

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.014

±500 kV 同塔双回直流输电工程系统研究

黄永瑞, 范彩云, 张 建, 李 凯, 王宇丁, 张志刚

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 文中在总结研究国内外直流输电工程设计经验基础上, 对±500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程换流站内换流变压器、交直流侧滤波器及绝缘配合等方面的内容进行了研究和计算。给出了换流变压器的推荐型式和关键参数, 滤波器的配置方案和元件参数, 同时, 基于高压直流输电换流站绝缘配合原则, 提出了换流站避雷器配置方案, 并计算了关键设备的绝缘水平。文中的研究结果可为以后直流输电工程的系统研究和换流站关键设备设计提供参考。

关键词: 直流输电; 换流站; 换流变压器; 滤波器; 绝缘配合

Systematic Research on ±500 kV Double-circuit Direct Current Power Transmission Line on Same Tower Project

HUANG Yongrui, FAN Caiyun, ZHANG Jian, LI Kai, WANG Yuding, ZHANG Zhigang

(Xuji Group Corporation, Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: According to the design experiences of DC power transmission projects in the world, the converter transformer, AC filter, DC filter and insulation coordination in the converter station are analyzed and calculated for the ±500 kV double-circuit DC power transmission line on same tower project from Xiluodu Right Bank Power Station to Guangdong. The recommended type and key parameters of converter transformer, as well as the allocation scheme and component parameters of filters, are given. In addition, the lightning arresters allocation scheme for the converter station is proposed based on the rule of converter station insulation coordination of high-voltage DC power transmission, and the insulation grades of the key equipments are calculated. This study may provide a reference for systematic research of other DC transmission projects and design of key equipments in their converter stations.

Key words: DC power transmission; converter station; converter transformer; filter; insulation coordination

0 引言

±500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程(溪洛渡直流工程)西起云南省的昭通换流站, 东至广东省的从化换流站。直流输送容量为 6 400 MW, 直流额定电压为±500 kV, 采用双回直流合建, 每回直流额定电流为 3 200 A, 直流线路约 1 240 km。通常情况下, 昭通站为整流运行, 从化站为逆变运行, 溪洛渡直流工程有两种主要运行接线方式, 即与交流系统并联运行方式和孤岛运行方式。

在目前国内采用光触发换流阀的直流输电工程中, 溪洛渡直流工程的额定直流电流最大, 同时也是世界上首个同塔双回、双回换流站同址建设的直流输电工程^[1]。

基于溪洛渡直流工程的独特性和典型性, 文中对其换流站内换流变压器、交直流侧滤波器及绝缘配合等方面的内容进行了研究和计算。给出了换流变压器的推荐型式和关键参数, 滤波器的配置方案和元件参数; 同时, 基于高压直流输电换流站绝缘配合原则, 提出了换流站避雷器配置方案, 并计算了关键设备的绝缘水平。

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-25

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAA02A27)。

Project Supported by National Key Technology Support Program(2006BAA02A27).

1 系统参数

溪洛渡直流工程整流站和逆变站的系统参数见表 1、2。

表 1 换流站直流系统参数

Table 1 DC system parameters of converter station

参数	昭通站	从化站
额定直流电压/kV	500	500
理想空载直流电压/kV	292.3	277.8
额定直流电流/A	3 200	3 200
最小持续运行直流电流/A	320	320

表 2 换流站交流系统参数

Table 2 AC system parameters of converter station

参数	昭通站	从化站
正常运行电压/kV	525	525
系统最高电压, 稳态/kV	550	550
系统最低电压, 稳态/kV	500	500
系统最大极端电压, 长期耐受/kV	550	550
系统最小极端电压, 长期耐受/kV	475	475
最大短路电流, 三相对称/kA	63	63
最小短路电流, 三相对称/kA	11.1	26.5
正常频率/Hz	50	50
稳态频率变化范围/Hz	± 0.2	± 0.2
暂态频率变化范围/Hz	± 0.5	± 0.5
极端暂态频率变化范围/Hz	± 1	± 1

