

无功补偿电容器谐波过载保护的研究

王效华¹, 张咏梅²

(1. 武夷学院电子工程系, 福建 武夷山 354300; 2. 济源职业技术学院机电系, 河南 济源 454650)

摘要: 对电容器的谐波过载进行了分析, 以及分析了谐波的危害和对电网的谐波放大的问题。提出了在电容器过电压保护和过电流保护中考虑谐波影响的整定计算方法, 针对电容器的谐波过载问题, 提出了谐波过电压和谐波过电流的保护整定计算方法。

关键词: 无功补偿电容器; 谐波; 谐波放大; 谐波过载; 限值

Study of the reactive compensation capacitor harmonics over-load protection

WANG Xiao-hua¹, ZHANG Yong-mei²

(1. Wuyi University, Wuyishan 354300, China; 2. Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 454650, China)

Abstract: This paper analyzes the harmonics over-load of capacitor, and introduces harm of harmonic and the problem of power system harmonics enlarging. It provides the methods of setting calculation for over current and over voltage protection. Particularly on the problem of harmonic's over load, it proposes the methods of setting calculation for harmonic's over current and over voltage protection.

Key words: reactive-load capacitor; harmonics; harmonics enlarging; harmonics over-load; limited value

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0025-05

0 引言

随着现代工业技术的不断进步发展, 换流设备和电弧炉等非线性用电设备在冶金、化工、电气化铁路和直流输电技术等领域得到了广泛应用, 为带动经济的发展起到了积极的作用。但由于这些负荷会产生大量的谐波, 造成电网电压波形畸变, 使电能质量下降, 给发供电设备的安全经济运行造成较大影响。无功补偿电容器组主要用于补偿基波无功功率, 但是当谐波作用于电容器时, 既可能使电容器回路吸收谐波, 改善电能质量; 也有可能使电容器回路出现谐波放大, 使电压质量变坏。决定谐波的吸收或放大的因素是多方面的, 其主要因素可以归纳为三个方面: ①电容器组的参数配置; ②电网的背景谐波水平和所带负荷的性质, ③电力网络情况。在一定条件下, 谐波对电容器组的运行影响很大, 严重时可能导致电容器组因过流而退出运行, 这样既不能有效地补偿无功功率, 导致功率因数下降及线损增加; 又造成了电容器设备投资的浪费。据调查, 大约有 60% 的无功补偿电容器受到了谐波的影响, 其中有些电容器组已严重损坏。鉴

于这种情况, 开展对无功补偿电容器谐波过载问题的研究是非常必要的。

1 谐波过载对电容器的危害

非线性设备的大量使用使得电力系统中的谐波问题日益严重, 对电力系统设备和负载的影响是巨大的, 其中以谐波对无功补偿电容器组的影响尤为突出, 具体的表现有以下几种形式:

