

DOI: 10.7667/PSPC151280

特高压直流输电系统换流站故障过电压研究

裴 昂, 吕思颖, 秦 昕, 要 航

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: ± 800 kV 特高压直流输电系统换流站内电容性和电感性组件较多, 在发生短路故障时容易引起过电压现象。研究各种操作和故障情况下过电压的特性, 保证系统的安全稳定运行非常重要。利用 PSCAD 仿真软件建立了 ± 800 kV 云南—广东特高压直流输电工程的模型, 在换流站内选取了换流阀阀顶对中性母线短路故障和换流变压器阀侧单相接地两种典型故障工况进行了研究。结果表明阀顶对中性母线故障时非故障极线路过电压水平较高, 在上组四个换流变压器阀侧绕组中高压端 Y/Y 绕组端子处单相接地时的过电压水平最高。

关键词: 特高压直流输电; 换流站; 避雷器; 短路故障; 过电压

Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system

PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, YAO Hang

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: There are many capacitive and inductive components in converter station for ± 800 kV DC power transmission system, which is easy to cause overvoltage phenomenon when a short circuit fault occurred. Research on the characteristics of overvoltage under various operation and fault conditions to ensure the system's safe and stable operation is very important. A simulation model of the UHVDC power transmission project from Yunnan to Guangdong is built by using PSCAD software. To carry out this research, two typical faults in convert station are chosen: the short circuit fault between the top of convert valve and neutral bus, and single-phase ground fault occurred at the side of converter transformer. Research results show that higher overvoltage appears on the non-faulty pole when short circuit fault between the top of convert valve and neutral bus; among four upper rectifier bridge side of connected winding of convert transformer, the highest overvoltage appears at upper rectifier bridge side wye-wye connected winding of convert transformer when single-phase ground fault occurred.

Key words: UHVDC power transmission; converter station; arrester; short circuit fault; overvoltage

0 引言

结合我国能源资源分布和经济发展形势呈现逆向分布这一特有国情, 将西部地区的能源资源转换成电能并输送到经济发达的中东部地区, 不仅是经济快速增长的重要保障, 而且可以有效缓解该区域的环保压力。然而, 在大规模和长远距离输送电能方面, 特高压直流输电 UHVDC(Ultra High Voltage Direct Current)能够表现出显著的优势^[1-5]。因此, 建设和发展特高压直流输电工程显得尤为重要。

相对于传统的高压直流输电工程来说, 特高压直流输电工程每极采用两个 12 脉动换流器(400 kV+400 kV)串联接线的方式, 一方面可以使得直流电压和交流电流中的谐波成分有效减少, 但另一方

面复杂的接线方式对于过电压的发展机制、波形以及影响也更为复杂^[6-7]。在设计建设特高压直流输电工程时, 过电压与设备绝缘配合方面的研究就是设计内容之一^[8-12]。其中, 换流站是特高压直流输电系统不可或缺的一个环节, 站内存在着很多的电容性和电感性组件, 这些组件在故障时充放电的过程中容易引起过电压问题。研究换流站内过电压的特性, 能够有效解决换流站内避雷器的参数选择、直流开关场的配置方式和直流控制保护等问题。

本文结合已经投入运行的云南-广东(以下简称云广) ± 800 kV 特高压直流输电工程, 利用 PSCAD 仿真软件建立了比较完整的计算模型。仿真分析了换流器阀顶对中性母线短路故障和换流变压器(以下简称换流变)阀侧单相接地故障时的过电压特性,

并计算了相应的过电压水平。所得的研究结果将对今后特高压直流输电工程换流站的设计和建设具有一定的参考意义。

1 特高压直流输电系统换流站避雷器配置

与传统高压直流输电系统结构一样，特高压直流输电系统仍然是通过整流站将送端的交流电能转换成直流电能，通过输电线路输送到受端，然后通过逆变站转换成交流电能，将电能送到负荷端。因此，换流站的安全稳定运行，对于整个特高压直流输电系统的安全稳定运行非常重要。

换流站内电容性电感性组件很多，在发生短路故障时容易引起过电压的问题，危害换流站的安全稳定运行。金属氧化物避雷器(MOA)能够有效限制特高压直流输电系统由于各类操作和故障引起的暂态过电压，然而对于 MOA 参数的选取主要是从绝缘配合角度和制造成本两个方面出发，经过细致的暂态计算来确定。