2 换流变压器

在高压直流输电系统中, 由于换流变压器在交流与直流电的转换中起着至关重要的作用, 因此其可靠性对于整个系统的安全稳定运行意义重大。同国内已建成的其他直流输电工程一样, 溪洛渡直流工程仍旧采用每回每极一组 12 脉动换流器的结构, 即由两个 6 脉动换流器串联组成。与两个 6 脉动换流器相连的换流变相位相差 30° , 从而构成 12 脉动换流器^[2-6]。

2.1 换流变压器型式方案比较

根据相数和绕组数, 换流变压器可分为单相双绕组式、单相三绕组式、三相双绕组式和三相三绕组式 4 种类型。由于在高压直流输电工程中, 传输的容量较大, 因此通常情况下不考虑采用三相变压器, 仅在单相双绕组式和单相三绕组式这两种类型中进行选择^[7-12]。

相对于单相双绕组换流变压器来说, 单相三绕组换流变压器所用的铁心、套管及有载调压开关等更少, 因此原则上采用三绕组变压器要在经济性方面更有优势, 但伴随而来的是单相三绕组变压器在

运输尺寸和质量上都要大于单相双绕组变压器。

为了确定溪洛渡直流工程换流变压器的型式方案, 文中对每个换流站内换流变压器的数量(不考虑备用)、相关费用、制造难度、质量、运输难度和风险系数等方面进行了分析与比较, 结果见表 3。

表 3 换流变压器型式方案比较

Table 3 Type scheme comparison of converter transformer

参数	单相双绕组	单相三绕组
总台数/台	24	12
相关费用/%	100	约 70
质量/t	约 280	约 450
制造难度	易	难
运输难度	易	难
风险系数	小	大

综合考虑上述指标, 最终溪洛渡直流工程两个换流站均采用单相双绕组换流变压器。

2.2 换流变压器短路阻抗

换流变压器与普通电力变压器的区别之一就在于短路阻抗, 在运行过程中, 其独特的工况决定了短路阻抗是换流变压器的一项重要参数。在短路阻抗的选择过程中需要考虑换流变自身的成本、晶闸管的短路水平、换流站的无功功率等多方面因素, 因此该参数是综合优化的结果。通常情况下, 大容量换流变压器的短路阻抗为 12%~20%。短路阻抗 U_k 的初步选择为

$$U_k = \frac{2I_{dN}}{I_{TSM}} - \frac{S_N}{I_{S_{max}}} \quad (1)$$

式(1)中: I_{dN} 为额定直流电流; I_{TSM} 为晶闸管的浪涌电流; S_N 为每个 6 脉动桥换流变压器额定容量; $S_{S_{max}}$ 为交流系统最大短路容量。

在溪洛渡直流工程中, 所用晶闸管的最小浪涌电流为 38.5 kA, 根据交流系统参数, 利用式(1)即可计算出换流变压器的短路阻抗, 经过优化研究, 最终昭通站和从化站换流变压器的短路阻抗定为 16.5%。

2.3 换流变压器额定参数

换流变压器额定阀侧线电压 U_{VN} 和理想空载直流电压 U_{d0} 之间的关系为

$$U_{VN} = \frac{\pi U_{d0}}{3\sqrt{2}} \quad (2)$$

阀侧交流电流有效值 I_{VN} 与额定直流电流 I_d 的关系为

$$I_{VN} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (3)$$

换流变压器的容量 S_N 为

$$S_N = \sqrt{3} U_{VN} I_{VN} = \frac{\pi}{3} U_{d0} I_{d0} \quad (4)$$

根据式(2)–(4), 计算溪洛渡直流工程中两站换流变压器的参数, 计算结果见表4。

表4 换流变压器参数

Table 4 Converter transformer parameters

参数	昭通站	从化站
换流变容量/MVA	317.6	300.4
换流变额定电压网侧/阀侧/kV	525.0/210.5	525.0/199.2
换流变阀侧电压最大值/kV	213.3	206.1
短路阻抗	0.165	0.165

3 滤波器

12脉动换流器在运行过程中, 相当于一个谐波源。其注入交流系统的谐波主要为 $12k \pm 1$ (k 为正整数)次特征谐波及各次非特征谐波, 在直流侧产生的特征谐波为 $12k$ (k 为正整数)次, 因此, 需要在交直流侧装设滤波器^[13–15]。

