

# 高压直流输电系统交流侧谐波分析及滤波配置的探讨

李慧杰<sup>1</sup>, 李啸骢<sup>1</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 黄保江<sup>3</sup>, 戴国安<sup>2</sup>

(1. 广西大学, 广西南宁 530004; 2 许继直流系统部, 河南 许昌 461000;

3. 偃城县电业局, 河南 漯河 462000)

摘要: 概述了直流输电系统中谐波的危害, 用傅立叶级数分析了换流器交流侧的特征谐波和非特征谐波, 提出了输电系统中交流滤波器的基本配置方案, 介绍了实际运行情况的交流滤波器优化配置和滤波效果。

关键词: 直流输电; 特征谐波; 交流滤波器; 傅氏级数; 脉波

中图分类号: TM47 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2005)06-0070-03

## 0 引言

高压直流 (HVDC) 输电在远距离、大容量方面独具优势, 而换流变压器是一大功率、非线性电子元器件, 在系统中产生大量非特征和特征谐波, 对供电质量是一种“污染”, 严重干扰周围通信系统, 而且使输电系统电气设备发热而损坏, 严重时在输电系统产生并联和串联谐振。目前抑制谐波的方法有两种, 一种是增加换流器的脉波数, 另一种是装设交流滤波器和直流滤波器。直流工程中采用 6 脉波和 12 脉波换流器并配置滤波器比采用 24 脉波更经济。而滤波方法分为疏导法, 如串联调谐滤波器与主电路并联, 阻塞法如平波电抗器与主电路串联, 考虑到经济和滤波效果, 交流侧主要采用交流滤波器, 直流侧采用平波电抗器和直流滤波器。

## 1 换流站交流侧谐波分析

要对输电系统谐波进行疏导, 就必须对输电系统的谐波作定量的分析, 本文就 6 脉波系统的交流侧谐波进行分析, 假设换流器交流侧三相对称, 稳态运行。变压器电气联结为 Y/Y 型, 为了简化分析, 得出定量有用的结果, 设三相晶闸管  $V_1 \sim V_6$  以触发角  $\alpha = 0$  依次进行触发时的情况, 三相 6 脉波整流器电气联结如图 1, 交流侧三相电压波形如图 2, 经过触发脉冲对阀的控制, 阀侧输出三相电流波形如图 3。

当  $f(t)$  以  $T$  为周期的电压、电流满足狄利克雷条件时, 它可以用傅氏级数表示为:

$$f(t) = A_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_{(n)} \cos(n\omega t) + B_{(n)} \sin(n\omega t)]$$

其中:

$$A_{(0)} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$$

$$A_{(n)} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

$$B_{(n)} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

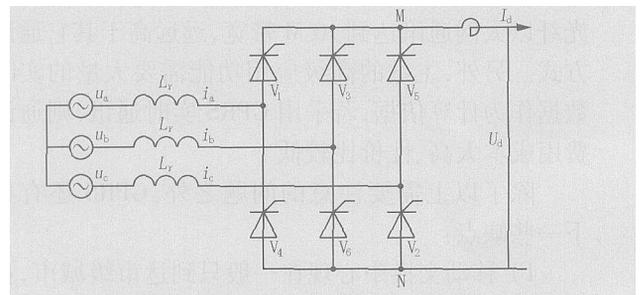


图 1 三相 6 脉波整流器示意图

Fig 1 Diagram of three-phase six-pulse rectifier

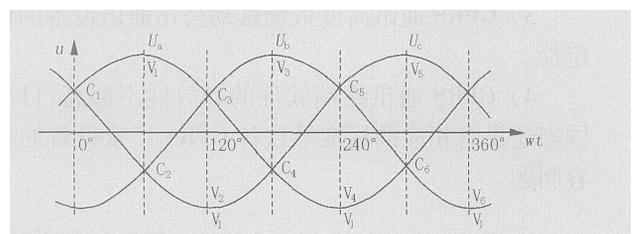


图 2 交流侧三相电压波形

Fig 2 AC side three-phase voltage waveform

现在对电流波形分析可知  $i_a, i_b, i_c$  三相电流波形完全相同, 相位相差  $2\pi/3$ , 矩形波的宽度为  $2\pi/3$ , 正负脉冲的相位相差  $\pi$ 。现用傅里叶级数来表示  $i_a$ , 为简化计算, 取  $i_a$  正矩形波的中点为相位的参考点, 电流积分示意图如图 4, 这样,  $i_a(\omega t + \pi) = -i_a(\omega t)$  即函数对称, 傅里叶级数中只含有基波和奇次谐波, 无直流分量, 又由于  $i_a(-\omega t) = i_a(\omega t)$  即偶