1.1 避雷器的布置原则

换流站 MOA 布置的基本原则为^[13-14]：交流侧产生的过电压应尽可能用交流侧 MOA 加以限制；直流侧产生的过电压应由直流线路 MOA、直流母线 MOA 和中性母线 MOA 等加以限制；重点保护

的关键设备应由紧靠它的 MOA 直接保护，如换流阀、交流和直流滤波器设备等，应分别由各自的 MOA 保护。实际工程中，在上述 MOA 布置原则的前提下，保证设备足够安全的基础上尽可能地简化 MOA 的配置。

1.2 云广特高压直流输电工程避雷器布置方案

云广±800 kV 特高压直流输电系统换流站部分采用无间隙氧化锌避雷器，其送受端 500 kV 交流侧避雷器布置与常规±500 kV 高压直流输电交流侧相同，每台换流变侧、每条交流滤波器母线和每回 500 kV 出线均布置一组避雷器。经雷电侵入波计算研究，云广特高压直流输电工程换流站交流场的两条母线可不装设避雷器^[15]。

云广换流站单极避雷器的布置方式同其他在运行的特高压直流工程基本相同。主要差别在于上组 12 脉动换流单元，云广特高压直流输电工程在最高端 Y/Y 换流变阀侧绕组和地之间布置了 A2 避雷器，降低了其操作绝缘水平，减小了空气间隙。并对整个上组 12 脉动换流单元配置了 C2 型避雷器，主要是考虑了上组 400 kV 换流单元单独运行时的绝缘水平。云广特高压直流输电工程单极避雷器布置方案如图 1 所示^[16-18]。

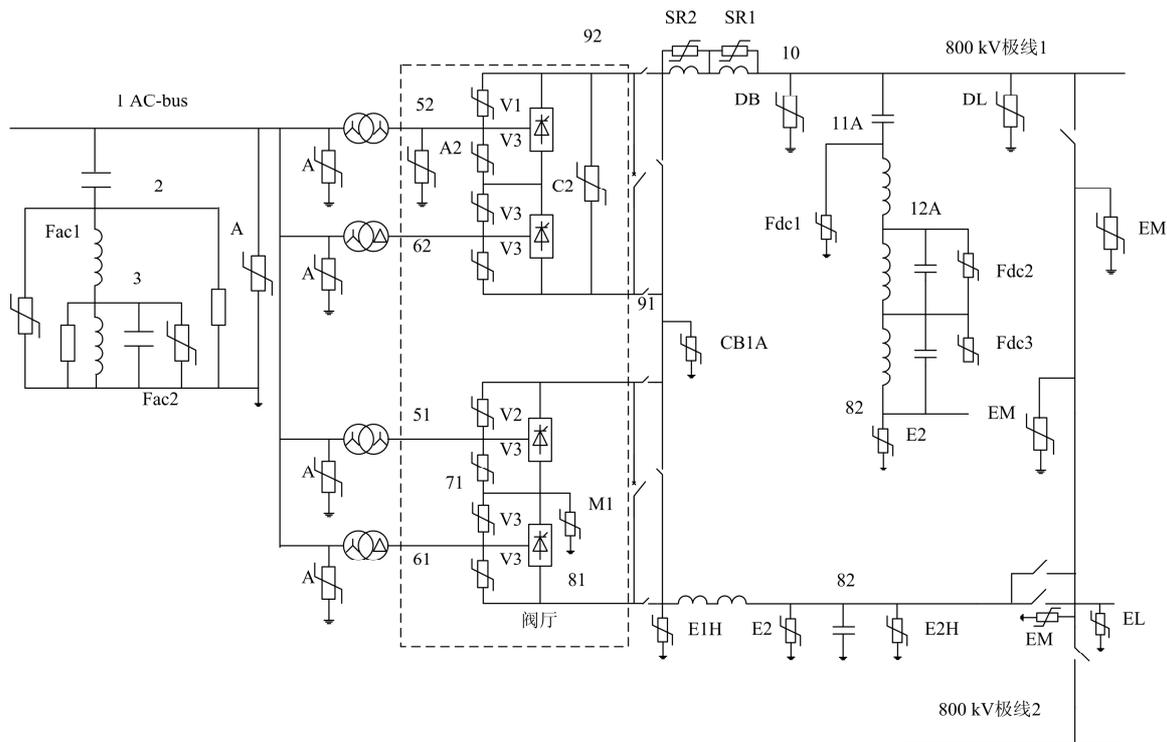


图 1 云广换流站单极避雷器布置方案

Fig. 1 Arresters protection scheme for single pole at Yun-Guang converter station