3.1 交流滤波器

交流滤波器大致可分为3种, 即无源滤波器、有源滤波器和连续调谐滤波器。目前, 在高压直流输电工程中, 交流滤波器通常仍旧选用无源滤波器。无源滤波器由电阻、电容、电感构成, 在1个或2个谐波频率的指定范围内或高通频带下呈现低阻抗, 从而减少注入交流系统的谐波。根据溪洛渡直流工程的系统参数, 经过综合考虑和反复优化, 最终确定了昭通站和从化站的交流滤波器方案和相关参数。方案中交流滤波器和电容器结构见图1。

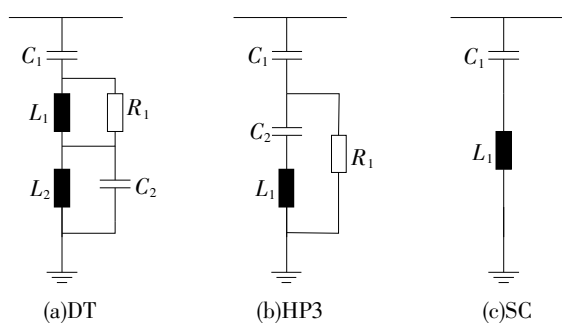


图1 交流滤波器和电容器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC filter and capacitor

3.1.1 昭通站交流滤波器配置方案

昭通站通常情况下为整流运行, 在工程投入运行后可能采取孤岛运行方式。因此昭通站滤波器配置方案为: $4 \times \text{DT11/24} + 4 \times \text{DT13/36} + 3 \times \text{HP3} + 9 \times \text{SC}$, 元件参数见表5。

3.1.2 从化站交流滤波器配置方案

从化站通常情况下为逆变运行, 因此从化站滤波器配置方案为: $4 \times \text{DT11/24} + 4 \times \text{DT13/36} + 14 \times \text{SC}$, 元

表5 昭通站交流滤波器配置方案

Table 5 AC filter configuration scheme of

Zhaotong station

参数	DT11/24	DT13/36	HP3	SC
容量/Mvar	160	160	160	180
$C_1/\mu\text{F}$	1.84	1.84	1.85	2.06
L_1/mH	15.05	7.30	952.00	2.15
R_1/Ω	500	500	1 800	—
$C_2/\mu\text{F}$	4.82	3.31	10.60	—
L_2/mH	11.02	10.50	—	—

件参数见表6。

表6 从化站交流滤波器配置方案

Table 6 AC filter configuration

scheme of Conghua station

参数	DT11/24	DT13/36	SC
容量/Mvar	174	174	175
$C_1/\mu\text{F}$	2.0	2.0	2.1
L_1/mH	14.88	7.10	2.19
R_1/Ω	500	500	—
$C_2/\mu\text{F}$	4.5	3.2	—
L_2/mH	11.07	10.30	—

3.2 直流滤波器

目前, 高压直流输电工程中衡量直流谐波水平的标准仍然采用等效干扰电流法, 即所有谐波频率的噪声加权至残余电流^[16]。沿输电线路的任何位置 x 点上噪声加权的等效干扰电流 $I_{eq}(x)$ 为

$$I_{eq}(x) = \sqrt{I_e(x)_R^2 + I_e(x)_I^2} \quad (5)$$

式(5)中, $I_e(x)_R$ 、 $I_e(x)_I$ 分别为昭通站和从化站换流器谐波电压产生的沿线任意 x 点位置的等效干扰电流分量幅值。

$$I_e(x) = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} [I_n(x) P_n H_f]^2} \quad (6)$$

式(6)中: $I_n(x)$ 为沿线任意 x 点位置的 n 次谐波残余电流的均方根值; P_n 为 n 次谐波频率下的视听加权系数; H_f 为 n 次谐波频率下裸导线的耦合系数。

直流滤波器的系统结构及其工作原理与交流滤波器很相似。在溪洛渡直流工程中, 每站每回每级的极母线上装设300 mH的平波电抗器, 在每站每回每级直流极母线与中性母线之间装设1组三调谐TT 12/24/36无源滤波器, 其电路图和元件参数分别见图2和表7。表7中昭通站和从化站直流滤波器类型均为TT 12/24/36。