(1) 电容器由于谐波电流而过载, 因为电容器的容抗随着频率的升高而减小, 这使得电容器成为谐波的吸收点。同时, 谐波电压产生的谐波电流会引起电容器熔丝熔断。

(2) 谐波往往会使介质损耗增加, 其直接后果是使电容器组的发热量增加、使用寿命缩短。

(3) 电容器有可能与电网中的电感结合, 对某一谐波频率构成并联谐振, 或使谐波被严重放大, 最终的电压会大大高于电压额定值, 并导致电容器损坏或熔丝熔断。

(4) 电容器还有可能与电网中的电感结合, 对某一谐波频率构成串联谐振电路, 造成电容器谐波电流过载, 导致电容器的损坏。

电网谐波对并联电容器的运行具有较大的影响,当谐波电流叠加在电容器的基波电流上,可使电容器的运行电流有效值增加,温升增高,甚至引起过热而降低电容器的使用寿命或使电容器损坏;叠加在电容器基波电压上的谐波电压,不仅使得电容器的运行电压的有效值增大,而且会使电容器的峰值电压增大,使电容器在运行中发生局部放电,这往往是电容损坏的主要原因。据统计由于谐波而损坏的电气设备中,电容器约占40%,其串联电抗器约占30%,而其他被损坏的电气设备也有一部分与电容器有很大关系。因此,电容器对电网谐波电流的放大是一个不可忽视的问题。某铝厂的电容器串联6%的电抗器,对电网3次谐波电流放大达22倍,最终导致电容器损坏;石家庄电化厂的电容器对5次、7次谐波电流放大分别达2.6和5.7倍,使该厂的多台异步电动机因谐波过载而损坏。因此,对于电容器的谐波问题研究,一方面要认识谐波对电容器、电抗器的承受谐波的能力,另一方面,也是更重要的方面就是要认识电容器对谐波电流的放大作用,合理配置电容器和电抗器,避免发生谐振,控制谐波电流放大,从而保证电容器、电抗器和整个电网的安全运行。

2 电容器谐波电压和谐波电流的限值

电容器国标 GB/T11024.1-2001 对电容器的过载规定有四个内容:过电压、过电流、过载容量和谐振过电压。值得注意的是该规定比旧国标和 IEC 的规定严格,正确认识和使用该规定,对于保证电容器的安全运行是必要的。

电容器过电压规定如表 1,该表只规定了工频过电压,谐波过电压要受谐波过电流规定约束。

表 1 电容器过电压规定

Tab.1 The specification of capacitor over voltage

电压工频有效值	1.0	1.10	1.15	1.20	1.30
允许时间	24h 连续	8h/24h	30 min/24h	5 min	1min
谐波加工频电压	使电流不超过电容器过电流的规定				

按照国家标准的要求,电容器的电压 $U_C \leq 1.1U_N$, 即 $\sqrt{U_1^2 + U_H^2} \leq 1.1U_N$, U_N 为电容器的额定电压,取电容器的基波电压 $U_1 = U_N$, 则:

$$U_1^2 + U_H^2 \leq 1.21U_1^2 \quad (1)$$

$$U_H^2 \leq 0.21U_1^2 \quad (2)$$

$$\text{即: } U_H \leq 0.458U_1$$

按照国家标准的要求,电容器的电流

$$I_C = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \leq 1.3I_1,$$

$$\text{则有: } I_H^2 \leq (1.3I_1)^2 - I_1^2 = 0.69I_1^2 \quad (3)$$

$$\text{即: } I_H \leq 0.83I_1 \quad (4)$$

假设电容器电压和电流中只含有某一种谐波,谐波的次数为 h ,且该次谐波电压的含有率为 k ($k \leq 0.458$),则对应的谐波电流为

$$I_h = \frac{U_h}{\omega_h C} = h\omega_1 C U_h = h\omega_1 C \times k U_1 = kh\omega_1 C U_1 = khI_1 \quad (5)$$

依次取 $k=0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45$,计算出对应的单次谐波电流限值如表 2 所示。

表 2 单次谐波电流限值

Tab.2 The current of single harmonic limited value

k	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}	I_{17}
0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	$\geq 0.83I_1$
0.10	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	$\geq 0.83I_1$								
0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	$\geq 0.83I_1$											
0.20	0.4	0.6	0.8	$\geq 0.83I_1$												
0.25	0.5	0.75	$\geq 0.83I_1$													
0.30	0.6	$\geq 0.83I_1$														
0.35	0.7	$\geq 0.83I_1$														
0.40	0.8	$\geq 0.83I_1$														
0.45	$\geq 0.83I_1$															

说明:表中值为 I_1 的倍数,要求 $I_h \leq 0.83I_1$ 。

从表 2 可以看出,在只考虑单次谐波的情况下,即使谐波电压不超标,但谐波电流也可能超标。比如当电容器上的 9 次谐波电压含有率达到 10% 时,电容器中的 9 次谐波电流就会超标。还可以看出,随着谐波次数的增大,各单次谐波电压含有率 (K_h) 的允许值将减小。按照国家标准的要求,电容器单

次谐波电流 $I_h \leq 0.83I_1$, 可以推得:

$$K_h \leq \frac{0.83}{h} \quad (h = 2, 3, 4, 5, \dots, 25)$$

表 3 列出了电容器的各单次谐波电压含有率 (K_h) 的允许值。

表 3 单次谐波电压含有率

Tab.3 The ratio of single harmonic voltage content

h	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
K_h	0.4	0.28	0.2	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.068	0.064
h	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
K_h	0.059	0.055	0.052	0.049	0.046	0.043	0.041	0.039	0.037	0.036	0.034	0.033