2 计算条件

2.1 计算原理

直流输电工程换流器采用半可控硅器件, 不具有自动关断能力。考虑到串联元件的误差, 晶闸管恢复阻断能力的时间最小关断角(或称息弧角) γ_{\min} 为 10° 。逆变器关断角 γ 计算方式为^[19]

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_d X_c}{U_L/K} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: α 为整流器触发角, β 为触发越前角, $\alpha + \beta = 180^\circ$, $\beta = \mu + \gamma$; μ 为换相角; I_d 为直流电流; X_c 为换相电抗; U_L 为换流母线线电压有效值; K 为换流变压器变比。

特高压直流输电工程每极双 12 脉动串联接线方式, 每个 12 脉动换流器由两个 6 脉动串接形成。其中, 6 脉动换流器正常运行时的直流电压为

$$U_{d1} = U_{d01} \cos\alpha - d_{r1} I_d \quad (2)$$

$$U_{d2} = U_{d02} \cos\gamma - d_{r2} I_d \quad (3)$$

式中: U_{d1} 、 U_{d2} 分别表示整流器和逆变器理想空载直流电压; X_{r1} 、 X_{r2} 为等值换相电抗; d_{r1} 、 d_{r2} 为比换压降, $d_{r1} = 3X_{r1}/\pi$, $d_{r2} = 3X_{r2}/\pi$ 。

特高压直流输电工程整流站和逆变站极对地电压分别为

$$U_{d1} = n(1.35U_1 \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d) \quad (4)$$

$$U_{d2} = n(1.35U_2 \cos\gamma - \frac{3}{\pi} X_{r2} I_d) \quad (5)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为整流站和逆变站变压器阀侧空载线电压有效值; n 为每站每极 6 脉动换流器的个数, 特高压直流输电工程为 4 个。 X_{r1} 、 X_{r2} 分别为整流站和逆变站每相的换相电抗。

2.2 系统主要参数

云广 ± 800 kV 特高压直流输电工程整流侧和逆变侧交流系统额定运行电压均为 525 kV, 额定直流电压等级为 800 kV, 直流额定功率为 5 000 MW。整流站和逆变站的额定参数如表 1 所示。

表 1 换流站额定参数

Table 1 Rated system parameters of converter station

交流电 压/kV	直流电 压/kV	直流电 流/kA	触发 角/($^\circ$)	熄弧 角/($^\circ$)
525(楚雄)	800	3 125	15 $^\circ$	10 $^\circ$
525(穗东)				

与常规高压直流输电相比, 云广特高压直流输电工程将电感值为 150 mH 的平波电抗器分别布置在极母线和中性母线上。150 mH 的平波电抗器由 2

台 75 mH 的干式平波电抗器串联提供, 整流侧和逆变侧换流站平波电抗器的布置方式和参数均相同。这种平均分置方式不仅可以减少双 12 脉动换流器中点和极母线处的谐波含量^[20], 而且可以降低高电位换流器的绝缘保护水平。

2.3 换流站主要避雷器描述及参数

云广特高压直流输电工程换流站主要布置的避雷器描述如表 2 所示。

表 2 换流站主要避雷器的描述

Table 2 Definition of arresters for converter stations

避雷器	描述
A	交流母线避雷器
A2	换流变阀侧避雷器
V1/V2/V3	阀避雷器
M1	下组 6 脉动桥间中点母线避雷器
C2	上组 12 脉动换流器避雷器
CB1A	上下 12 脉动换流器中点母线避雷器
DB、DL	直流母线、直流极线避雷器
SR1/SR2	平波电抗器并联避雷器
EM	金属回线避雷器
EL	接地极线避雷器
E1H/E2/E2H/EM/EL	中性母线避雷器