4 绝缘配合

根据高压直流输电工程换流站绝缘配合原则,

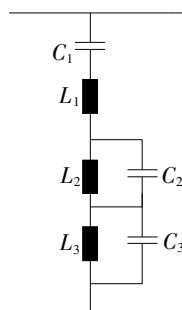


图2 三调谐滤波器电路

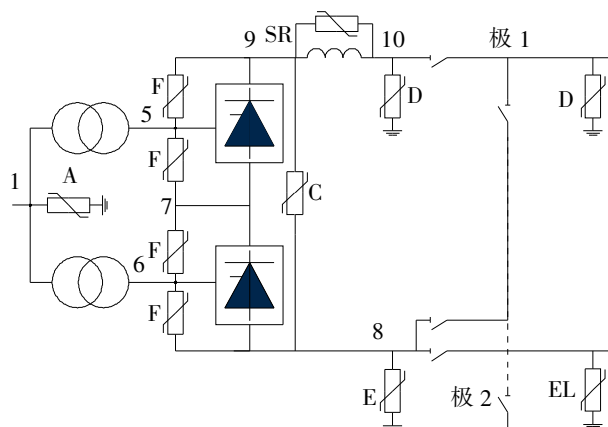
Fig. 2 Triple tuned filter circuit

表7 直流滤波器配置方案

Table 7 DC filter configuration scheme

换流站	昭通站	从化站
$C_1/\mu\text{F}$	1.20	1.20
L_1/mH	14.42	14.42
$C_2/\mu\text{F}$	3.49	3.49
L_2/mH	13.45	13.45
$C_3/\mu\text{F}$	4.41	4.41
L_3/mH	2.71	2.71

并结合换流站平波电抗器的布置方式, 溪洛渡直流工程换流站避雷器配置方案见图3。



F—阀避雷器; C—阀厅避雷器; SR—平波电抗器避雷器;
E、EL—中性母线避雷器; D—直流极母线避雷器;
A—交流母线避雷器。

图3 换流站避雷器配置方案

Fig. 3 Converter station arrester configuration scheme

结合相关标准和国内外直流输电工程的运行经验^[17-22], 该工程中各类电气设备所选用的绝缘裕度见表8。

根据换流站避雷器配置方案和研究结果, 综合考虑其他方面因素, 对该工程换流站绝缘水平进行了计算, 计算结果见表9。表9中, LIWL为雷电冲击耐受水平, SIWL为操作冲击耐受水平。

5 结语

1)给出了溪洛渡直流工程换流变压器的推荐型

表8 绝缘裕度

Table 8 Insulation margin

设备类型	操作冲击	雷电冲击	陡波前冲击
交流场设备	1.20	1.25	1.25
换流变网侧	1.20	1.25	1.25
换流变阀侧	1.15	1.20	1.25
换流阀	1.15	1.15	1.20
直流场设备	1.15	1.20	1.25

表9 换流站绝缘水平

Table 9 Insulation levels of converter station

位置	保护避雷器	LIWV/kV	SIWV/kV
1	A	1 550	1 175
5	A 或 3F+E	1 550	1 300
6	F+E	1 050	850
8	E	150	150
9	A 或 C+E	1 425	1 300
10	D	1 425	1 175

式, 并计算了换流变压器的关键参数;

2)提出了交直流侧滤波器的配置方案, 并计算了各主要元件的参数;

3)基于高压直流输电工程换流站绝缘配合原则, 提出了换流站避雷器配置方案, 并计算了关键设备的绝缘水平;

4)文中的研究结果可为以后直流输电工程的系统研究和换流站关键设备设计提供参考。

参考文献:

- [1] 南方电网. 溪洛渡右岸电站送电广东 500 kV 同塔双回直流输电工程可行性研究报告[R]. 广州: 南方电网, 2009. CSG. Feasibility study report for Xiluodu-Guangdong DC transmission project of two 500 kV HVDC systems erected on the same tower[R]. Guangzhou: CSG, 2009.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. ZHAO Wanjun. High voltage DC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] ECKHOLZ K, HEINZIG P. HVDC-transformers-a technical challenge[C]//International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2002: 547-551.
- [4] 杨份艳, 徐 政. 直流输电系统平波电抗器电感参数的选择研究[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 8-10. YANG Fenyang, XU Zheng. Selection of smoothing reactance for HVDC projects[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 8-10.
- [5] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 5-6. HAN Xiaodong, ZHAI Yadong. Converter transformer used for HVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 5-6.

