

【信息技术与控制工程】

SVC 静止无功补偿装置 在轧钢供电系统中的应用

舒延国

(重庆三环监理咨询有限公司, 重庆 400000)

摘要:针对重钢新区 SVC 无功静态补偿装置应用非常广泛,而作为无功补偿先进技术,值得深入探讨。文中从理论上分析了重庆钢铁集团 1780 热轧机电源的供电回路中静态无功补偿装置,对该无功补偿装置各滤波器进行校核,得出该装置中无需为三次谐波设置单独滤波器,对无功平衡进行了计算,为无功补偿装置应用提供重要依据。

关键词:SVC; 轧钢; 无功补偿

中图分类号:TM714.3

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2012)06-0125-04

SVC(Static Var Compensator),是静止无功补偿装置的简称,区别于传统无功补偿方式(通过开关投切电容器或通过分接开关调节电容器端电压),SVC 属于动态无功补偿产品,它具有最快 10 ms 的响应速度。SVC 成套装置一般由可调电抗(通过可控硅单元或硅阀调节),FC 无源滤波,以及控制和保护系统组成。目前,根据可调电抗器的调节方式及工作原理不同,又可分为 TCR 型(晶闸管控制的电抗器)、TCT 型(晶闸管控制的变压器)、MCR 型(磁控电抗器)3 种类型。

重庆钢铁集团 1780 热轧机电源为 35 kV 三个回路进行供电,其中两个回路作为工作电源为,另一回路作为备用。在两个工作回路上装设有 SVC 装置,以对该厂生产过程中所产生的感性无功进行动态补偿。同时,能够滤除有害的谐波电流。

1 谐波产生的原因

在大型冶金轧机中多采用交-交变频供电的同步电动机驱动,在变频器的变流过程中,电源波形失去正弦形状而呈阶梯形。典型波形见图 1。

在图中,(a)图为六脉冲交流电路,整流变压器为 Y/Y 组别,变压器原边的 A 相电流波形,B 相和 C 相分别滞后它 $\pi/3$ 和 $4\pi/3$ 电角度。(b)图中为六脉冲,变压器组别为 Y/ Δ ,变压器的原边电流波形。(c)图中为 12 脉冲,变压器组别为 Y/Y $\cdot\Delta$,变压器原边电流的波形。

由傅里叶级数理论,图 1 中 (a)图、(b)图、(c)图按奇函数展开为:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin nx)$$

$$\text{其中, } b_x = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin nx dx$$

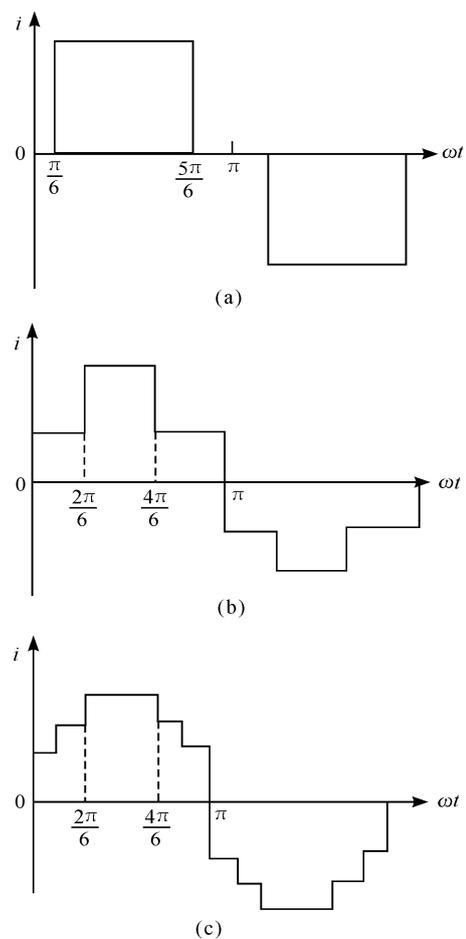


图 1 电源波形示意图

收稿日期:2012-04-15

作者简介:舒延国(1985—),男,主要从事信息科学与控制工程研究。

对于(a)图,(b)图有

$$f(x) = b_1 \sin x + b_5 \sin 5x + b_7 \sin 7x + b_{11} \sin 11x + b_{13} \sin 13x + \dots$$

其中,则为基波幅值, $b_1, b_5, b_7, b_{11}, b_{13}$ 为 1 次、5 次、7 次、11 次、13 次谐波幅值。

基波用于做功,其余其次谐波将污染电源,必须将其滤除。从值的表达式,可以看出 $=1/n$,可见 17 及 19 次谐波幅值较小,对电源危害不大,在滤波器设计时可以将其忽略。

