

# 基于三脉波模型的高压直流输电系统直流侧谐波分析及滤波方案设计

李战鹰, 任震

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 对许多高压直流输电工程直流侧谐波的现场测试发现, 现场测试的结果与采用传统的六脉波模型计算出的直流侧谐波有很大的差异。因而该文介绍了一种新的模型——三脉波模型, 用于分析高压直流输电系统直流侧的谐波。采用三脉波模型分析而得的直流侧的谐波特性完全符合现场测试的结果。该文分析了该三脉波模型的特性, 同时给出了基于三脉波模型的直流侧的滤波方案设计。

**关键词:** 高压直流输电; 三脉波模型; 集中杂散电容; 直流侧谐波

**中图分类号:** TM74      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)23-0015-03

## 0 引言

20世纪80年代, N. L. Shore等人提出了一种新的模型——三脉波模型来分析高压直流输电系统中直流侧的谐波<sup>[2]</sup>。D. L. Dickmader等人随后采用该模型对IPP(Intermountain Power Project)的直流侧谐波进行了分析计算, 并将结果与用传统的六脉波模型的计算结果相比较<sup>[3]</sup>。比较结果表明, 采用三脉波模型的计算结果与现场测试的结果相当吻合。而采用传统的六脉波模型, 既使考虑了换流变压器本身及控制系统的不平衡和各种非理想情况, 也不能解释某些三倍次谐波的存在。文献[1~3]认为, 采用传统的六脉波模型与测试结果不一致的原因, 主要是忽略了换流变压器及其套管对地的杂散电容的影响。

采用传统的六脉波模型在理想的情况下, 六脉波整流桥会在直流侧产生 $6n$ 次的谐波电压, 其中 $n$ 为正整数。如果两个六脉波整流桥以 $30^\circ$ 的相角差串联, 那么其中 $n$ 为奇数的谐波可以被消除。换流器可被看成是电压源, 既可产生直流电压也可产生 $12n$ 次谐波电压。另外, 如果考虑非理想的燃弧系统、变压器变比、相位差, 以及三相交流系统的电压和阻抗的不对称, 在直流系统中将产生非 $12$ 的整数倍的非特征谐波。而其中最明显的非特征谐波都是偶数次谐波<sup>[1]</sup>。

而对正在运行的部分高压直流输电工程的现场测试结果, 证实了采用传统的六脉波模型分析直流侧的谐波特性不够准确<sup>[3]</sup>。现场测试中检测到相

当多的3的奇数倍次谐波, 并且单极运行方式下极线与接地线中的谐波电流不一致, 这些都说明在换流器的端口与地之间存在着电流支路。

直流侧的谐波特性必然影响到直流侧的滤波方案设计。

基于以上分析本文介绍了能准确反映直流侧谐波特性的三脉波模型, 并提出了基于三脉波模型的直流侧的滤波方案。

## 1 三脉波模型的结构及原理

建立新的三脉波模型主要为了满足两方面的需要: 准确地反映现场测试中发现的接地电流支路的存在; 完整地反映出所有3倍次谐波的存在。

换流变压器与地之间的杂散电容导致了接地电流支路的产生。尽管这个接地电流支路的阻抗远远大于换流变压器的漏抗, 它仍然在决定极线与接地线之间的谐波电流分布中起了相当重要的作用。

要满足第2个要求就要以更详细的方式来表示换流桥。

可满足以上要求的三脉波简化模型如图1所示。

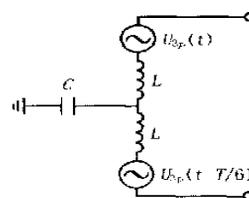


图1 以三脉波电压源表示的六脉波整流桥  
Fig. 1 A six-pulse rectifier bridge modeled with three-pulse model

图 1 中  $C$  为集中杂散电容。该集中杂散电容包括套管的电容、阀绕组与地之间的电容以及变压器的交流绕组与阀绕组之间的电容,典型值为  $10 \sim 20 \text{ nF}$ 。并且对于  $12$  脉波整流桥的  $Y$  绕组和绕组,该电容值略有不同。图中  $L$  等于六脉波整流桥换相电抗时间平均值的  $1/2$ 。