3 电容器过电流过电压保护的整定计算

为了避免因谐波过载引起电容器故障,在电容器保护的整定计算时考虑谐波的因素是很有必要的。下面就根据对电容器谐波过载的分析和有关国标中规定的谐波限值,分别讨论电容器的过电流保护和过电压保护的整定计算问题。

3.1 电容器过电压保护的整定计算

电容器的过电压保护应分别取三个相电压。当任一相电压达到或超过整定值时,过电压保护带延时动作于信号或切除整组电容器,其判据为:

$$U_A \text{ 或 } U_B \text{ 或 } U_C \geq U_{\text{set}} \quad (6)$$

$$\text{且 } t \geq T_{\text{set}}$$

式中: U_{set} 和 T_{set} 分别是过电压保护的电压整定值和时间整定值。

根据电容器的国家标准 $U_c = 1.10U_N$ 时,允许每 24 h 中工作 8 h,因此,对于电力系统中的无功补偿电容器而言,当 $U_c \leq 1.10U_N$ 可以正常工作;当 $U_c > 1.10U_N$ 时,过电压保护应该动作于信号或带延时动作于跳闸。

根据前面的分析,考虑到谐波的因素,过电压保护的电压整定值可按下式确定:

$$U_{\text{set}} = K_K \sqrt{U_1^2 + \sum_{i=2}^h U_i^2} = 1.1K_K U_N \quad (7)$$

K_K 为可靠系数,取 1.05。

过电压保护的时间整定值取 3~5 min,即 $T_{\text{set}} = 3 \sim 5 \text{ min}$ 。

3.2 电容器过电流保护的整定计算

考虑到电网谐波的不对称性,电容器的过电流保护分别应取三相电流。当任一相电流达到或超过整定值时,过电流保护应该动作于信号或带延时动

作于跳闸,其判据为:

$$I \geq I_{\text{set}} \quad (8)$$

$$\text{且 } t \geq T_{\text{set}}$$

式中: I_{set} 和 T_{set} 分别是过电流保护的电流整定值和时间整定值。

根据电容器国家标准规定,电容器电流 $I_c \leq 1.3I_N$ 时,可以连续运行,当电容器电流 $I_c > 1.3I_N$ 时,过电流保护装置应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。考虑到谐波的因素,过电流保护的电流整定值可按下式确定:

$$I_{\text{set}} = K_K \sqrt{I_1^2 + \sum_{i=2}^h I_i^2} = 1.3K_K I_N \quad (9)$$

K_K 为可靠系数,取 1.2~1.3。

过电流保护的时间整定值取 3~5 min,即 $T_{\text{set}} = 3 \sim 5 \text{ min}$ 。

目前有一些电容器组只在 A、C 相装电流互感器, B 相未装电流互感器,如果 B 相的谐波过载时,过电流保护将不能启动。因此,建议补偿电容器组的三相都装设电流互感器。

3.3 并联电容器的谐波保护

如果在补偿电容器附近有容量较大的非线性负荷,或者因为参数配合不当,产生了谐波放大,都有可能使电容器中会出现较大谐波电流。为了避免电容器谐波过载,除了配置常规的保护之外,还应该配置专门谐波过电压和谐波过电流保护。根据对电容器的谐波过载分析,提出以下几种整定计算方法:

3.3.1 单次谐波过电压保护

电容器的单次谐波过电压保护分别应取三相单次谐波电压。当任一相单次谐波电压达到或超过整定值时,单次谐波过电压保护就动作于信号或带延时限动作于跳闸。其判据为:

$$U_{Ah} \text{ 或 } U_{Bh} \text{ 或 } U_{Ch} \geq U_{seth} \quad (10)$$

$$\text{且 } t \geq T_{seth}$$

式中: U_{seth} 和 T_{seth} 分别是单次谐波过电压保护的电压整定值和时间整定值。

根据对电容器电压限值的计算, 电容器的单次谐波限值 $U_h \leq \frac{0.83}{h} U_N$ 。因此, 对于电力系统中的电

容器而言, 当 $U_h \leq \frac{0.83}{h} U_N$ 电容器可以正常工作;