方案中相关避雷器参数如表 3 所示。表中 PCOV 表示持续运行电压的最高峰值, 包括换相过冲; CCOV 表示持续运行电压的最高峰值, 不包括换相过冲。

表 3 云广换流站避雷器参数

Table 3 Parameters of arresters for converter station

避雷器	PCOV/kV	CCOV/kV	参考电压/kV
A	449	449	578
A2	946	885	995
V3	287	245	292
CB1A	482	477	600
M1	286	245	373
C2	482	477	600
DB	—	816	1 127
DL	—	816	1 127
E	—	163	238
SR1/SR2	—	40	477

3 故障仿真与计算

3.1 阀顶对中性母线短路故障

换流站内设备间的短路故障将会在换流站各类设备上引起不同类型的过电压, 影响着设备的绝缘。阀顶(92)对中性母线短路故障时, 在整流侧表现为直流电流小于交流电流, 此时阀短路保护将动作闭

锁整流站,同时向逆变侧发出闭锁信号^[21]。逆变侧发生阀顶对中性母线故障通常由整流侧低压保护动作闭锁直流,该保护动作延时 0.5 s。

利用 PSCAD 仿真计算软件搭建云广特高压直流输电系统模型,设置故障发生在上阀组,故障发生时刻为 2 s,故障持续时间为 100 ms。

3.1.1 整流侧故障仿真

整流侧阀顶对中性母线故障时,仿真结果如图 2 所示。2 s 故障发生时,整流侧要早于逆变侧对故障做出反应。经过仿真计算可得,整流侧阀顶对中性母线短路故障时,整流侧负极线路出口将产生 1 015 kV 的过电压,约为 1.27 个 p.u.(1 p.u.=800 kV)。其他各点的过电压水平均不高,换流站各避雷器未动作。

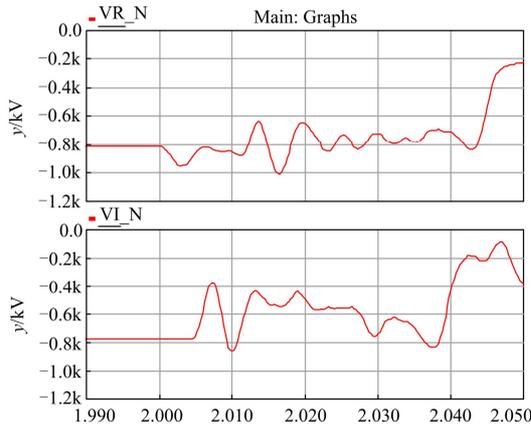


图 2 整流侧阀顶对中性母线短路故障仿真波形

Fig. 2 Simulation of short circuit occurred between at the top of convert valve and neutral bus at rectifier side

3.1.2 逆变侧故障仿真

逆变侧阀顶对中性母线故障时,仿真结果如图 3 所示。2 s 故障发生时,逆变侧要早于整流侧对故障做出反应。计算可得,逆变侧阀顶对中性母线短路故障时,过电压水平并不是很高,逆变侧负极线路出口处过电压出现时刻比整流侧要早,但其幅值略低于整流侧。换流站内仅中性母线避雷器动作,但能耗相对较低。

3.2 换流变阀侧单相接地短路故障

换流变阀侧发生单相接地故障时,需要释放直流滤波器和直流极线上的能量^[22-23],会引起过电压现象。整流侧和逆变侧在换流器阀侧单相接地故障时,阀的保护动作不同。整流侧换流变单相接地故障时,直流线路上的直流电流小于中性母线上的直流电流,换流阀差动保护动作闭锁并向逆变侧发出闭锁信号。逆变侧换流变阀侧单相接地故障只会在

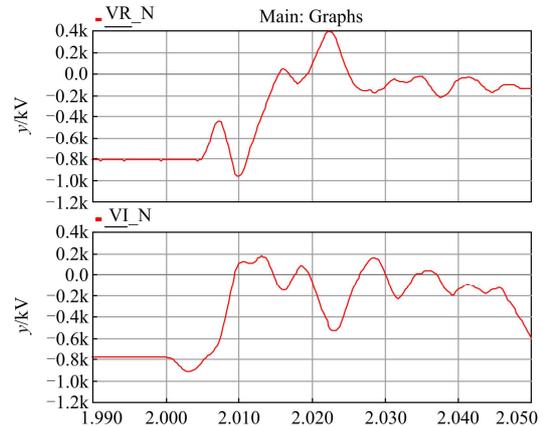


图 3 逆变侧阀顶对中性母线短路故障仿真

Fig. 3 Simulation of short circuit occurred between at the top of convert valve and neutral bus at inverter side