图 1 中,  $U_{3p}(t)$  表示三脉波电压,其傅氏展开式为:

$$U_{3p}(t) = \frac{1}{4} U_{\text{dio}} [ (\cos \quad + \cos \quad) + \sum_{k=1}^{\infty} ((-1)^k \cdot (a_{3k} \cos(3k t) + b_{3k} \sin(3k t))) ] \quad (1)$$

其中:

$$a_{3k} = \frac{\cos(\frac{\pi}{12}(1+3k)) + \cos(\frac{\pi}{12}(1-3k))}{1+3k} + \frac{\cos(\frac{\pi}{12}(1-3k)) + \cos(\frac{\pi}{12}(1+3k))}{1-3k} \quad (2)$$

$$b_{3k} = \frac{\sin(\frac{\pi}{12}(1+3k)) + \sin(\frac{\pi}{12}(1-3k))}{1+3k} + \frac{\sin(\frac{\pi}{12}(1-3k)) + \sin(\frac{\pi}{12}(1+3k))}{1-3k} \quad (3)$$

$12$  脉波整流桥是由相位差为  $T/12$  的两个六脉波整流桥串联而成的。这个相位差可以是超前的也可以是滞后的。以三脉波模型模拟的  $12$  脉波整流桥如图 2 所示。

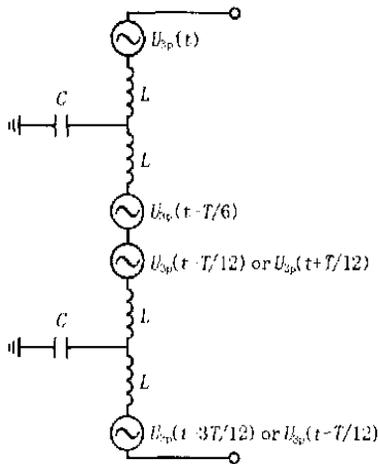


图 2 以三脉波电压源模拟的  $12$  脉波整流桥  
Fig. 2 A 12-pulse rectifier bridge modeled with three-pulse model

图 2 中的  $12$  脉波整流桥以 4 个有内感的电压源及耦合于变压器绕组和地之间的集中杂散电容组成。该模型中,每个三脉波电压源的内感抗为  $24 \text{ mH}$ ,每个集中杂散电容值为  $12 \text{ nF}$ 。

## 2 三脉波模型与传统六脉波模型比较

### 2.1 传统的六脉波模型

传统的六脉波模型常用六脉波整流桥产生的电压波形来作为分析直流滤波器性能时计算的基础。如图 1 示。因而在直流侧主要产生  $6n$  次谐波,当以  $12$  脉波整流桥的方式运行时,主要产生  $12n$  次谐波。

可见传统模型不能准确地产生现场测试所发现的  $3(2n+1)$  次谐波电流。在传统模型中,非特征谐波是由变压器三相电抗的不对称、变比的不对称、燃弧时刻的不同以及由于负序基波电压存在导致的交流电压的不平衡等各种非理想条件导致的。即使对这些非理想条件考虑最严重的情况,采用传统的六脉波模型计算出的  $3(2n+1)$  次谐波电流也远低于现场测试的结果。

在不平衡双极运行状态下,采用传统的六脉波模型的计算结果与现场测试的结果差别相当大。双极平衡运行状态下,采用传统的六脉波模型计算结果中主要产生  $12n$  次谐波电流和很低的干扰值,并且由于两极之间极小的不平衡使得接地电流分量很小。但 IPP 等高压直流输电工程的现场测试结果表明<sup>[2,3]</sup>,  $3$  的奇数次谐波会产生相当高的干扰水平。

另外,IPP 单极运行时的测试结果以及进一步的分析结果显示<sup>[2]</sup>,即使是  $12n$  次特征谐波的数值也高于采用传统六脉波模型计算的数值。这说明,换流器的内部阻抗与传统六脉波模型中所采用的不同。

### 2.2 三脉波模型

在 IPP 高压直流输电工程中采用三脉波模型进行分析的最初目的是为了准确反映接地线中所检测到的所有次谐波。而检测到的谐波与采用传统六脉波模型计算结果不一致的主要原因可能是忽略了耦合于换流变压器阀侧绕组与地之间的杂散电容。而阀侧绕组与地之间的电容值有数纳法,该电容的存在构成了由地经由阀再回到地的电流回路。传统的六脉波模型中通常忽略不计由杂散电容形成的电流支路。然而,现场测试结果及进一步的分析显示,这一支路中流过的电流不容忽视。

