

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.034

±800 kV 特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法

张启浩¹, 吴德贯², 马正霖¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司昆明局, 昆明 650300; 2. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 昆明 650217)

摘要: 2011~2016年期间,运用在±800 kV直流输电工程中的某类型直流穿墙套管先后6次发生故障,暴露出其在电气连接方面的一系列设计缺陷:均压罩等电位接触不良、表带触指接触电阻过大等。结合直流穿墙套管SF₆分解产物超标、内部闪络、回路电阻超标、接头发热案例深入分析了直流穿墙套管故障的原因,总结了增加防松螺钉、等电位线、O型密封圈、接头镀银等改进措施,提出了增加等电位连接可靠性、保证通流裕度的直流穿墙套管设计建议,并提出重视SF₆分解产物测试、增加回路电阻测试的运维建议。

关键词: 直流穿墙套管; 表带触指; 均压罩; 等电位; 回路电阻

Defect and Improved Method of DC Wall Bushing Design in ±800 kV UHVDC Transmission Project

ZHANG Qihao¹, WU Deguan², MA Zhenglin¹

(1. Kunming Bureau, CSG EHV Transmission Company, Kunming 650300, China; 2. Test & Maintenance Center of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China)

Abstract: DC wall bushing of certain type in ±800 kV UHVDC transmission projection successively malfunctioned six times, and exposing a series of design defects in its electrical design such as the bad contact of the equipotential shield electrode or the band connector, and so on. The paper deeply analyses fault causes of DC wall bushing through cases of SF₆ breakdown products over proof, internal flashover, loop resistance over proof, connector overheating. Improved methods such as increasing the locking screws, equipotential wires, seal rings and plating connector with silver are summarized. Design proposals of DC wall bushing such as increasing the reliability of equipotential connector and ensuring the current margin are proposed. The paper proposes the suggestions for operation and maintenance of paying more attention to SF₆ breakdown products and increasing the loop resistance test.

Key words: DC wall bushing; band connector; shield electrode; equipotential; loop resistance

0 引言

直流穿墙套管是高压直流输电系统中不可或缺的设备,特别是特高压直流穿墙套管,应用时间不长,其设计制造、运行维护经验均较少。某特高压换流站自投运以来,其±800 kV直流穿墙套管先后发生多起故障,笔者通过对故障套管开展现场解体修复和故障分析工作,总结了现场故障检测方法和修复经验,并提出了该类型直流穿墙套管缺陷的改进方法。

1 直流穿墙套管结构

故障套管的结构见图1,由内外两根气体绝缘电容式套管对接而成。套管本体从内到外依次为导电管、环氧树脂浸渍电容芯子、SF₆气体、环氧玻璃纤维缠绕管、硅橡胶伞群。内外两根套管法兰通过螺栓连接在一起组成了一个连接腔室,腔室内两根套管通过表带触指插接,插接部位安装有均压罩防止电场畸变导致绝缘击穿^[1-4],见图2。套管两端端部接线头与套管主导电杆之间也采用表带触指