出现直流电流小于交流电流时,换流阀的短路保护动作闭锁。

整流侧换流变阀侧单相接地故障时,计算非故障极线路直流电压如表 4 所示。通过表 4 可以发现,上组高压端 Y/Y 绕组端子(52)处发生单相接地故障时过电压水平最高为 915 kV,平波电抗器、中性母线以及接地极线处均有较高的过电压,但仅有中性母线处的避雷器动作并且能耗不大。

表 4 整流侧换流变阀侧单相接地故障电压幅值

Table 4 Overvoltage amplitude of single-phase ground fault occurred at rectifier bridge side of converter transformer at rectifier side

故障位置	52	62	51	61
非故障极线路电压/kV	915	898	859	868

逆变侧换流变阀侧单极接地故障时,计算非故障极线路直流电压如表 5 所示。通过表 5 发现,逆变侧同样是上组高压端 Y/Y 绕组端子(52)处发生单相接地故障时过电压水平最高为 907 kV,这一特性与整流侧一样。

表 5 逆变侧换流变阀侧单相接地故障电压幅值

Table 5 Overvoltage amplitude of single-phase ground fault occurred at inverter bridge side of converter transformer at inverter side

故障位置	52	62	51	61
非故障极线路电压/kV	907	881	850	887

通过换流变阀侧单相接地故障计算发现,整流侧和逆变侧均是在上组高压端 Y/Y 绕组端子(52)处发生单相接地故障时过电压水平最高。云广特高压直流输电工程在上组高压端 Y/Y 绕组端子(52)处装

设了 A2 避雷器, 不仅减小了空气间隙, 而且还降低了换流变阀侧的操作绝缘水平。

4 结论

利用 PSCAD 仿真软件建立一个比较完整的云广特高压直流输电工程的模型, 仿真分析了换流站内换流器阀顶对中性母线短路故障和换流变阀侧单相接地短路故障两种工况下的过电压问题。结果表明:

(1) 整流侧换流器阀顶对中性母线短路故障时, 非故障极极线出口处将有 1 015 kV 的过电压, 约为 1.27 个 p.u., 其他各点的过电压水平均不高, 换流站各避雷器未动作。逆变侧换流器阀顶对中性母线短路故障时, 各点的过电压水平不高, 仅逆变站中性母线避雷器动作。

(2) 换流变阀侧单相接地故障时, 整流侧和逆变侧均表现为高压端 Y/Y 绕组端子(52)处发生单相接地故障时的过电压水平最高。整流侧故障仅中性母线避雷器动作。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 6-17.
- [2] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-3.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of National Power Grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-3.
- [3] 郭宏光, 吴庆范, 黄金海, 等. 特高压直流输电线路间电磁耦合对电压突变量保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 114-119.
GUO Hongguang, WU Qingfan, HUANG Jinhai, et al. Study on the influence of electromagnetic coupling of UHVDC power transmission lines on the voltage derivative protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 114-119.
- [4] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡—浙江±800kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [5] 胡永银, 李兴源, 李宽, 等. 云广特高压直流输电工程换流阀过负荷能力分析[与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 102-106.
HU Yongyin, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Analysis and calculation of converter valve overload capability in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 102-106.
- [6] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 65-71.
- [7] 陈锡磊, 周浩, 王东举, 等. ±800kV 浙西特高压直流换流站暂态过电压研究[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 22-26.
CHEN Xilei, ZHOU Hao, WANG Dongju, et al. Study on transient overvoltage of Zhexi converter station of ±800kV DC power transmission project[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 22-26.
- [8] 周沛洪, 修木洪, 谷定燮, 等. ±800kV 直流系统过电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 125-132.
ZHOU Peihong, XIU Muhong, GU Dingxie, et al. Study on overvoltage protection and insulation coordination for ±800 kV HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 125-132.
- [9] 马为民, 聂定珍, 曹燕民. 向家坝—上海±800kV 特高压直流工程中的关键技术[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-5.
MA Weimin, NIE Dingzhen, CAO Yanmin. Key technical schemes for ±800kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 1-5.
- [10] 聂定珍, 袁智勇. ±800 kV 向家坝—上海直流工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 1-5.
NIE Dingzhen, YUAN Zhiyong. Research on insulation coordination for ±800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 1-5.
- [11] 王华伟, 蒋卫平, 吴亚妮, 等. 云广±800kV 特高压直流工程逆变站最后断路器跳闸故障研究[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 6-9.
WANG Huawei, JIANG Weiping, WU Yani, et al. Study on last break trip fault of inverter station in±800kV UHVDC project from Yunan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 6-9.
- [12] 郭煜敬, 张豪. 高压端换流阀顶接地故障引起的换流站直流场操作过电压仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 104-109.
GUO Yujing, ZHANG Hao. Simulation study on switching overvoltage in converter substation caused by