当 $U_h > \frac{0.83}{h} U_N$ 时, 单次谐波过电压保护应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。

根据前面的分析, 对于单次谐波过电压保护的电压整定值可按式确定:

$$U_{seth} = K_K \frac{0.83}{h} U_N = K_K \frac{0.83}{h} U_N \quad (11)$$

K_K 为可靠系数, 取 1.1。

单次谐波过电压保护的时间整定值取 5 s, 即 $T_{seth} = 5$ s。

3.3.2 总谐波过电压保护

电容器的总谐波过电压保护应分别取三个总谐波相电压 (只含各次谐波)。当任一相总谐波电压达到或超过整定值时, 总谐波过电压保护应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。其判据为:

$$U_{AH} \text{ 或 } U_{BH} \text{ 或 } U_{CH} \geq U_{setH} \quad (12)$$

$$\text{且 } t \geq T_{setH}$$

式中: U_{setH} 和 T_{setH} 分别是总谐波过电压保护的电压整定值和时间整定值。

根据对电容器总谐波限值的计算, 当 $U_H \leq 0.21 U_N$ 时, 电容器可以正常工作; 当 $U_H > 0.21 U_N$ 时, 总谐波过电压保护就应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。

根据前面的分析, 对于总谐波过电压保护的电压整定值可按式确定:

$$U_{setH} = K_K U_H = K_K 0.21 U_N = 0.21 K_K U_N \quad (13)$$

K_K 为可靠系数, 取 1.1。

总谐波过电压保护的时间整定值取 3~5 s, 即 $T_{setH} = 3 \sim 5$ s。

3.3.3 单次谐波过电流保护

考虑到电网谐波的不对称性, 电容器的单次谐波过电流保护应分别取三个单次谐波相电流。当任一相单次谐波电流达到或超过整定值时, 单次谐波过电流保护应该动作于信号或带延时限动作于跳

闸。其判据为:

$$I \geq I_{seth} \quad (14)$$

$$\text{且 } t \geq T_{seth}$$

式中: I_{seth} 和 T_{seth} 分别是单次谐波过电流保护的电流整定值和时间整定值。

根据对电容器单次谐波限值的计算, 当电容器的单次谐波电流 $I_h \leq 0.83 I_N$ 时, 可以正常运行, 当电容器电流 $I_h > 0.83 I_N$ 时, 单次谐波过电流保护装置应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。根据前面的分析, 对于单次谐波过电流保护的电流整定值可按式确定:

$$I_{seth} = K_K I_h = K_K 0.83 I_N \quad (15)$$

K_K 为可靠系数, 取 1.2~1.3。

单次谐波过电流保护的时间整定值取 3~5 s, 即 $T_{seth} = 3 \sim 5$ s。

3.3.4 总谐波过电流保护

考虑到电网谐波的不对称性, 电容器的总谐波过电流保护应分别取三个总谐波相电流 (只含各次谐波)。当任一相总谐波电流达到或超过整定值时, 当任一相总谐波电流达到或超过整定值时, 总谐波过电流保护应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。其判据为:

$$I \geq I_{setH} \quad (16)$$

$$\text{且 } t \geq T_{setH}$$

式中: I_{setH} 和 T_{setH} 分别是总谐波过电流保护的总谐波电流整定值和时间整定值。

根据前面分析计算, 电容器总谐波电流 $I_H \leq 0.83 I_N$ 时, 可以正常运行, 当电容器总谐波电流 $I_H > 0.83 I_N$ 时, 总谐波过电流保护应该动作于信号或带延时限动作于跳闸。对于总谐波过电流保护的电流整定值可按式确定:

$$I_{setH} = K_K I_H = K_K 0.83 I_N \quad (17)$$

K_K 为可靠系数, 取 1.2~1.3。

总谐波过电流保护的时间整定值取 3~5 s, 即 $T_{setH} = 3 \sim 5$ s。

4 结论

综上所述, 考虑了谐波的因素之后, 电容器保护要比低压线路的保护更为复杂, 如果这几种类型的保护配置都还采用常规的电磁型继电器来实现的话, 就必须增加多个继电器, 使得电容器保护的结