- [6] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [7] 张志朝,刘涛,宋述波. 云广特高压直流工程换流变分接头切换控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 205-208.
ZHANG Zhichao, LIU Tao, SONG Shubo. Research on switching control of converter transformer tap changer in Yun-Guang UHVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 205-208.
- [8] 周俊,郭剑波,胡涛,等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for HVDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [9] 潘超,王泽忠,李海龙,等. 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 174-181.
PAN Chao, WANG Zezhong, LI Hailong, et al. DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field-circuit coupled model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 174-181.
- [10] 汲广,朱韬析. 广州换流站换流变压器运行异常情况及措施探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 115-119.
JI Guang, ZHU Taoxi. Abnormality of converter transformers in Guangzhou inverter station and its treatments [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 115-119.
- [11] 刘威,赵渊,周家启,等. 高压直流输电系统单双12脉接线可靠性对比研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 29-34.
LIU Wei, ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, et al. Comparison and research on the reliability between the 12-pulse and 2×12 -pulse HVDC transmission system [J]. Relay, 2008, 36(9): 29-34.
- [12] 赵志刚,刘福贵,张俊杰,等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie, et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [13] IEC PAS 62001:2004 Guide to the specification and design evaluation of AC filters for HVDC systems[S]. 2004.
- [14] 浙江大学直流输电编写组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1982.
HVDC Writer Group of Zhejiang University. High voltage direct current transmission [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1982.
- [15] 赵军,曹森,刘涛,等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启策略研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 126-132.
ZHAO Jun, CAO Sen, LIU Tao, et al. Research and optimization on DC line fault recovery strategy used in Gui-Guang HVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 126-132.
- [16] 张万荣,任军辉,王蔚华. ± 800 kV 特高压直流输电工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 431-433.
ZHANG Wanrong, REN Junhui, WANG Weihua. Design and study on filter in ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission project [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 431-433.
- [17] 聂定珍,马为民,李明. 锦屏—苏南特高压直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 92-97.
NIE Dingzhen, MA Weimin, LI Ming. Insulation coordination for converter stations of UHVDC project from Jinping to sunan [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 92-97.
- [18] 周晓琴,苟锐锋,吕金壮,等. ± 800 kV 特高压直流换流站最高端换流变阀侧避雷器保护研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 1-3.
ZHOU Xiaolin, GOU Ruifeng, LYU Jinzhuang, et al. Arrester protection at valve-side of highest potential converter transformer in ± 800 kV UHVDC project [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 1-3.
- [19] 周浩,陈锡磊,陈润辉,等. ± 800 kV 特高压直流换流站绝缘配合方案分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 18-24.
ZHOU Hao, CHEN Xilei, CHEN Runhui, et al. Analysis on insulation coordination scheme for ± 800 kV DC converter station [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 18-24.
- [20] 刘振亚. 特高压直流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 22-25.
LIU Zhenya. Overvoltage and insulation coordination for UHVDC system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 22-25.
- [21] 陈志伟,王冰,赵文祥,等. 轻型直流输电用换流变压器的设计[J]. 变压器, 2014, 51(3): 9-11.
CHEN Zhiwei, WANG Bing, ZHAO Wenxiang, et al. Design of converter transformer for HVDC light [J]. Transformer, 2014, 51(3): 9-11.
- [22] 彭倩,聂德鑫,刘凡,等. 特高压换流变压器现场局部放电检测抗干扰技术[J]. 变压器, 2013, 50(7): 50-52.
PENG Qian, NIE Dexin, LIU Fan, et al. On-site partial discharge test anti-interference technology of UHV converter transformer [J]. Transformer, 2013, 50(7): 50-52.
- 黄永瑞(1982—),男,硕士研究生,工程师,从事高压直流输电技术研究工作。