- grounding fault at the top of high-voltage thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 104-109.
- [13] 张翠霞, 刘之方. ± 800 kV 直流输电工程过电压保护与绝缘配合研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 43-46.
ZHANG Cuixia, LIU Zhifang. Study on overvoltage protection and insulation coordination for ± 800 kV HVDC transmission system[J]. Electric Power, 2006, 39(10): 43-46.
- [14] 黄用瑞, 李芳芳, 何青连, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统换流站绝缘配合研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 81-85.
HUANG Yongrui, LI Fangfang, HE Qinglian, et al. Research on converter station insulation coordination of ± 800 kV ultra high voltage direct current power transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 81-85.
- [15] 国网电力科学研究院. ± 800 kV 云广特高压换流站雷电侵入波过电压研究[R]. 南京: 国网电力科学研究院, 2009.
- [16] 周沛洪, 赵杰, 吕金壮, 等. ± 800 kV 云广 DC 换流站避雷器布置和参数选择[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2603-2610.
ZHOU Peihong, ZHAO Jie, LÜ Jinzhuang, et al. Arrester protection scheme and arrester parameters selection for ± 800 kV YunGuang UHVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2603-2610.
- [17] 黎建平, 汪凤娇, 卢文浩, 等. 特高压直流保护与避雷器动作特性配合分析[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 100-105.
LI Jianping, WANG Fengjiao, LU Wenhao, et al. Coordination of UHVDC protection with arresters operating characteristics[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 100-105.
- [18] 吕金壮, 赵杰. 云广 ± 800 kV 直流输电系统过电压与绝缘配合研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 18-22.
LÜ Jinzhuang, ZHAO Jie. Study on overvoltage and insulation coordination of YunGuang ± 800 kV UHVDC transmission system[J]. Southern Power Technology, 2009, 3(2): 18-22.
- [19] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 37-56.
- [20] 雷园园, 赵现平. ± 800 kV 云广直流输电工程平波电抗器参数选择和布置方案[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 75-79.
LEI Yuanyuan, ZHAO Xianping. Parameters selection and arrangement of smoothing reactor for ± 800 kV YunGuang UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 75-79.
- [21] 刘振亚. 特高压直流输电系统过电压及绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 28-35.
- [22] 王东举, 邓旭, 周浩, 等. ± 800 kV 溪洛渡—浙西直流输电工程换流站直流暂态过电压[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 7-11.
WANG Dongju, DENG Xu, ZHOU Hao, et al. On the transient overvoltage in the converter station of ± 800 kV Xiluodu-Zhexi HVDC project[J]. Southern Power Technology, 2012, 6(2): 7-11.
- [23] 司马文霞, 庞凯, 杨庆. ± 800 kV 特高压换流站直流侧操作过电压的仿真与研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 126-128.
SIMA Wenxia, PANG Kai, YANG Qing. Simulation and investigation on switching overvoltage at DC side of UHVDC converter station with capacity of ± 800 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 126-128.

收稿日期: 2015-07-24; 修回日期: 2015-10-09

作者简介:

裴 昂 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电; E-mail: 297753876@qq.com

吕思颖 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

秦 昕 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化。

(编辑 葛艳娜)