

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.05.024

±800 kV 直流穿墙套管接头异常发热原因研究

孙庆峰^{1,2,3}, 周平⁴, 朱贵池⁵, 周宇通³, 张杰³,
赵洲峰³, 李娜⁶, 王振亚⁶

(1. 浙江省电力锅炉压力容器检验所有限公司, 杭州 310014; 2. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310014;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014; 4. 国网浙江省电力公司湖州供电公司, 浙江湖州 318000;
5. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 杭州 311232; 6. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘要: 为明确±800 kV 某换流站直流穿墙套管接头异常发热的原因, 采用宏观检查、光谱分析、X射线检测、载流能力计算、应力分析等方法, 分析了材料、结构、尺寸变化对载流能力的影响, 并利用空载装配、压紧和仿真等试验进一步验证了套管端子铜头和线夹抱箍之间的配合工况。发现抱箍本体存在受力变形, 且其材质不符合标准要求。结果表明, 引起套管接头发热的主因是抱箍变形, 变形产生的配合间隙使得导体有效载流接触面积减小、导电率下降, 电阻增大; 次因是材质不符合标准要求, 并据此提出了相应的改进措施。
关键词: 特高压; 穿墙套管; 接触不良; 异常发热

Study on Abnormal Overheating of ±800 kV DC Wall Bushing Joint

SUN Qingfeng^{1,2,3}, ZHOU Ping⁴, ZHU Guichi⁵, ZHOU Yutong³, ZHANG Jie³,
ZHAO Zhoufeng³, LI Na⁶, WANG Zhenya⁶

(1. Zhejiang Electric Power Boiler & Pressure Vessel Supervision and Inspection Institute Company Limited, Zhejiang 310014, China;
2. E.Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China; 4. State Grid Huzhou Power Supply Company, Zhejiang Huzhou 318000, China; 5. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311232, China; 6. State Grid Chongqing Electric Power Corporation Maintenance Company, Congqing 400039, China)

Abstract: In order to clarify the cause of the abnormal overheating of wall bushing joint of certain ±800 kV converter station, the influence of material, structure and size variation on the current carrying capacity is analyzed by way of adopting such methods as macroscopic inspection, spectral analysis, X-ray detection, current carrying capacity calculation and stress analysis. Furthermore, the matching working condition between the copper head of the sleeve terminal and the clamp hoop of the wire clamp is further verified by the tests such as no-load assembly, compression and simulation. It is found that the hoop proper has the deformation and its material does not comply with standard requirement. The results show that the main cause leading to the overheating of bushing joint is the hoop deformation, the decrease of effective current-carrying area of conductor due to the coordination of the deformation, decrease of conductivity and increase of resistance. The secondary reason is that the material does not comply with the standard requirements. Finally, the corresponding improvement measures are proposed.

Key words: ultra-high voltage; wall bushing; poor contact; abnormal overheating

0 引言

特高压电网是指 1 000 kV 及以上交流电网和±800 kV 及以上的直流电网, 它具有远距离、大容量、低损耗、占地面积小的优势^[1]。特高压的输电能

力是 500 kV 超高压电网的 2.4~5 倍, 被誉为“电力高速公路”^[2]。

近年来, 为了解决西南弃水和“三北”弃风、弃光等问题, 将清洁能源提供给中东部地区, 保障电力供应, 实现不同地区的资源互补, 促进共同发展,

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-01-09

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS17002B)。

Project Supported by State Grid Scientific and Technological Research Program of China(5211DS17002B).

降低社会成本, 国家将国网公司“五交五直”特高压工程纳入规划; 特高压工程的建设有利于促进电工技术的飞速发展, 巩固中国电工设备领先地位^[3-10]。因此, 利用技术手段保障特高压设备的安全运行, 综合效益显著^[11]。

穿墙套管作导电部分穿过墙体或接地物的绝缘和支持用, 主要由瓷套、安装法兰和导体组成。在 ± 800 kV 换流站, 直流穿墙套管用于换流阀厅和直流场的连接, 其连接部位的配合理应值得重视^[12-15]。文[16]介绍了2011—2016年, 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, 并据此提出了改进方法; 文[17]介绍了一起变压器套管接头发热缺陷的分析和处理, 经解体检查出发热原因系定位螺母松动所致。电气设备发热是电网运行中较为常见的缺陷, 上述文献均提到连接松动是引起套管发热缺陷的原因。

换流站直流穿墙套管接头由导电杆端子铜头和设备线夹抱箍连接组成, 将直流场的电流经导体传输至换流阀。运行经验表明, 导电部位连接松动, 将会使有效载流面积减小, 在局部点形成接触不良^[18-20]、电阻增大缺陷^[21-24], 当负荷电流继续增大时, 接触部位的温升随着电流增大而升高^[25], 接头在长时间热效应下的恶性循环, 可能会导致接触部位烧熔, 引发火灾, 引起套管炸裂等极端事故的发生^[26-27]。