对于(c)图,将其展开为:

$$f(x) = b_1 \sin x + b_{11} \sin 11x + b_{13} \sin 13x + \dots$$

可见,采用 12 脉冲变流电路,将 5、7 次谐波滤除,总的谐波成份将减少很少。

由上分析可知,治理谐波主要对 b_5, b_7, b_{11}, b_{13} , 必须把它们从电源中滤除。

2 滤波器工作原理

图 2 中表示了无源滤波器结构,当电抗和电容参数配置满足频率 f 谐振,且 $i_1(f), i_2(f), i_3(f)$ 为三相对称,则它们就流进滤波器;对于“0”点,有:

$$i_1(f) + i_2(f) + i_3(f) = 0$$

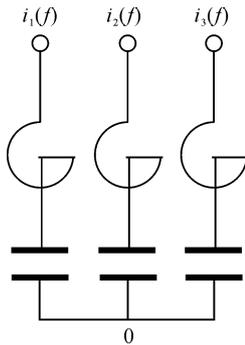


图 2 无源滤波器基本结构

这时,该次谐波就能被滤除。由前面分析所知,谐波电流为电流源生成,故在滤波过程中,只有少许由于自身体阻抗损耗。

前面列出的 5 次、7 次、11 次、13 次谐波均满足式 $i_1(f) + i_2(f) + i_3(f) = 0$,故均可被滤除。其它次谐波如 h_3, h_6, h_9 等,为零序分量,无法进行滤除。

由此可见,滤波器对特定谐波起到滤波的作用,在接在 50 Hz 电源上,有电流产生,一般呈容性,又能起到无功静止补偿作用。

3 滤波器校核

3.1 滤波器

结构简图如图 3 所示。

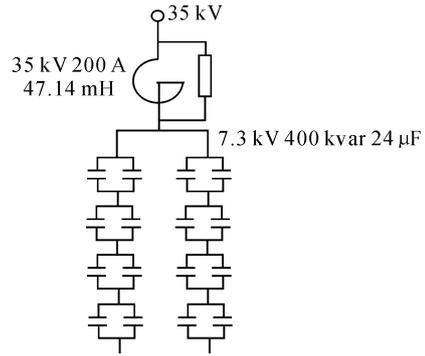


图 3 三次谐波滤波器结构

电抗器参数:35 kV 200 A 47.14 mH

电容器参数:7.3 kV 400 kvar 24 μF

电容器额定电流: $I_e = 400/7.3 = 54.8$ A

可允许长期电流: $I = 4I_e = 219.2$ A

等效电容值(4 并 4 串): $C = 24$ μF

电容可承受电压: $U = 4 \times 7.3 = 29.2$ kV

当频率为 $f = 50$ Hz

电抗值:

$$X_L = 2\pi fL \approx 2 \times 3.14 \times 50 \times 47.14 \times 10^{-3} = 14.79 \Omega$$

容抗值:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \approx \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 50 \times 24} = 132.69 \Omega$$

相电流:

$$I = U / (X_C - X_L) = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{(132.69 - 14.79)} = 171.4$$
 A

电容器实际承受电压 U_c

由于 $U = I(X_C - X_L)$, 即 $U_c = U + IX_L = 22.74$ kV, 相位图见图 4。

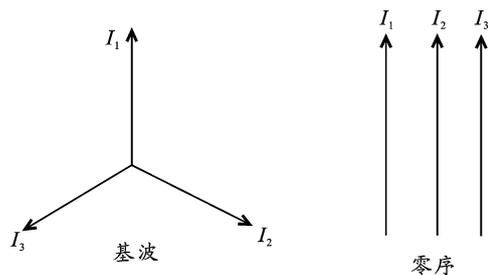


图 4 三次谐波相位

从上面计算,电抗器、电容器均不过载,也不过压。

补偿量计算:

$$Q_c = 3I^2(X_L - X_C) = 3 \times (171.4)^2 \times (132.69 - 14.79) = 10390.98$$
 kvar

由于 h_3 滤波器的电流为零序,则设置该滤波器有原理性错误,故不做谐振校核。

3.2 h_5 滤波器

结构简图如图 5 所示。

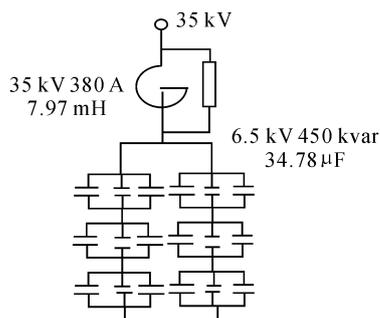


图5 五次谐波滤波器结构图

电抗器参数:35 kV 380 A 7.97 mH
 电容器参数:6.5 kV 450 kvar 34.78 μF
 电容器额定电流: $I_c = 450/6.5 = 69.2$ A
 可允许长期电流:

$$I = 6I_c = 6 \times 69.2 \text{ A} = 415.2 \text{ A}$$

等效电容值(6并4串):

$$C = 6/4 \times 34.78 = 54.17 \mu\text{F}$$

容可承受电压:

$$U = 4 \times 6.5 = 26 \text{ kV}$$

当频率为 $f = 50$ Hz,

电抗值:

$$X_L = 2\pi fL \approx 2 \times 3.14 \times 50 \times 7.97 \times 10^{-3} = 2.503 \Omega$$

