

# 基于谐波电流时域分段算法的换流站损耗评估

黎小林<sup>1</sup>, 黄莹<sup>1</sup>, 李普明<sup>2</sup>, 徐政<sup>2</sup>

(1. 南方电网技术研究中心, 广州 510623; 2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

**摘要:** 介绍了换流阀损耗和换流变压器损耗的计算方法。根据 IEC 61803 中的损耗计算模型, 采用时域分段法计算谐波, 开发出换流站损耗分析软件。换流站损耗算例分析显示, 用时域分段法精确算得的谐波电流对直流侧换流阀及平波电抗器的损耗计算值影响不大, 但对交流侧的换流变压器损耗计算值影响则较明显。

**关键词:** 高压直流输电; 换流站损耗; 换流阀损耗; 换流变压器损耗; 时域分段法

## Evaluation of Power Losses in HVDC Converter Stations Based on Harmonic Current Piecewise Method

LI Xiao-lin<sup>1</sup>, HUANG Ying<sup>1</sup>, LI Pu-ming<sup>2</sup>, XU Zheng<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Technology Research Center, Guangzhou 510623, China;

2. Department of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The calculation methods for power losses of thyristor valve and converter transformer are introduced. According to the models in IEC 61803, an analysis software for power losses in HVDC converter stations is developed, which is based on a time domain piecewise method for harmonic current calculation. A calculation example of power losses in a converter station is analyzed, showing that the harmonic current value calculated with the time domain piecewise method has little impact on the loss values of thyristor valve and smoothing reactor in the DC side, but marked influence on the loss value of converter transformer in the AC side.

**Key words:** HVDC transmission; converter station loss; thyristor valve loss; converter transformer loss; piecewise method

近年来高压直流输电在我国“西电东送”、“南北互供”和“全国联网”等工程中应用广泛<sup>[1]</sup>, 而高压直流输电的损耗问题也得到了广泛的关注。

目前国家电网公司和南方电网公司都提出了节能降耗的发展方针, 提高电能输送效率和能效水平来服务节约型社会建设<sup>[2-3]</sup>, 所以快速精确地计算损耗并根据损耗结果优化参数, 提高效率, 在当今社会有深远的意义。

在高压直流输电系统中, 损耗主要由换流站损耗、直流线路损耗和接地极线路损耗等部分组成。其中换流站的损耗所占的比例比较大, 计算比较复杂<sup>[4]</sup>, 因此, 精确计算高压直流输电系统中换流站的损耗是进行系统运行效率评估的基础和前提。而且在直流输电工程的设计过程中, 根据损耗计算的结果, 还可以优化系统参数, 提高输电效率。

目前, 换流站损耗计算大多基于 IEC 61803: 1999 标准<sup>[5]</sup>和 IEEE Std 1158—1991 标准<sup>[6]</sup>。这些标准中, 谐波电流计算都采用了公式法。在换流阀、换流变压器、交直流滤波器及平波电抗器等主要设备中, 谐波损耗都占了不可忽略的比例。所以, 交直流侧谐波计算的结果也会影响到损耗计算的结果。

本文根据 IEC 61803 中的模型, 计算晶闸管阀和换流变压器的损耗。在谐波计算中采用了谐波电流时域分段算法。该算法计算快速, 综合考虑了直流侧纹波及换相过程等多方面因素, 并在计算中将交直流侧回路作为整体, 可以相应得到统一精度的交直流侧谐波。

通过算例比较了采用谐波时域分段法的损耗计算与传统损耗计算的结果。在此基础上开发了换流站损耗分析软件。该软件可以计算各种工况下的直流输电系统损耗, 计算准确快速, 能帮助相关技术人员提高损耗计算的效率。

## 1 换流站损耗的计算方法

换流站损耗主要包括换流阀损耗、换流变压器损耗、交直流滤波器损耗以及平波电抗器损耗等。在这些损耗中,晶闸管阀损耗和换流变压器损耗占的比例较大,在正常运行中所占的损耗比例大约分别是 25%~45%和 40%~55%。所以精确计算晶闸管阀和换流变压器损耗就成为计算整个换流站损耗的关键。

下面主要介绍这两种设备的损耗计算方法。

### 1.1 换流阀损耗的计算方法

晶闸管换流阀损耗的 85%~95%是由晶闸管和阻尼电阻产生的。由于换流阀在运行中的波形复杂,目前还没有一个较好的直接测算损耗的方法。通常采用的方法是分别计算晶闸管阀的各损耗分量,最后相加得到换流阀的损耗。