函数,傅氏级数便只有余弦项。

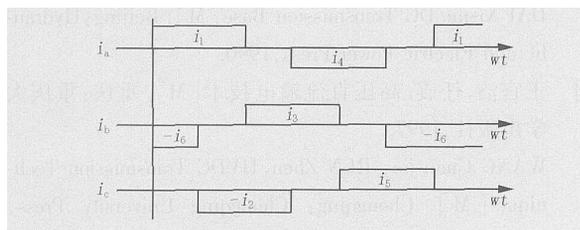


图3 阀侧三相电流波形

Fig 3 Valve side three-phase current waveform

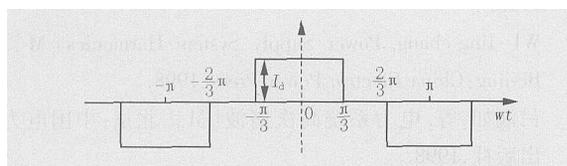


图4 电流积分示意图

Fig 4 Diagram of current integral

$$A_n = \frac{2}{0} \int_0^{\pi/3} I_d \cos(n t) d(t) + \frac{2}{2\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (-I_d) \cos(n t) d(t)$$

$$\cos(n t) d(t) = \frac{2}{n} I_d \left( \sin \frac{n\pi}{3} + \sin \frac{2n\pi}{3} \right)$$

现在对上面的结果进行分析得到傅立叶级数展开式:

$$\text{当 } n=1, 7, 13 \dots \text{时, } A_n = 2\sqrt{3}I_d/n;$$

$$\text{当 } n=5, 11, 17 \dots \text{时, } A_n = -2\sqrt{3}I_d/n;$$

$$\text{当 } n=3, 9, 15 \dots \text{时, } A_n = 0.$$

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}I_d}{11} \left[ \cos(t) - \frac{1}{5} \cos(5t) + \frac{1}{7} \cos(7t) - \frac{1}{11} \cos(11t) + \frac{1}{13} \cos(13t) - \dots \right]$$

基于傅立叶级数展开式可知,当 Y/Y型换流变压器变比为 1 时,交流网侧电流和阀侧电流相同。可见交流侧除了基波外,还含有  $n=6k \pm 1$  ( $K=1, 2, 3 \dots$ ) 的奇次谐波分量,又称 6 脉波换流器交流侧的特征谐波,且不含有 3 倍次非特征谐波。且基波和  $6k+1$  次谐波呈正序,  $6k-1$  次谐波呈负序, 3 倍次非特征呈零序,各次谐波的幅值近似为基波幅值的  $\frac{1}{n}$ 。

## 2 交流侧滤波器配置及滤波效果

根据交流侧这些特征,对于 6 脉波换流器交流侧滤波器支路需配置 5、7、11、13 次单调谐滤波器和高通滤波器,对于 12 脉波换流器交流侧滤波器支路需配置 11、13 次单调谐滤波器和高通滤波器,其接

线形式如图 5。

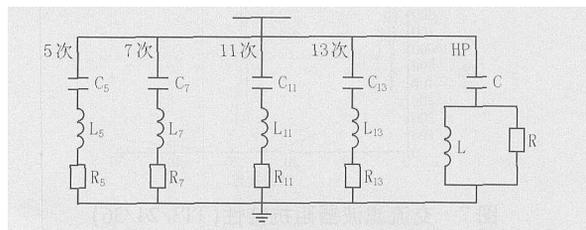


图5 6脉波系统滤波器支路配置图

Fig 5 Configuration of filter branch of six-pulse system

而在实际运行中,由于交流系统存在非线性负荷或三相参数不完全对称,在交流系统中存在基波的负序和零序电压分量。对于 6 脉波系统而言,基波和  $6k+1$  次谐波电流中除了正序分量外,将出现负序分量,  $6k-1$  次谐波也将出现正序分量,并且在交流侧存在如 3、9、15...等 3 倍次非特征谐波。对于 12 脉波系统实际运行情况,交流侧存在  $n=12k \pm 1$  ( $K=1, 2, 3 \dots$ ) 等特征谐波,也存在 3、24、36...3 倍次非特征谐波。从经济方面考虑,采用双调谐滤波器和三调谐滤波器代替单调谐滤波器,如贵广直流 12 脉波换流站中采用 4 组双调谐无源滤波器 (DT11/13) 和 4 组三调谐无源滤波器 (TT3/24/36),也可以采用 DT12/24 滤除 11、13、23、25 次谐波,如天广直流 12 脉波换流站中采用 4 组双调谐无源滤波器 (DT12/24)、3 组双调谐滤波器 DT3/36、3 组单调谐滤波器 ST48、一组单调谐滤波器 ST36。贵广直流工程双调谐滤波器 (DT11/13) 阻抗特性如图 6,三调谐滤波器阻抗特性如图 7,所有滤波器投入时仿真效果如图 8。

