

文章编号:1671-6833(2003)04-0024-04

直流输电系统交流侧的有源滤波技术

赵国生¹, 吴智富²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 许继集团电源公司, 河南 许昌 461000)

摘 要: 对高压直流输电系统交流侧产生的谐波进行分析, 并针对高压直流输电系统交流侧产生的谐波的特点提出了一种并联有源滤波方案, 该有源滤波器采用瞬时无功率理论进行谐波检测, 通过PI控制维持电容电压的稳定, 采用高频载波PWM脉宽调制技术使实际输出电流信号跟踪指令电流信号。最后对该有源滤波方案进行了动态模拟仿真, 仿真结果表明, 该有源滤波方案对高压直流输电系统直流侧产生的谐波的滤除是非常有效的, 能够得到理想的结果。

关键词: 高压直流输电; 有源滤波器; 谐波
中图分类号: TM 723 **文献标识码:** A

0 引言

在高压直流输电系统中, 换流器在直流侧与交流侧都会产生大量的谐波, 换流站的交流侧的谐波主要表现为谐波电流, 而直流侧的谐波主要表现为谐波电压。这些谐波电压与谐波电流, 不仅影响着电能的质量, 而且对电网本身、电网中的电力设备、计量装置、保护装置、附近的通信系统都会产生严重的干扰, 因此, 对直流输电系统产生的谐波的分析以及谐波滤除方法的研究是直流输电系统的一个重要研究课题。

通过增加换流装置的脉波数可以减少特征谐波的组成成分并提高最低次特征谐波的次数, 从而使特征谐波含量减小, 但这将造成变压器的接线很复杂, 而且也不经济。传统的抑制直流输电系统谐波的方法是在换流站的直流侧与交流侧都并联无源滤波器, 这些无源滤波器采用电阻、电感与电容元件, 它具有体积大、滤波特性受系统参数影响较大、补偿性能差、且仅能抑制固定的几次谐波等缺点。

抑制直流输电系统交、直流侧谐波的最有效的方法是采用有源滤波器, 它与无源滤波器相比, 具有高度可控制和快速响应特性, 并且能跟踪补偿各次谐波、自动产生所需变化的无功功率, 其特性不受系统参数影响的特点。有源滤波器目前有

三种类型, 分别为串联型有源滤波器、并联型有源滤波器、混合型有源滤波器。有源滤波器的工作原理就是向电网注入谐波电流或电压, 该电流或电压与未加滤波器时电网产生的谐波电流或电压在各个时刻大小相等, 方向相反^[1]。

由于直流输电系统交流侧产生的谐波主要为谐波电流, 可看作电流源, 可用三相并联有源滤波装置来进行滤波。下面将讨论采用并联型有源滤波器滤除交流侧谐波的方法。

1 换流站交流侧的特征谐波分析

在对换流站交流侧的特征谐波进行分析时, 通常需作以下假定:

- (1) 交流电压是三相对称、平衡的正弦电压, 除了基波以外, 没有任何谐波分量。
- (2) 换流器的直流侧接无限大电感的平波电抗器, 直流电流无谐波分量。
- (3) 阀的触发角 α 恒定, 并以等时间间隔周期触发。
- (4) 三相中的换相电感相等, 每一次换相的时间相等。

由于 12 脉波换流器是由两个 6 脉波换流器组成, 对于 6 脉波换流器的特征谐波进行分析具有代表意义, 对于三相六脉波换流器, 当考虑换相

过程影响时,其交流侧相电流中(以 a 相为例) 各次特征谐波电流的有效值和初相位可由式(1)表示^[2,3]

$$I_{(n)} = \frac{3U}{2n\pi x_\gamma} \delta_n \cdot \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{n+1} \{ \exp[-j(n+1)\varphi] - \exp[-j(n+1)(\alpha+\gamma)] \} \\ &\frac{1}{n-1} \{ \exp[-j(n-1)\varphi] - \exp[-j(n-1)(\alpha+\gamma)] \} \end{aligned} \right\}$$

(1)

式中: α 为触发角; γ 为换相角; x_γ 为换相电抗; U 为相电压有效值; $n=6k+1(k=1,2,3,\dots)$.
$$\delta_n = \begin{cases} 1, n=1, 11, 13, 23, 25, \dots \\ -1, n=5, 7, 17, 19, \dots \end{cases}$$

从上式可以看出,换流站交流侧的电流中含有基波及 $6k \pm 1$ 次特征谐波.

2 换流站交流侧有源滤波系统的构成

换流站交流侧有源滤波系统的构成如图 1 示, $V_1 \sim V_6$ 为换流阀, V_a, V_b, V_c 为系统电压, L_a, L_b, L_c 为系统电抗, TF_1, TF_2, TF_3 为联结变压器(Y/Y 接), L_R 与 C_R 构成无源滤波器,用于滤除有源滤波器产生的开关频率附近的谐波干扰, $Q_1 \sim Q_6, D_1 \sim D_6$ 与电容 C 构成并联型有源滤波器的主电路,快恢复二极管 $D_1 \sim D_6$ 用于续流.