晶闸管阀的损耗分量主要有晶闸管阀通态损耗、单阀晶闸管扩散损耗、单阀其他通态损耗、单阀与直流电压相关的损耗、单阀与电阻相关的阻尼损耗、单阀与电容器能量变化相关的阻尼损耗、单阀关断损耗和单阀电抗器损耗等 8 个分量组成<sup>[5]</sup>。其中,晶闸管阀通态损耗分量和单阀阻尼损耗分量占的比例最大。

#### 1.1.1 晶闸管阀通态损耗计算

$$P_{V1a} = \frac{N_t I_d}{3} \left[ U_0 + R_0 I_d \left( \frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right) \right], \quad (1)$$

$$P_{V1b} = \frac{N_t I_d U_0}{3} + \frac{N_t R_0}{3} \left( I_d^2 + \sum_{n=12}^{48} I_n^2 \right) \left( \frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right). \quad (2)$$

式(1)用于桥直流侧电流很平滑的情况。如果直流侧谐波电流的有效值超过直流分量的 5%,则应采用公式(2)。

式(1)、(2)中的  $U_0$  为晶闸管平均通态电压降中与电流无关的部分。 $R_0$  为决定晶闸管平均通态特征斜率的电阻。 $N_t$  为单个换流阀串联的晶闸管数。 $I_d$ 、 $I_n$  分别为换流桥的直流电流和  $n$  次谐波电流。

#### 1.1.2 单阀阻尼损耗计算

单阀阻尼损耗(与电阻相关的部分)由公式(3)计算。式中  $C_{AC}$  为阀两端有效阻尼电容值,  $R_{AC}$  为与  $C_{AC}$  串联的阻尼电阻值,  $U_{V0}$  为换流变阀侧空载线电压有效值,  $m$  为换流变两个次级之间的感性耦合系数。

$$P_{V2} = 2\pi f^2 U_{V0}^2 C_{AC}^2 R_{AC} \left[ \frac{4\pi}{3} - \frac{3}{2} + \frac{3\sqrt{3}m^2}{8} + (6m^2 - 12m - 7) \frac{\mu}{4} + \left( \frac{7}{8} + \frac{9m}{4} - \frac{39m^2}{32} \right) \sin 2\alpha + \left( \frac{7}{8} + \frac{3m}{4} - \frac{3m^2}{32} \right) \sin(2\alpha + 2\mu) - \left( \frac{\sqrt{3}m}{16} + \frac{3\sqrt{3}m^2}{8} \right) \cos 2\alpha + \frac{\sqrt{3}m}{16} \cos(2\alpha + 2\mu) \right]. \quad (3)$$

#### 1.1.3 单阀阻尼损耗计算

单阀阻尼损耗(与电容器能量变化相关的部分)由公式(4)计算。式中,  $C_{HF}$  是阀两端所有容性均压电路的有效总电容加上连接在阀段的外部设备的全部杂散电容以及阀对地和对附近物体的杂散电容。

$$P_{V3} = \frac{U_{V0}^2 f C_{HF} (7 + 6m^2)}{4} \left[ \sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \mu) \right]. \quad (4)$$

## 1.2 换流变压器损耗的计算方法

相对于其他电力变压器,谐波在换流变压器绕组中产生的涡流损耗和结构件中产生的杂散损耗比较大,在整个损耗中占了不可忽略的比例,所以精确计算出谐波损耗是计算换流变压器损耗的关键。

涡流损耗和杂散损耗较难通过理论推导公式计算,通常采用试验测量的方法得到。而在试验中,在每个谐波频率下进行负载损耗测量也是不现实的。所以,换流变压器损耗的计算基于两次频率不同的负载损耗测量,根据绕组涡流损耗和结构件杂散损耗与频率之间的关系,推导出换流变压器损耗计算公式。

换流变压器中绕组涡流损耗和结构件杂散损耗都与电流的平方成正比;绕组的涡流损耗正比于频率的平方,而结构件的杂散损耗与频率的 0.8 次方成正比<sup>[6]</sup>。所以,可在额定频率下和非额定频率下分别进行负载损耗测量,损耗结果可以用式(5)和式(6)表示:

$$P_1 = R I_1^2 + P_{WE1} + P_{SE1}, \quad (5)$$

$$P_m = R I_m^2 + \left( \frac{I_m}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_m}{f_1} \right)^2 P_{WE1} + \left( \frac{I_m}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_m}{f_1} \right)^{0.8} P_{SE1}. \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 中,  $I_1$ 、 $I_m$  分别为额定和非额定频率下的试验电流;  $P_1$ 、 $P_m$  分别为额定和非额定频率下的试验损耗;  $R$  为绕组电阻;  $P_{WE1}$  为绕组涡流损耗;  $P_{SE1}$  为结构件杂散损耗。根据两次测量值, 可以计算出绕组涡流损耗  $P_{WE1}$  和结构件的杂散损耗  $P_{SE1}$ , 再根据绕组中的谐波频谱, 就可以得到换流变压器总损耗:

$$P_N = R \sum_{v=1}^{49} I_v^2 + \left[ \sum_{v=1}^{49} \left( \frac{I_m}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_m}{f_1} \right)^2 \right] P_{WE1} + \left[ \sum_{v=1}^{49} \left( \frac{I_m}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_m}{f_1} \right)^{0.8} \right] P_{SE1} \quad (7)$$

由上面的分析中可以看到, 换流阀的损耗只与直流侧电流有关; 而换流变压器损耗与绕组中的谐波直接相关, 尤其对于高次谐波, 由于涡流损耗是与频率的平方成正比的, 所以高次特征谐波及幅值较大的一些非特征谐波, 都可能在绕组中产生比较大的损耗。由此可见, 交流谐波计算结果会对损耗计算结果产生比较大的影响。

## 2 换流站谐波时域分段算法

在损耗计算中, 往往需要计算多种接线方式以及这些方式下的各个负载水平。所以, 计算速度和计算精度同样重要。

传统公式法<sup>[7]</sup>不考虑直流侧谐波, 计算精度不够。开关函数法和动态向量法<sup>[8]</sup>考虑了直流侧谐波, 但是不能很好处理换相过程, 同样精度不够。时域仿真法和迭代法<sup>[9]</sup>计算精度满足要求, 但是计算速度又偏慢。所以综合考虑, 采用时域分段法计算谐波比较合理。时域分段法详细考虑了直流侧谐波和换相过程, 并且避免了迭代, 计算速度也能满足工程要求。

换流站谐波电流时域分段算法<sup>[10-11]</sup>采用的是交直流侧特征谐波电流和非特征谐波电流统一求解的方法, 其关键点是如何考虑各种因素对交直流侧电流波形的影响。

整体思路是将背景谐波电压以及基波电压加在母线上来求解直流侧谐波电压源, 利用直流侧的网络结构在频域求解直流侧出口处各次谐波电流, 将它与直流电流结合形成时域中的直流侧电流, 然后

在时域上先求解出阀侧各段电流, 再将求出的阀侧三相电流折算到交流系统侧进行傅立叶级数展开即可求解出各次谐波电流。

## 3 时域分段法在换流站损耗计算软件中的应用

根据 IEC 61803 的模型和谐波时域分段法的计算原理开发出了换流站损耗分析软件。该软件计算换流站损耗的基本流程如下: 在时域分段法中, 首先计算出直流侧谐波电压源, 再根据直流侧网络结构求解直流侧谐波。将直流侧谐波计算结果输入平波电抗器损耗计算、直流滤波器损耗计算和换流阀损耗计算中。再根据直流侧电流求解分段的阀侧电流, 最后折算到网侧, 得到交流系统谐波电流频谱, 将结果输入换流变压器损耗和交流滤波器损耗中。

整个损耗计算软件的逻辑结构如图 1 所示。

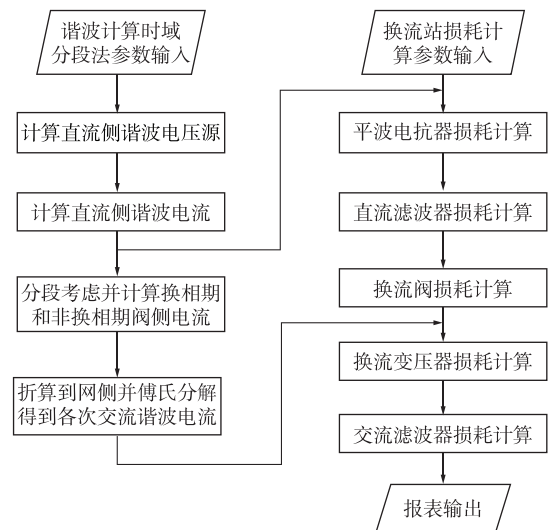


图 1 换流站损耗计算软件的逻辑结构框图

Fig. 1 Flow Chart of Power Losses Calculation in HVDC Converter Stations

## 4 仿真实验

利用该换流站损耗分析软件对云广工程的整流站楚雄站的损耗进行计算。计算工况为双极运行额定功率。

分别应用经典公式法和时域分段法计算交直流侧谐波, 再进行损耗计算, 所得到的损耗结果如表 1 所示。

表1 时域分段法与经典公式法计算谐波结果对比

Tab. 1 Comparison between the calculation results with Piecewise Method and Classical Formula