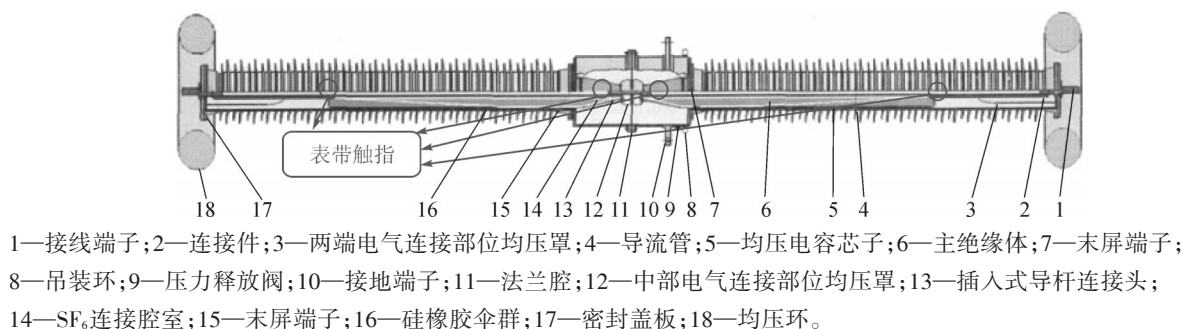
图1 ± 800 kV 直流穿墙套管内部结构图

Fig. 1 Interior view of 800 kV DC wall bushing

插接。

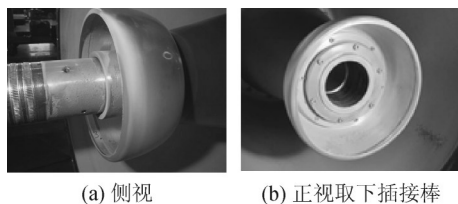


图2 内外套管连接腔室

Fig. 2 Connecting chamber between the indoor and outdoor bushing

2 均压罩等电位接触不良

2011年3月份在对某换流站 ± 800 kV 直流穿墙套管进行现场 SF_6 分解产物分析时发现 SO_2 体积分数超标,实测数据及Q/CSG114002—2011《电力设备预防性试验规程》参考标准见表1。

表1 现场 SF_6 分解产物分析Table 1 The data of SF_6 decomposition products

名称	微水/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	SO_2 / ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	H_2S / ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	CO/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	时间
+800 kV DC 套管	290	26.21	4.64	8.47	2013-03-11
-800 kV DC 套管	152	0.00	0.00	28.60	2013-03-11
参考 标准	500	≤ 3.00	≤ 2.00	≤ 100.00	—

由表1可以看出,800 kV 直流穿墙套管气室中 SO_2 及 H_2S 气体体积分数超过了参考标准,且 SO_2 体积分数较多。

套管的回路电阻测量值为 $108 \mu\Omega$,符合厂家要求,排除主回路接触不良的可能性;对末屏接地端子进行拆解检查,弹簧弹性正常,末屏接地稳定,排除末屏放电的可能;根据检测结果初步判断套管内部存在轻微放电^[5-10]。

2.1 现场解体检查与分析

1)现场解体检查。2012年8月份对故障800 kV

直流穿墙套管进行了现场解体。解剖后发现连接腔室外壳及中部电气连接部位均压罩(位于图1中12)内有白色粉末。

2)粉末X射线荧光分析。对套管内部粉末进行X射线荧光分析,发现粉末的主要成分为Al和Fe的氧化物及氟化物,其他还有少量硫、铜、铬、镍元素,X射线荧光分析结果见图3、4。

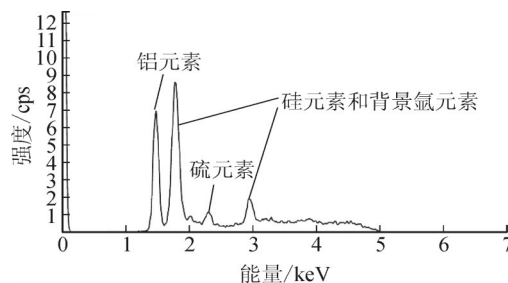


图3 Al、F元素的X射线荧光分析

Fig. 3 X-Ray fluorescence analyses of the components

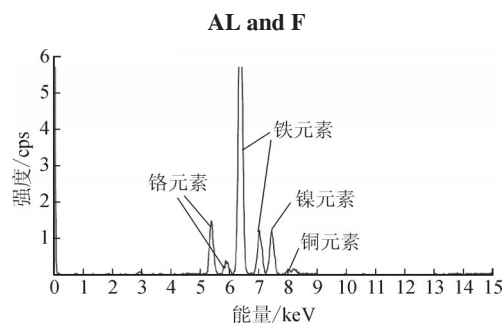


图4 Fe、Cr、Ni、Cu元素的X射线荧光分析

Fig. 4 X-Ray fluorescence analyses of the components

Fe、Cr、Ni、Cu

3)粉末溶解度及电导率。该粉末在水中溶解度较低,将 $50 \mu\text{g}$ 粉末投于5 mL去离子水中,所萃取出的溶液电导率为 $96 \mu\text{S}/\text{cm}$,pH值为4.1。电导率测试表明该粉末中导电的水溶性成分体积分数较少。

根据上述检测, SF_6 气体中产生了较多的 SO_2 ,套管连接腔室产生灰白色粉末,粉末成分大部分为Al和Fe的氧化物及氟化物,初步判定放电点位于连接腔室。连接腔室内均压罩与导电管材料为Al、导电

管和均压罩之间的固定环材料为不锈钢,如图3所示。拆下均压环检查发现固定环内侧螺纹处有大量灰白色粉末,经X射线荧光分析,其成分与腔室法兰内粉末一致。在固定环内侧螺纹上发现了明显的放电损伤,见图5。