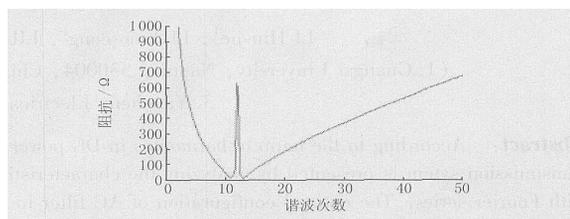


图6 交流滤波器阻抗特性 (DT11/13)

Fig 6 Impedance characteristic of AC filter (DT 11/13)

## 3 结束语

双调谐滤波器或三调谐滤波器除可以同时消除两个或三个不同频率的谐波外,而且其中一个谐振回路承受电压的强度较低,因而与完成同样功能的两个或三个单调谐滤波器相比,它占用面积小,投资少,经济性好。这种滤波器配置方法在直流工程中

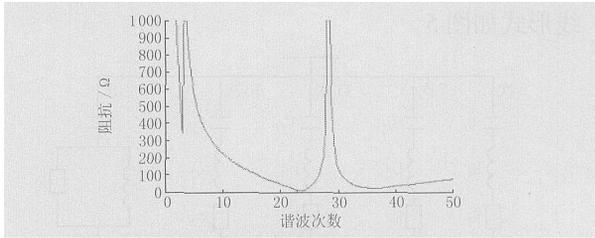


图 7 交流滤波器阻抗特性 (TT3/24/36)

Fig 7 Impedance characteristic of AC filter(TT3/24/36)

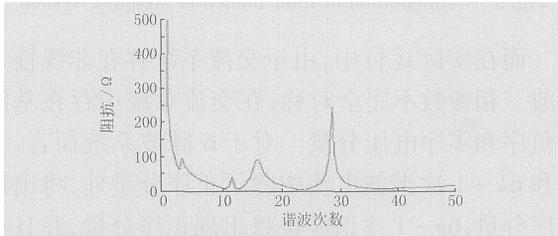


图 8 交流滤波器阻抗特性 (4 x DT11/13 + 4 x TT3/24/36)

Fig 8 Impedance characteristic of AC filter

(4 x DT11/13 + 4 x TT3/24/36)

广泛的采用,如在天广工程中采用了双调谐滤波器,在贵广工程中采用双调谐滤波器和三调谐滤波器。并且交流滤波器具有滤除谐波和补偿无功双重功效,它与无功补偿电容器相互配合,完成无功补偿和滤波。经过加设滤波器,直流输电系统的供电质量得到明显改善,换流站电气设备得到有效的保护。

#### 参考文献:

[1] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京:水利电力出版社,

1990.

DAIXi-jie DC Transmission Base [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.

[2] 王官洁,任震. 高压直流输电技术 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 1997.

WANG Guan-jie, REN Zhen HVDC Transmission Technique [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.

[3] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

WU Jing-chang Power Supply System Harmonics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[4] 吕润如,等. 电力系统高次谐波 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

L ÜRun-ru, et al Power System Higher Order Harmonics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2004-06-30; 修回日期: 2004-11-29

#### 作者简介:

李慧杰 (1969 - ),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电力系统自动控制技术; E-mail: huijie1@xjgc.com

李啸骢 (1959 - ),男,副教授,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动控制技术;

刘超 (1975 - ),男,本科,助理工程师,直流输电系统部,长期从事直流输电继电保护工作。

### Analysis of harmonics on the AC side of HVDC power transmission system and discussion of the filter configuration

LI Hui-jie<sup>1</sup>, LI Xiao-cong<sup>1</sup>, LU Chao<sup>2</sup>, HUANG Bao-jiang<sup>3</sup>, DA I Guo-an<sup>2</sup>

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. XJ HVDC Department, Xuchang 461000, China;

3. Yancheng Electrical Bureau, Luohe 462000, China)

**Abstract:** According to the harm of harmonics in DC power transmission system, the basic configuration scheme of AC filter in power transmission system is presented by analyzing the characteristic harmonics and non-characteristic harmonics on the AC side of converter with Fourier series. The optimal configuration of AC filter in practical application and the filtering effects are also introduced.

**Key words:** DC transmission; characteristic harmonic; AC filter; Fourier series; pulse

### 国家发改委主任马凯:用经济杠杆解决电力短缺

日前,国家发改委主任马凯在四部委关于宏观经济答记者会上表示,解决电力短缺的问题,要靠全社会的共同努力。从宏观上来讲,最根本的是要加强和改善宏观调控,把我们的增长速度控制在合理的区间,就是能源、资源能够承载的区间,同时要加强对经济结构调整,加快增长方式的转变,这是最根本的。从微观上来讲,要坚持两手抓。一手在保证安全的情况下,千方百计增加电力供给。今年计划新增装机容量 6 500 万千瓦。另一手加强电力需求侧管理,主要以经济杠杆为主,坚持合理有序供电,来抑制不合理消费,提倡各行各业和全体居民都来大力节约用电。