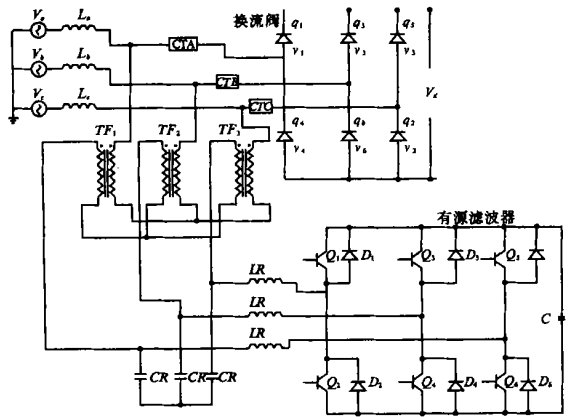


图 1 换流站交流侧有源滤波系统的构成
Fig.1 Structure of the active filters in ac side of HVDC converter station

3 交流侧有源滤波系统的工作原理及控制方法

3.1 谐波电流的检测

谐波电流可采用瞬时无功率理论进行检测

测,设 i_a, i_b, i_c 分别为电网的三相检测电流, e_a 为 a 相相电压,其相位为 $\sin \varphi$,经 $d-q$ 坐标变换得

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \sin \varphi & -\cos \varphi \\ -\cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

(2)

将 i_p, i_q 进行低通(LPF)滤波后,得其直流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q ,则电流的基波分量为

$$\begin{bmatrix} i_{gf} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \sin \varphi & -\cos \varphi \\ -\cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix}$$

(3)

将 i_a, i_b, i_c 与 i_{gf}, i_{bf}, i_{cf} 相减,即得三相电流的谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} .三相电流的基波无功分量 i_{ad}, i_{bd}, i_{cd} 可由式(4)计算

$$\begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{bd} \\ i_{cd} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \sin \varphi & -\cos \varphi \\ -\cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(4)

3.2 电容电压的控制

电容 C 用作有源滤波器的能量储存单元,用于提供达到补偿要求所需的电能,为了得到理想的有源滤波效果,电容器两端的电压必须保持稳定.由于三相电网在某一时刻的三相瞬时无功功率的总和为零,无功电流不会影响电容电压的波动.有功电流的流动会造成电容电压的波动,电网需要向有源滤波器提供一定的有功电流用于补偿有源滤波器本身的损耗所造成的压降.

对电容电压的控制可采用传统的 PI 控制方法,设 U_{cr} 是电容电压的设定值, U_c 是电容电压的实测值,两者之差经 PI 调节器后得到调节信号 Δi_p ,它迭加在瞬时有功电流的直流分量上.为了维持电容电压的稳定,需要在原三相有功电流的基础上再增加一项

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{gf} \\ \Delta i_{bf} \\ \Delta i_{cf} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} (\sin \varphi - \cos \varphi) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}^T \cdot \left(K_p (U_{cr} - U_c) + K_i \int_0^t (U_{cr} - U_c) dt \right) \quad (5)$$

3.3 控制策略^[4]

单相有源滤波器的控制框图如图 2 示。

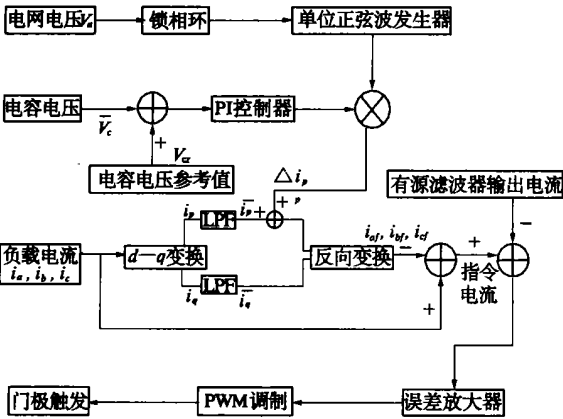


图 2 单相有源滤波器的控制框图

Fig. 2 Control block of the active filters

由电压传感器检测的 a 相电压经过锁相环路后, 获得其相位及单位正余弦信号 $\sin \varphi$, $\cos \varphi$, 电容电压的参考值与测量值之差经PI 环节后再与单位正弦信号 $\sin \varphi$ 相乘得 Δi_p . 三相电流CT 检测到的负载电流 i_a, i_b, i_c 经式(2)的d-q坐标变换得 i_p, i_q , 将 i_p, i_q 进行低通(LPF)滤波后, 得其直流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q , 将 $\bar{i}_p + \Delta i_p$ 替代原 \bar{i}_p , 进行式(3)的反变换, 得其电流基波分量 i_{df}, i_{bf}, i_{cf} , 将 i_a, i_b, i_c 与 i_{df}, i_{bf}, i_{cf} 相减, 即得三相电流的谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} , 此信号作为三相电流的参考信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* (若需要补偿无功, 可由式(4)计算出基波无功电流). 有源滤波器输出电流 I_a, I_b, I_c 与其参考电流信号之差分别经三相误差放大器后, 经高频三角波载波调制, 产生三相有源滤波器的门极触发脉冲, 门极触发脉冲经驱动电路后驱动有源滤波器三相桥。