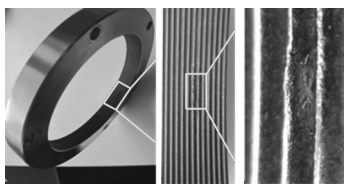


图5 固定环上的放电损伤

Fig. 5 Sparking marks on the ring

2.2 故障原因分析

根据上述解体检查及分析情况, ± 800 kV 直流穿墙套管投入运行后其固定环与导电管之间有接触不良,导致导电管(Al)与固定环(Fe)之间放电,损伤固定环及导电管,并与 SF_6 反应产生 SO_2 、铁铝的氟化物及硫化物形成的粉尘。由于不锈钢中含有微量的铬、镍,因此在粉尘中也检测出了微量的铬、镍的成分。粉尘慢慢附着在套管内外部分短尾端电容屏以及绝缘钢筒内壁可能导致更为严重的绝缘闪络。2013年12月某800 kV 直流逆变站发生单阀组闭锁,检查发现800 kV 直流穿墙套管短尾端电容屏表面发生树枝状爬电,表面有大量白色粉末,固定环螺纹有放电烧蚀痕迹,进一步的X射线荧光分析也证明该粉末为固定环与导电杆放电导致,见图6、7。



图6 套管户外部分短尾端电容屏表面的树枝状爬电现象

Fig. 6 Dendritic discharge trace on capacitance plates, of the outdoor bushing

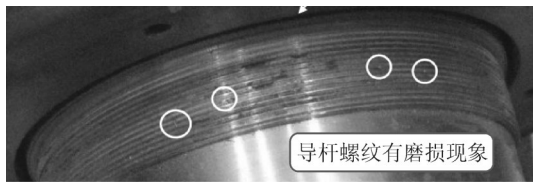


图7 导电杆螺纹电蚀痕迹,此处与图5固定环匹配

Fig. 7 The discharge trace on the conductive rod, which matching the sparking marks on Fig. 5

3 表带触指接触电阻过大

2014年3月份某 ± 800 kV 直流输电工程对 ± 800 kV 直流穿墙套管开展预防性试验,发现1支套管回路

电阻偏大,且在后期发现电阻波动性较大,测试数据见表2。

表2 回路电阻测试数据

Table 2 The data of circuit resistance

名称	出厂值	安装位置	地面	解体前
± 800 kV 套管/ $\mu\Omega$	112	245	150	94
参考标准	参考GIS标准,不大于厂家规定值的120%			

其他直流套管经测试也有电阻偏大的情况,最大超过出厂值54.5%。部分回路电阻测试正常的 ± 800 kV 直流穿墙套管在后期解剖中也发现表带触指有烧蚀痕迹,见图7。严重者红外测温即可检测出发热。2016年9月20日,某 ± 800 kV 直流换流站直流穿墙套管即发生接头发热故障,见图8。测试回路电阻 $86 \mu\Omega$,远大于出厂值 $36 \mu\Omega$ [11]。

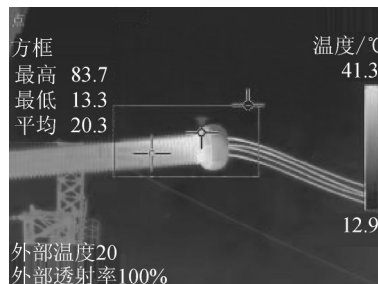


图8 直流穿墙套管接头发热

Fig. 8 Overheat of DC wall bushing's connector

对上述800 kV 直流穿墙套管解剖检查均发现其表带触指表面有过热痕迹,中部套管对接部分的表带触指两端均有大量较深划痕,见图9、10。

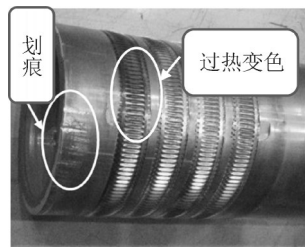


图9 直流穿墙套管中部表带触指过热痕迹及导电管划痕

Fig. 9 The overheat trace of band connector and the scratch on the conductive rod

该类型直流穿墙套管内部采用了较多的表带触指结构用于导电,其中800 kV 直流穿墙套管有4处表带触指,400 kV 直流穿墙套管有2处表带触指。表带触指接触属于滑动接触,根据现有成型的设计经验,滑动接触部位应采取镀银、润滑的措施以降低接触电阻、提高摩擦性能 [12-13]。

