,特别是铁心电抗器。

参考文献:

- [1] 江钧祥. 安装使用并联电容器需防止高次谐波的危害[J]. 电力电容器, 1985(4): 3-11.
- [2] DL/T604-1996 高压并联电容器装置订货技术条件 [S].
- [3] DL/T462-1992 高压并联电容器用串联电抗器订货技术条件 [S].
- [4] 杨昌兴, 王敏, 赵启承, 等. 故障相电抗率变化对保护定值的影响[J]. 电力电容器, 2007(1): 26-33, 40.
- [5] 陈伯胜. 并联电容器、串联电抗器额定电压的选择 [J]. 电力电容器, 2004, 25(2): 17-20.
- [6] 鞠非. 无功补偿电容器串联电抗器的选择 [J]. 电力电容器, 2006, 27(6): 4-7.
- [7] 陈志伟. 一起 35 kV 串联电抗器短路故障分析及建议 [J]. 电力电容器, 2006, 27(3): 39-41.

例:如图 1 所示的系统中,谐波源的主谐波为 5 次,系统的母线电压为 10 kV,母线短路容量为 200 MVA,拟装设的并联电容器装置容量为 1 800 kVA,有外熔断器,允许缺台运行,要求确定串联电抗器的电抗率 k 由主谐波

$$h=5 \text{ 与 } \frac{X_q}{X'_q} \approx \frac{Q}{Q_i} = \frac{1\,800}{200\,000} = 0.009$$

根据式(5)计算可得

$$k=0.045 \text{ 时, } I_5 / I_3 = 64.29\%;$$

$$k=0.05 \text{ 时, } I_5 / I_3 = 47.37\%;$$

$$k=0.06 \text{ 时, } I_5 / I_3 = 31.03\%;$$

初步可确定 $k=0.05$ 时,下面分 2 种情况:

① 采用电容器型号为 BAM11/ $\sqrt{3}$ -50-1W,其允许外熔断器切除故障电容器台数 K_r ^[4,6] 为

$$K_r \leq \frac{3MN(B-1)}{B(3N-2)} \quad (6)$$

将 $M=12$, $N=1$, $B=1.1$ 代入式(6)

可得 $K_r \leq 3.27$

取 $K_r=3$ 即允许切除 3 台故障电容器^[7],切除 3 台故障电容器后,其容抗由 X_q 增加至 X'_q ,

即 $X'_q = \frac{4}{3} X_q$,所以这时串联电抗器的电抗率 k

降为 k'

$$k' = \frac{X_q}{X'_q} k = \frac{X_q}{\frac{4}{3} X_q} \times 0.05$$

$$k' = 0.0375$$

$$k' - \frac{1}{h} = 0.0375 - \frac{1}{5} < 0$$

因此可以认为 $k=0.05$ 不适合,宜考虑选取 $k=0.06$ 。

② 采用电容器型号为 BAM11/ $\sqrt{3}$ -100-1W,此时 $M=6$, $N=1$, $B=1.1$ 代入式(6)

可得 $K_r \leq 1.64$

取 $K_r=1$,即允许切除 1 台故障电容器,这时 $X'_q = 1.2 X_q$,

$$k' = \frac{X_q}{X'_q} k = \frac{X_q}{1.2 X_q} \times 0.05 = 0.0417$$