4 仿真结果

仿真电路如图 1 示, 设三相电源相电压幅值为 3 000 V, 每相电源的等效电抗为 10 mH, 晶闸管触发顺序为 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$, 触发脉冲宽度为 120° , 触发角 α 为 $\pi/5$; 设换流站直流侧的限流电抗为 2 mH, 负载阻抗 50 Ω , 则换流站交流侧的

负载电流波形如图 3 示. 每一横格代表 5 ms. 负载电流中的谐波分量如图 4 示. 设联结变压器的变比为 10:1, 储能电容大小为 2 000 μ F, 电容电压设定值为 800 V, 电感 L_R 为 5 mH, 载波频率 50 kHz, 当用于补偿谐波时, 电网侧流过的电流波形如图 5 示。

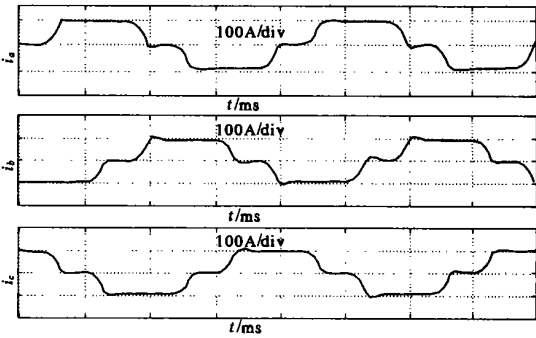


图 3 换流站交流侧的负载电流波形

Fig. 3 Load current waveform in ac side of HVDC converter station

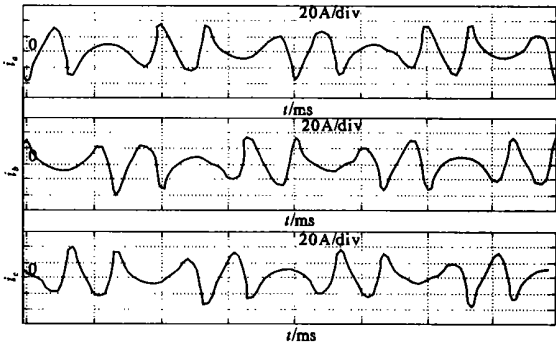


图 4 负载电流中的谐波分量

Fig. 4 Harmonics components of the load current

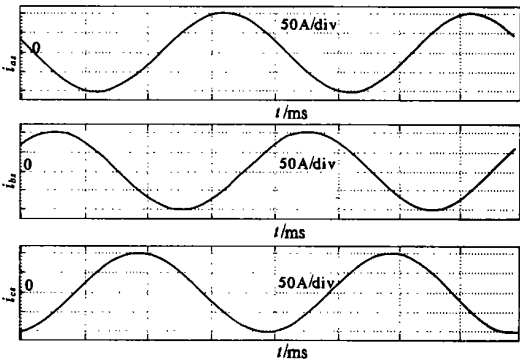


图 5 电网侧流过的电流波形

Fig. 5 Output current waveform of the active filters

5 结论

由上面的仿真结果可以得出,本文所提出的换流站交流侧的并联型有源滤波器在滤除换流阀交流侧产生的特征谐波的效果是非常理想的,该有源滤波器输出的电流能很好地跟踪换流阀产生的谐波,使得系统侧流过的电流波形为正弦波.该有源滤波器优于传统的无源滤波装置,不会因电网参数的变化而出现振荡.当仅用于补偿谐波时,换流站交流侧有源滤波装置容量并不大,造价不

高,且滤波效果好,将会有很大的应用前景.

参考文献:

[1] 王兆安,杨 君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿 [M].北京:机械工业出版社,1998.
[2] 夏道止,沈赞坝.高压直流输电系统的谐波分析及滤波 [M].北京:水利电力出版社,1994.
[3] 浙江大学发电教研组.直流输电 [M].北京:水利电力出版社,1985.
[4] 郑研,王克文.静止无功补偿装置的理想补偿电流 [J].郑州工业大学学报,2001,22(4):107~109.

Active Filter Technique on AC side of HVDC Transmission Systems

ZHAO Guo -sheng¹, WU Zhi -fu²

(1.College of Electrical Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China ; 2. Xuji Groups Power Corporation Company , Xuchang 461000, China)

Abstract : The harmonics in HVDC converter station analysed , a shunt active filter is presented . The shunt active filter detects the harmonics using instantaneous reactive power theory , keeps constant capacitor voltage by PI control algorithms , and keeps output current tracing the ideal current by utilizing the high - frequency carrier PWM modulation technique . The MATLAB simulation of the active filter scheme is carried out . The simulation results demonstrate the effectiveness of the active filter technique on AC side of HVDC converter station .

Key words : HVDC ; shunt active filter ; harmonics