原套管设计未考虑镀银措施,由于直流穿墙套管为横向安装,中部承力,两端下沉,套管中轴线变

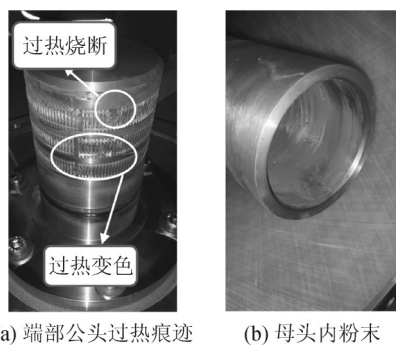


图10 直流穿墙套管端部表带触指过热痕迹

Fig. 10 The overheat trace of band connector from the bushing

形,各电气连接不再同轴心,各电接触面产生轻微变形,图9所示划痕即为变形所致^[14]。对于螺栓连接的固定接触由于电接触力矩极大,这种变形可以忽略不计,而对于滑动接触,由于其允许其滑动裕度的存在,必然会导致不可忽略的变形,最典型的是表带触指一侧变紧、一侧变松,这种变形直接导致其通流能力低于其设计值,在实际运行中导致发热。

在初始阶段,发热也许不会很严重,但发热会带来3点影响:①会进一步加剧电接触表面氧化,使接触电阻变大;②不同负荷下的发热所产生的热胀冷缩则进一步加剧电接触面间的摩擦,使电接触更加恶化;③发热导致电力脂变质甚至变干,失去润滑、抗氧化特性,使电接触面氧化加剧、摩擦性能劣化。对于直流穿墙套管其中部对接部位为铜与铝的电接触,由于铜和铝的比热容不同,其热胀冷缩所导致的电接触面摩擦更为严重^[15-17]。

4 改进措施

综上所述,直流穿墙套管均压罩等电位接触不良,是由于内外部分连接腔室内均压罩采用不锈钢固定环螺接在铝制导电管上,由于材质及结构原因,无力矩防止其松动。在正常运行过程中由于存在电力的震动和风吹导致的摆动,其不锈钢固定环螺纹连接可能出现滑动,从而导致固定环与导电管直接电气连接出现瞬时的失效,产生放电。

表带触指接触不良是由于接触部位未做镀银处理,导致接触电阻过大,电接触面异常发热,而发热进一步恶化电接触。

针对上述问题直流穿墙套管进行了一下的改进:

1)为防止这种滑动的产生,对固定环进行了改进,在其侧面增加了两颗对称的防松螺钉,见图11中画圈处。



图11 固定环上增加的防松螺钉

Fig. 11 Additional locking screw on the ring

增加防松螺钉后,需对A-B间的接触电阻进行测量以保证其电接触的良好。并与改造之前的电阻值比较,确保改造的安全性,见表3。

表3 A-B间改造前后的接触电阻

Table 3 The contact resistance between A side and B side for pre and post modification $\mu\Omega$

设备	改造前	改造后
室内部分	8.2	9.0
室外部分	9.8	8.1

2)在导电杆与固定环,固定环与电容屏铜端环之间加等电位线,确保导电杆、固定环、电容屏铜端环始终处于等电位^[18-20],见图12。

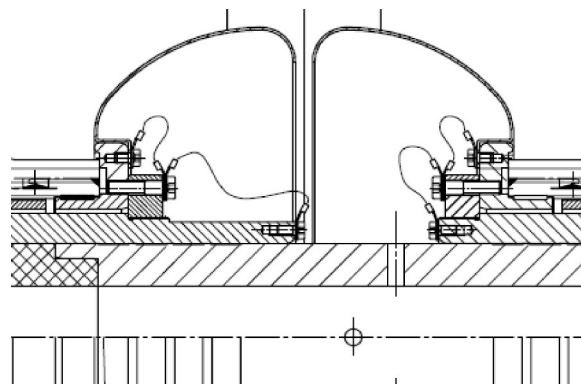


图12 导电杆、压紧环、电容屏铜端环三者之间用等电位线连接

Fig. 12 Combining the conductive rod, the ring and the capacitance plates together by using isoelectric wire

3)在表带触指安装槽以及对应的导电杆内壁镀银。

4)在套管中部连接杆两端表带触指的前后各加1道密封圈,在两端表带触指外侧增加1道密封圈,以防止电气连接部位因震动、摆动摩擦产生的粉末、轻微放电产生的粉末、电力脂扩散进其他腔室,导致绝缘故障,见图13。