构复杂,体积增大,调试维护都不方便。为了解决以上问题,可以采用微机技术,研究一种电容器综合保护装置替代常规的电容器保护装置。尽管如此,不可能全部保护,保护在滤波、检测的基础上,把最有可能过载的谐波次数进行保护,根据数据显示建议一般过载保护到19次谐波即可。

参考文献

- [1] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LUO An. Harmonic Control of Power Network and Equipment of Var Compensation Technical[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [2] 王莉娜, 等. 工厂供电系统谐波谐振的抑制[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (20): 41-44.
WANG Li-na, et al. Inhibition of Factory Power Supply System Harmonic Wave of Resonance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (20): 41-44.
- [3] 林干, 等. 智能型电网谐波监视分析及保护一体化装置[J]. 电力系统自动化, 2001, 24 (1): 64-66.
LIN Gan, et al. An Intelligent Instrument for Integrated Harmonic Detection, Analysis and Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 24 (1): 64-66.
- [4] 吴竟昌, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
WU Jing-chang, et al. Power System Harmonics[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.
- [5] 孙树勤, 等. 干扰性负荷的供电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
SUN Shu-qin, et al. Power Supply of Resistance Interference Load[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [6] 周勇. 电网谐波源分析[M]. 北京: 中国人口出版社, 1995.
ZHOU Yong. Analysis of Power System Harmonic Wave Sources[M]. Beijing: Population of China Publishing House, 1995.
- [7] 电力系统谐波—基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械出版社, 2003.
Power System Harmonic Wave—Basic Principles, Analytical Method and Filter Design[M]. XU Zheng, Trans. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [8] 卢本平. 电容器组的谐波过载能力[J]. 电力电容器, 1997.
LU Ben-ping. Ability of Capacitors Group Harmonics Over Load[J]. Electric Power Capacitor, 1997.
- [9] 梁宗. 高压并联电容器稳态过载能力分析[J]. 电力电容器, 1997.
LIANG Zong. Analysis of Ability of High Voltage Parallel Capacitors Stable Overload[J]. Electric Power Capacitor, 1997.
- [10] 沈文琪. 高电压并联电容器耐受谐波的能力[J]. 电力电容器, 1997.
SHEN Wen-qi. Ability of High Voltage Parallel Capacitors Tolerance of Harmonic Wave[J]. Electric Power Capacitor, 1997.
- [11] 孙生鸿, 等. 谐波及无功电流的直接检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (19): 52-55.
SUN Sheng-hong, et al. Harmonic and Reactive Currents Detection for Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (19): 52-55.
- [12] 王效华. 无功补偿电容器谐波过载问题的研究(硕士学位论文)[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
WANG Xiao-hua. Studying of the Reactive Compensation Capacitor Harmonics Over-load, Thesis[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [13] 邵斌, 李柄. 谐波电流对低压并联电容器的危害[J]. 电力学报, 2001, 16(1).
SHAO Bin, LI Bing. Damage of Harmonic Electric Current Duplet Low Voltage Parallel Capacitors[J]. Journal of Electric Power, 2001, 16(1).
- [14] 褚宏旭, 贾敏娟. 电容器组谐波谐振及谐波放大的研究[J]. 锦州师范学院学报(自然科学版), 2003, 24(3).
ZHU Hong-xu, JIA Min-juan. Study on Harmonic Resonance and Harmonic Enlargement of Power Network Capacitor Bank[J]. Journals of Jinzhou Teachers Institute (Natural Sciences Edition), 2003, 24(3).

收稿日期: 2007-12-20; 修回日期: 2008-03-28

作者简介:

王效华 (1963-), 男, 工学硕士, 工程硕士, 副教授, 主要研究方向为单片机、PLC 以及电力系统及自动化; E-mail: wxh321@163.com

张咏梅 (1972-), 女, 工程硕士, 讲师, 研究方向为单片机、PLC 及电气自动化的研究。