换流站设备 损耗类别	用时域分段法计算		用经典公式法计算	
	功率损 耗/kW	损耗份 额/%	功率损 耗/kW	损耗份 额/%
换流阀运行损耗	9 422.972	33.276	9 422.964	39.352 9
换流变压器运行损耗	12 964.01	52.418	12 183.69	50.882 46
交流滤波器损耗	321.145	1.286	318.121	1.328 561
平波电抗器损耗	891.855	3.606	885	3.696 005
总辅助及站用电损耗	1 135	4.589	1 135	4.740 074
总损耗	24 731.96	100	23 944.77	100

通过表1我们可以看到,由于直流侧谐波相对于直流电流幅值较小,所以换流阀和平波电抗器中的损耗计算结果变化不大。而交流侧谐波计算方法的不同在换流变压器损耗计算结果中有较大影响。换流变压器损耗相差780.317 kW,占到换流变压器总损耗的6.41%。由于换流变压器损耗在整个换流站损耗中所占的比例较大,所以由于谐波计算方法的改进,整个换流站损耗也相差3.29%。

## 5 结 论

1) 在换流站损耗计算中,换流阀和换流变压器损耗占主要部分,精确计算这两部分损耗是整个损耗计算的关键。

2) 时域仿真法计算速度快,精度高,交直流谐波计算有很好的整体性,可以满足损耗计算的要求。

3) 精确计算的直流侧谐波电流的结果,对直流侧换流阀及平波电抗器的损耗值影响不大,但对交流侧的换流变压器损耗值影响则较大。

### 参考文献:

- [1] 郑宝森,郭日彩. 中国互联电网的发展[J]. 电网技术,2003,27(2):1-3. ZHENG Bao-sen, GUO Ri-cai. On Development of Interconnection of Power Networks in China[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 1-3.
- [2] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):1-8. LIU Zhen-ya, SHU Yin-biao, ZHANG Wen-liang, et al. Study on

- Voltage Class Series for HVDC Transmission System[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [3] 祁达才. 建设高效节能的现代化南方电网[J]. 南方电网技术, 2007, 1(2): 1-5. QI Da-cai. To Make China Southern Power Grid of High Efficiency, Energy Saving and Modernization[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(2): 1-5.
- [4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. IEC 61803: 1999, Determination of Power Losses in High-Voltage Direct Current (HVDC) Converter Stations[S].
- [5] IEEE Std 1158-1991, IEEE Recommended Practice for Determination of Power Losses in High-Voltage Direct-Current (HVDC) Converter Stations [S].
- [6] 沈红. HVDC换流变压器总运行负载损耗的计算[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 5-7. SHEN Hong. Calculation of Total Service Load-Loss for HVDC Converter Transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 5-7.
- [8] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [9] 李裕能. 开关函数法用于变流装置的谐波分析[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 18-20. LI Yu-neng. Harmonics Analysis of Applying Switching Function Method to Current Converter[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 18-20.
- [10] 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, 1993.
- [11] 朱光友,徐政,黄莹,等. 换流站特征谐波电流时域分段快速算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 251-255. ZHU Guang-you, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Fast Calculation of Converter Characteristic Harmonic Currents with Time Domain Piecewise Method [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 251-255.
- [12] 黄莹,黎小林,朱光友,等. 换流站非特征谐波电流时域分段蒙特卡洛算法[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 325-332. HUANG Ying, LI Xiao-lin, ZHU Guang-you, et al. Calculation of Converter Non-characteristic Harmonic Currents Based on Time Domain Piecewise and Montecarlo [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 325-332.

收稿日期: 2008-11-26

作者简介:

黎小林(1963-),男,湖南人。高级工程师,工学硕士,从事直流输电和FACTS方面的研究。E-mail: lixl@csg.cn。

黄莹(1977-),女,山东淄博人。工程师,工学博士,从事直流和FACTS方面的研究。

李普明(1984-),男,黑龙江北安人。硕士研究生,主要研究高压直流输电。E-mail: lipuming@zju.edu.cn。

欢迎访问本期刊网站: [www.nfdwjs.cn](http://www.nfdwjs.cn)