建立新的三脉波模型主要是为满足两方面的需要。首先是能准确表示杂散电容所形成的接地回路,另外能准确地反映所有  $3$  倍次谐波的存在。而三脉波模型下分析非特征谐波问题,其方法与传统的六脉波模型完全一样。

### 3 基于三脉波模型的直流侧滤波方案设计

现场测试的结果显示,采用传统的六脉波模型来分析直流侧谐波会产生严重错误,从而研究出以三脉波模型来分析直流侧谐波。该三脉波模型已被用于实际的高压直流输电工程设计,以及对出现电话干扰问题的已有的高压直流输电工程的再研究和修改。三脉波模型对于直流滤波器的研究和设计具有重要意义。

在滤波器设计中,采用传统的分析方法,不考虑杂散电容且中性线未连接电容时,实际的电话干扰水平是计算结果的数倍(有时达 10~30 倍)。特别是 12 次特征谐波电流可能是采用传统模型计算结果的很多倍。另外,在极线和接地线中都会出现明显的三倍次谐波。相对较高的 2、10、14 次等非特征谐波也会导致等效干扰水平的显著增加。

在中性线与地之间形成一条低阻抗回路,会使得极线和接地线中所有三倍次谐波电流显著降低。在中性线与地之间联入一个大电容(10~20 nF)即可实现。

单靠在中性线与地之间连接电容不足以将极线接地电流中的谐波含量降低到可以接受的水平。还需要在极线和中性线之间连接在某些 3 倍次谐波下呈低阻抗的滤波器,并且要求滤波器在 12 次特征谐波下也呈现较低的阻抗。当要求较高的滤波效果时,要求以三脉波模型为基础设计的直流滤波器具有多调谐频率,这使得直流侧的滤波器既大型又复杂,直流侧的滤波器造价将大为增加<sup>[5]</sup>。

瑞典的 Gothenburg 附近 Lindome 换流站的直流侧首次采用了无源和有源的混合滤波方案<sup>[6]</sup>。该方案中,有源滤波器串联于无源滤波器的底部,用于补偿无源滤波器不能滤除的那部分谐波电流。有源滤波器作为谐波电压源,通过无源滤波器的阻抗在公共连接点产生谐波电流,该谐波电流与需要补偿的谐波电流幅值相等、相位相反,从而实现了彻底补偿直流输电线路谐波电流的目的。

综合以上分析,建议在高压直流输电工程直流侧采用如图 3 所示的滤波方案。

### 4 结论

本文详细介绍了用于分析高压直流输电系统直流侧谐波的一种新的三脉波模型,将其与传统的六脉波模型相比较,并根据三脉波模型分析的直流侧的谐波特性提出了直流侧的滤波方案。本文的主要

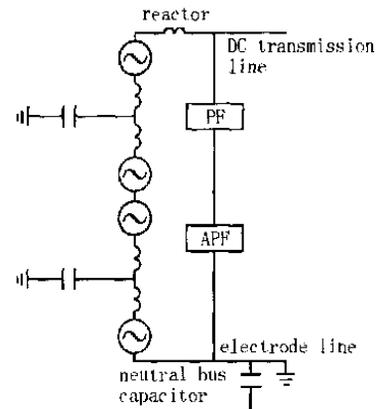


图 3 基于三脉波模型的直流侧滤波方案

Fig. 3 DC side filter scheme based on the three-pulse model

结论如下:

- 1) 三脉波模型考虑了换流变压器绕组及套管对地的杂散电容,能准确反映接地电流支路的存在。
- 2) 三脉波模型与传统的六脉波模型相比能更准确地反映直流线路中的谐波含量。
- 3) 基于三脉波模型分析的直流侧的谐波特性,采用在中性线并联一大电容,同时在极线与中性线间采用无源和有源滤波器相结合的混合滤波方案,以满足更高的滤波要求。

三脉波模型对于直流侧的谐波分析及滤波方案设计都具有极为重要的意义。

参考文献:

- [1] Kimbark E W. Direct Current Transmission[Z]. 1971.
- [2] Shore N L, Andersson G, Ganellhas A P, et al. A Three-pulse Model of DC Side Harmonic Flow in HVDC Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3):1945-1952.
- [3] Dickmader D L, Peterson K J. Analysis of DC Side Harmonics Using the Three-pulse Model for the Intermountain Power Project HVDC Transmission[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2):1195-1204.
- [4] Sadek K, Pereira M. Harmonic Transfer in HVDC Under Unbalanced Conditions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4):1394-1399.
- [5] 夏道止,沈赞坝(XIA Daozhi, SHEN Zairun). 高压直流输电系统的谐波分析及滤波(Harmonic Analysis and Filter in HVDC System) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1994.
- [6] Wong C, Mohan N, Wight S E, et al. Feasibility Study of AC and DC-side Active Filters for HVDC Converter Terminals [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(4):2067-2075.

(下转第 43 页 continued on page 43)

## 参考文献:

- [1] 孙树勤(SUN Shu-qin). 电压波动与闪变(The Fluctuation and Flicker of Voltage) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [2] 王世一(WANG Shi-yi). 数字信号处理(Digital Signal Processing) [M]. 北京:北京理工大学出版社(Beijing: Beijing University of Science and Technology Press), 1997.
- [3] 邹鲲,袁俊泉,龚享铤(ZOU Kun, YUAN Jun-quan, GONG Xiang-yi). MATLAB 6. x 信号处理(MATLAB 6. x Signal Processing) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 2002.
- [4] 刘志俭,潘献飞,连军想(LIU Zhi-jian, PAN Xian-fei, LIAN Jun-xiang). MATLAB 外部程序接口 6. x (MATLAB Outer Program Interface 6. x) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 2002.
- [5] 朱治松,郭晓丽(ZHU Zhi-song, GUO Xiao-li). VB 与 MATLAB 混合编程探讨(Combining Program of VB and MATLAB Study) [J]. 电子技术应用(Application of Electronic Technique), 2003, (9): 18-19.
- [6] 赵刚,施围,林海雪(ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Haixue). 闪变值计算方法的研究(A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(11): 15-18.

收稿日期: 2004-04-01; 修回日期: 2004-06-24

## 作者简介:

郭晓丽(1971 - ),女,硕士研究生,讲师,研究方向为电能质量及运动技术; E-mail: nt - gxl @tom.com

陈劲操(1956 - ),男,教授,从事电力系统及其自动化的科研与教学,研究方向为电力系统远程监控,测试仪表设计。

### Combining VB with Matlab programming technology to develop flicker measurement system

GUO Xiao-li<sup>1</sup>, CHEN Jin-cao<sup>2</sup>, DU Jun<sup>1</sup>, WU Xiao<sup>1</sup>

(1. Nantong Institute of Technology, Nantong 226007, China; 2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** As an important index to assess the energy quality, voltage flicker reflects the power supply quality more directly and quickly. In this paper, the stages of the voltage fluctuation and flicker are designed based on IEC specification. With Matlab interface technology and the DLL produced in VC++ environment, the combining programming of VB and Matlab is realized. Finally, combining programming measurement software together with data-requiring card and potential transformer circuit complete the measurement of three-phase voltage fluctuation and flicker.

**Key words:** combining programming; Matlab interface technology; DLL; flicker

(上接第 17 页 continued from page 17)

收稿日期: 2004-03-31; 修回日期: 2004-05-09

## 作者简介:

李战鹰(1973 - ),女,博士研究生,研究方向为高压直流输电系统谐波分析及滤波方案的研究; E-mail: lzhanying @

163.net

任震(1938 - ),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电工学科评议组成员,IEEE高级会员,研究方向为电力系统可靠性、电力市场、高压直流输电、小波分析、无功优化等。

### DC side harmonic analysis and filter scheme design using the three-pulse model in HVDC system

LI Zhan-ying, REN Zhen

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Measurements of the harmonics on the DC side in many HVDC projects have disclosed that considerable discrepancies exist between the results obtained with the traditional six-pulse model and the one on the spot. Thus a new model, three-pulse model, for analysing DC side harmonics is proposed. The real harmonic characteristics of the DC side fully accord with the results of the three-pulse model analysing. This paper presents the characteristic analysis of the three-pulse model as well as the filter scheme design of the DC side.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50337010).

**Key words:** HVDC; three-pulse model; lumped stray capacitor; DC side harmonics