容抗值:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \approx \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 50 \times 54.17} = 61.04 \Omega$$

相电流:

$$I = U / (X_C - X_L) = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{(61.04 - 2.503)} = 345.22 \text{ A}$$

电容器实际承受电压 U_c

由于 $U = I(X_C - X_L)$, 即 $U_c = U + IX_L = 21.071$ kV, 相位图见图4。

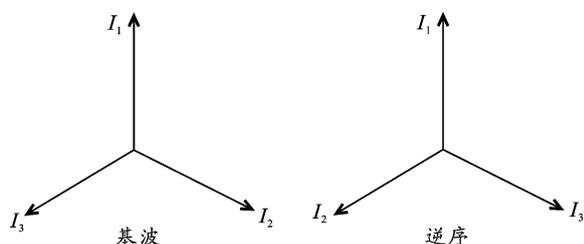


图6 五次谐波相位

上面计算,电抗器、电容器可长期工作。

补偿量计算:

$$Q_c = 3I^2(X_L - X_C) = 3 \times (415.2)^2 \times (61.04 - 2.503) = 20\,928.77 \text{ kvar}$$

h_5 滤波器谐振校核:

$$X_L = 5 \times 2.503 = 12.515 \Omega$$

$$X_C = 1/5 \times 61.04 = 12.208 \Omega$$

由此可见, h_5 滤波器基本谐振。

3.3 h_7 滤波器

结构简图如图7所示。

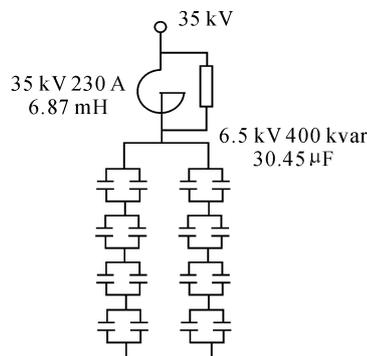


图7 七次谐波滤波器结构

电抗器参数:35 kV 230 A 6.87 mH
 电容器参数:6.5 kV 400 kvar 30.45 μF
 电容器额定电流: $I_c = 400/6.5 = 61.5$ A
 可允许长期电流: $I = 4I_c = 246$ A

等效电容值(4并4串): $C = 30.45 \mu\text{F}$

电容可承受电压: $U = 4 \times 6.5 = 26$ kV

当频率为 $f = 50$ Hz,

电抗值:

$$X_L = 2\pi fL \approx 2 \times 3.14 \times 50 \times 6.87 \times 10^{-3} = 2.16 \Omega$$

容抗值:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \times \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 50 \times 30.45} = 104.59 \Omega$$

相电流:

$$I = U / (X_C - X_L) = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{(104.59 - 2.16)} = 197.26 \text{ A}$$

电容器实际承受电压 U_c

由于 $U = I(X_C - X_L)$, 即 $U_c = U + IX_L = 20.63$ kV, 相位图见图8。

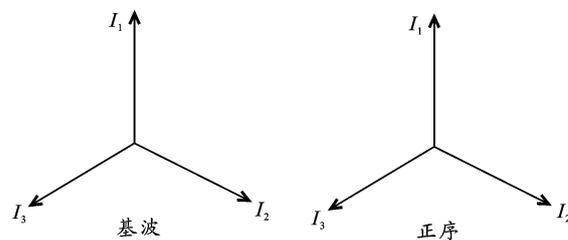


图8 七次谐波相位

从上面计算,电抗器、电容器均不过载,也不过压。

补偿量计算:

$$Q_c = 3I^2(X_L - X_C) = 3 \times (197.26)^2 \times (104.59 - 2.16) = 11\,958.28 \text{ kvar}$$

h_5 滤波器谐振校核:

$$X_L = 7 \times 2.16 = 15.12 \Omega$$

$$X_C = 1/7 \times 104.59 \approx 14.941 \Omega$$

由此可见, h_7 滤波器基本谐振。

3.2 h_{11} 滤波器

结构简图如图9所示。

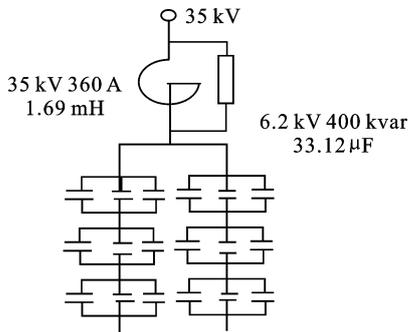


图9 11次谐波滤波器结构

电抗器参数:35 kV 360 A 1.69 mH
 电容器参数:6.2 kV 400 kvar 33.12 μF
 电容器额定电流: $I_c = 450/6.2 = 63.5$ A
 可允许长期电流: $I = 6I_c = 381$ A
 等效电容值(4并4串): $C = 6/4 \times 33.12 = 49.68$ μF
 电容可承受电压: $U = 4 \times 6.2 = 24.8$ kV
 当频率为 $f = 50$ Hz,

电抗值:

$$X_L = 2\pi fL \approx 2 \times 3.14 \times 50 \times 1.69 \times 10^{-3} = 0.53 \Omega$$

容抗值:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \times \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 50 \times 49.68} = 64.1 \Omega$$

相电流:

$$I = U / (X_C - X_L) = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{(64.1 - 0.53)} = 317$$
 A

电容器实际承受电压 U_c

由于 $U = I(X_C - X_L)$, 即 $U_c = U + IX_L = 20.67$ kV, 相位图

见图10。

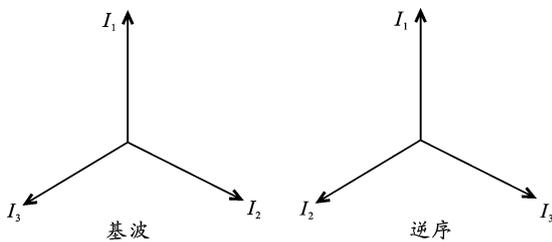


图10 11次谐波相位

从上面计算,电抗器、电容器可长期工作。

补偿量计算:

$$Q_c = 3I^2(X_L - X_C) = 3 \times (317)^2 \times (64.1 - 0.53) = 19\,273.23 \text{ kvar}$$

h_{11} 滤波器谐振校核:

$$X_L = 11 \times 0.53 = 5.83 \Omega$$

$$X_C = 1/11 \times 64.1 \approx 5.82 \Omega$$

由此可见, h_{11} 滤波器基本谐振。

4 无功平衡计算

1) 各组电容器提供容性无功:

$$Q_c = 10\,390.98 + 20\,298.77 + 11\,958.28 + 19\,273.23 = 62.55 \text{ Mvar}$$

2) 负载产生无功

根据交-交变频器在各参数额定的情况下,其中

$$\cos \varphi = 0.68$$

负载装机容量:轧机:

$$2 \times 8\,000 + 4 \times 8\,000 + 2 \times 75\,000 + 7\,000 = 70\,000 \text{ kW}$$

飞剪:2 300 kW

共计:72.3 MW

负载感性无功

由 $\cos \varphi = 0.68$, 知 $\sin \varphi = 0.75$, $Q_L = 79.53$ Mvar。

3) TCR 提供感性无功

$$Q_L = 62 \text{ Mvar}。$$

4) 无功平衡计算

1) 变流器工作时, $Q_c = 62.55$ Mvar, 变流器产生无功, $Q_L = 40$ Mvar。

这时,若保持电源 $\cos \varphi = 1$, 则 TCR 提供无功为 $Q_L = 62.55 - 40 = 22.55$ Mvar

2) 变流器不工作时, $Q_c = 62.55$ Mvar, TCR 提供无功为 $Q_L = 62.55$ Mvar, 两者基本平衡。

5 结束语

本文对静态无功动态补偿装置(SVC)进行简单分析,在使用过程证明其能很好地抑制5次、7次、11次谐波,而对3次谐未起作用,因此建议取消3次谐波装置。在风电场、冶金、电气化铁路,煤炭等工业领域,应用日益普遍。静止型动态无功补偿装置(SVC)能很好解决各种负载所产生的无功冲击。使电网电压波动明显改善,功率因数明显提高。因此研究它有着非常大的现实意义。

参考文献:

- [1] 马维新. 电力系统电压[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 陈衍. 电力系统电压稳定[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 梁志勇. 静止无功补偿设备运行综述[J]. 电力电容器, 1997(2):41-45.
- [4] 苑舜,韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [5] 杨薇薇. 10 kV 配电网中低压无功补偿装置的设计与应用[J]. 中国电力教育,2011(3):133,135.
- [6] 张军利. 新型 SVC 补偿装置研究及实现[J]. 新技术新工艺,2008(11):63-64.
- [7] 甄委委,程俊. 无功补偿技术在提高电网功率因数中的应用[J]. 四川兵工学报,2008(6):16-17.

(责任编辑 周江川)