5 结论

直流穿墙套管是特高压直流输电工程中的关

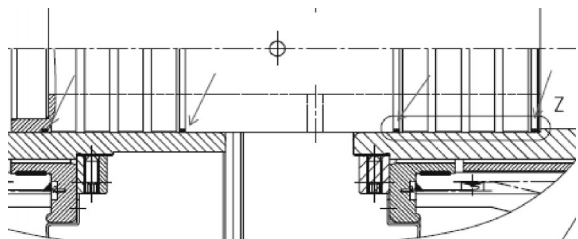


图13 ± 800 kV 直流穿墙套管中部连接杆表带触指两端加密封圈(箭头所示位置)

Fig. 13 Adding seal rings around the connecting rod in the middle of ± 800 kV DC wall bushing(As the arrow pointing)

键设备,世界范围内应用时间较短,该型直流穿墙套管的故障处理、设计改进对以后的特高压直流输电设备的检修维护、设计制造有重要的借鉴意义。

1)套管生产厂家及设计院在设计研发及生产中应充分考虑套管内部等电位连接点的可靠性,以免发生异常放电;同时对于套管内部的电气连接部位的设计要尽量考虑裕度,特别是对于表带触指这种滑动接触,尽量采用镀银处理,以保证其良好的电接触。

2) SF_6 高压设备发生放电、过热等故障,通过现场测试其分解产物 SO_2 、 H_2S 、 CO 的体积分数,可以迅速发现直流穿墙套管异常,应当予以重视。同时由于直流穿墙套管内部电气滑动连接较多,应当将回路电阻测试纳入预防性试验项目,制造厂家应提供厂家规定值,并在现场执行GIS回路电阻控制标准。

参考文献:

[1] 潘国洪,朱华艳. ± 800 kV 直流穿墙套管安装和现场试验关键技术研究[J]. 高压电器,2013,49(2):98-102.
PAN Guohong, ZHU Huayan, Key technologies research for the installation and field test of ± 800 kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 98-102.

[2] 黎卫国,张长虹,夏谷林,等. ± 800 kV 直流穿墙套管介损超标原因分析及改进措施[J]. 高压电器,2015,51(9):169-176.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, XIA Gulin, et al. Case study on abnormal dielectric loss of a ± 800 kV DC wall bushing with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 169-176.

[3] 陈忠,伍衡,黄和燕,等. ± 800 kV 直流穿墙套管耐压试验发生外闪原因分析及改进措施[J]. 高电压技术,2011,37(9):2133-2139.
CHEN Zhong, WU Heng, HUANG Heyan, et al. Cause analysis and improvement measure of ± 800 kV DC wall bushing occurring flashover during overvoltage withstand test[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2133-2139.

[4] 彭翔,陈禾,夏谷林,等. 贵广直流输电工程换流变网侧高压套管事故分析及建议[J]. 变压器,2013,50(9):66-68.
PENG Xiang, CHEN He, XIA Gulin, et al. Analysis and suggestions of converter transformer HV line side bushing for Gui-Guang HVDC project[J]. Transformer, 2013, 50(9): 66-68.

[5] 王宇,李丽,姚唯建,等. 模拟电气设备过热故障时 SF_6 气体分解产物的体积分数及其特征[J]. 高压电器,2011,47(1):62-69.
WANG Yu, LI Li, YAO Weijian, et al. Analyzing decomposition products in overheat faults simulation to evaluate SF_6 gas insulation device[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 62-69.

[6] 郭欣. 变电站设备接头发热的分析及预防[J]. 青海电力,2009,28(z1):59-63.
GUO Xin. Analysis on equipment connector heating in substation and prevention[J]. Qinghai Electric Power, 2009, 28(z1): 59-63.

[7] 许杨,李锋,刘硕,等. SF_6 分解物检测在高压直流套管故障诊断中的应用[J]. 中国电力,2013,46(7):61-65.
XU Yang, LI Fengfeng, LIU Qi, et al. Application of detection technology of SF_6 decomposition products to fault diagnoses of HVDC bushings[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 61-65.

[8] 何杰,吕永红,王四保,等. 500 kV 断路器均压电容器介质损耗超标分析[J]. 中国电力,2011,44(5):34-37.
HE Jie, LYU Yonghong, WANG Sibao, et al. Studies on hyper-scaling dielectric loss of grading capacitors of 500 kV breakers[J]. Electric Power, 2011, 44(5): 34-37.

[9] 梁方建,张道乾. GW5-110 型隔离开关触头发热缺陷分析及检修处理[J]. 高压电器,2008,44(1):88-90.
LIANG Fangjian, ZHANG Daoqian. Reason analysis and maintenance for overheat faults of type GW5-110 disconnector contact[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 88-90.

[10] 刘永,印华,姚强,等. 气体分析技术在GIS故障定位和故障类型判断中的应用[J]. 高压电器,2009,45(3):132-134.
LIU Yong, YIN Hua, YAO Qiang, et al. Application of gas analysis technology on the fault location and fault type diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 132-134.

[11] 电力设备预防性试验规程:Q/CSG 114002—2011[S]. 2011. Regulations for preventive test of electric power equipments: Q/CSG 114002—2011[S]. 2011.

[12] 杨晓峰,张晗,邓军,等. 超高压输变电设备发热缺陷的统计与分析处理[J]. 高压电器,2015,51(5):180-183.
YANG Xiaofeng, ZHANG Han, DENG Jun, et al. Statistics and treatment of overheating defect of EHV power transmission equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 180-183.

- 180-183.
- [13] 王文洪,何满棠. 252 kV GIS 设备罐体发热缺陷的原因分析[J]. 高压电器,2009,45(3):148-150.
WANG Wenhong, HE Mantang. Analysis of tank heating fault of 252 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(3): 148-150.
- [14] 季严松,王承玉,杨 韧,等. SF₆气体分解产物检测技术及其在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2011,47(2):100-103.
JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(2):100-103.
- [15] 田兴旺,唐晓玲,吕家圣. 红外诊断在高压直流输电系统阀电抗器发热故障分析中的应用[J]. 高压电器,2008,44(5):469-471.
TIAN Xingwang, TANG Xiaoling, LYU Jiasheng. Application of infrared diagnosis in valve reactor overheat analysis of HVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2008,44(5): 469-471.
- [16] 曾喜闻,凌 云. GIS 电流互感器局部过热原因分析及处理[J]. 湖北电力,2009,33(3):15.
ZENG Xiwen, LING Yun. Cause analysis and treatment for partial excess temperature of GIS TA[J]. Hubei Electric Power, 2009,33(3):15.
- [17] 刘 欢,邓 科,付汉江,等. SF₆ 气体分解物与 GIS 设备运行状态关系的探讨[J]. 高压电器,2013,49(10):127-132.
LIU Huan, DENG Ke, FU Hanjiang, et al. Investigation on the relationship between SF₆ gas decomposition and GIS equipment operating status[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(10):127-132.
- [18] 刘 鹏,金海云,石惠承,等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究[J]. 高压电器,2009,45(5):6-8.
LIU Peng, JIN Haiyun, SHI Huicheng, et al. Investigation on dielectric properties of epoxy/crepe paper composites for ultra-high voltage DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(5): 6-8.
- [19] 刘小刚,王茂忠,种芝艺,等. ± 500 kV 阀厅电气连接及金具设计特点[J]. 电力建设,2011,32(9):24-29.
LIU Xiaogang, WANG Maozhong, CHONG Zhiyi, et al. Electric connections and fittings design in vall hall of ± 500 kV Baoji converter station[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(9):24-29.
- [20] 王 伟,韩金华,郭运明,等. 一起进口套管烧损故障情况介绍[J]. 高压电器,2012,48(2):115-122.
WANG Wei, HAN Jinhua, GUO Yunming, et al. Analysis of a burned-out failure of transformer bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(2):115-122.
- [21] KONCHITS V V, MYSHKIN N K. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军、芦 娜、林雪燕,译. 北京:机械工业出版社,2010.
KONCHITS V V, MYSHKIN N K. Electrical contacts fundamentals, applications and technology[M]. XU Liangjun, LU Na, LIN Xueyan, Translate. Beijing: China Machine Press, 2010.
- 张启浩(1986—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修维护工作。
- 吴德贯(1987—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修试验工作。
- 马正霖(1990—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修试验工作。

(上接第 238 页)

2058.
ZHOU Wenjun, YU Jianhui, CHEN Rong, et al. Research on whole parameters of lightning current waveform and on-line monitoring of arresters[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(10):2054-2058.
- [20] 李志兵,颜湘莲,王 浩,等. 金属氧化物避雷器在陡波下的试验与模型分析[J]. 高电压技术,2012,38(10):2698-2706.
LI Zhibing, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep - front wave[J]. High Voltage Engineering, 2012,38(10):2698-2706.
- 史志强(1991—),男,硕士,研究生,研究方向为电力系统过电压等。