2019年6月, 投运仅3年的特高压某换流站极 I、极 II 高端穿墙套管连续发生异常发热现象, 不得不停电检修。为了明确该站穿墙套管产生异常发热的原因, 首先通过红外测温、宏观检查, 光谱分析、X 射线检测等技术手段对异常发热部位进行了分析; 其次, 运用载流能力计算、应力计算、受力分析等方法从材料、结构、尺寸变化对载流能力的影响等角度讨论了该套管产生异常发热的原因, 并利用空载装配、压紧试验和仿真计算等进一步验证了发热部位的配合工况, 以便明确发热事故产生的主因和次因; 最后, 对上述试验和计算进行了分析和讨论。

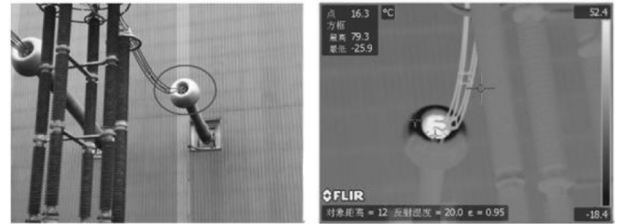
采用下述试验的目的是为同类型特高压换流站直流套管接头部位异常发热处理分析提供指导意见。

1 试验

1.1 红外测温

经红外测温, 发现该站极 I 高端 400 kV 直流穿墙套管直流场接头温度偏高, 最高 79.3 °C (负荷电流约 4 700 A), 其余同位置 45 °C, 见图 1; 极 II 高端 800 kV

直流穿墙套管直流场接头最高温度 56.6 °C, 其余同位置 31.9 °C。



极 I 高端 400 kV 穿墙套管发热位置 极 I 高端 400 kV 穿墙套管测温图

图 1 红外测温位置

Fig. 1 Position of infrared temperature measurement

结合对侧换流站限负荷的时机, 对该发热部位进行了“十步法”消缺处理, 其中对极 I 高端 400 kV 直流穿墙套管连接金具进行了更换处理。投运后, 经连续红外测温跟踪, 发现发热现象依然存在, 见图 2 (单位: °C)。



图 2 跟踪红外测温

Fig. 2 Tracking infrared temperature measurement

根据连续测温记录显示, 上述发热部位温度随着负荷电流大小变化明显上升或下降, 可判定属于电流型发热。同时, 对比可见光图片见图 3, 并从套管接头处结构及发热区域位于中心位置来判断, 该套管接头处发热是由导电杆端子和线夹抱箍之间接触不良所引起。



图 3 穿墙套管可见光照片

Fig. 3 Picture of sleeve

1.2 宏观检查

在对故障接头处拆卸过程中, 对导电杆端子铜头进行了外观、尺寸、孔中心轴线度和端面平行度进行了检查, 发现其符合相关技术要求^[28]。因特高压换流站停电时间较短, 且穿墙套管导电杆拆卸工作量过大, 在相关检测合格的基础上, 仅拆卸了温度最高的极 I 高端穿墙套管抱箍, 然后对其进行了宏

观检查,其宏观形貌见图4。抱箍本体呈暗红色,符合T2纯铜材质的宏观特征。经检查,抱箍本体无裂纹或孔洞等明显损伤,但存在轻微变形的迹象,该抱箍是否有变形,需要进一步的试验验证;而且,由于发热温度较低,最高只有90.6℃,因此未能在抱箍本体表面观察到过度氧化或灼烧发黑的痕迹。

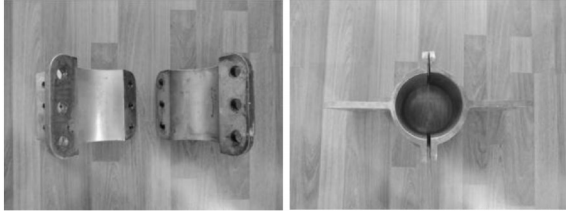


图4 抱箍本体的宏观形貌

Fig. 4 Macromorphology of hoop body

1.3 光谱分析

查阅图纸,得知抱箍材质为T2纯铜。将抱箍本体切割制样,采用台式光谱仪对抱箍的材质进行了复核,其结果列于表1中。根据GB/T 5231—2012《加工铜及铜合金牌号和化学成分》中对T2铜化学成分的要求,Cu和Ag元素的含量需大于等于99.9%,但抱箍本体的Cu和Ag元素含量只有99.79%,不符合标准要求。

表1 抱箍本体的化学成分

项目	P	S	Fe	Sn	Pb	Cu+Ag
抱箍	0.09	0.01	0.04	0.03	0.01	99.79
T2铜	—	—	—	—	—	≥99.90

1.4 X射线检测

为检查抱箍本体的内部质量,运用数字X射线技术进行了内部探伤检测。从多个不同角度对样品进行了射线拍片,其结果见图5。从图5中可以看出,在其中一只抱箍本体的引流板根部(如图5中圈标注的位置)发现一个面积较大的内部孔洞。

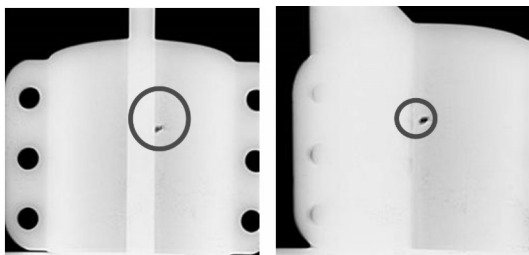


图5 抱箍本体的X射线探伤图

Fig. 5 X-ray flaw detection diagram of hoop body

1.5 结果和讨论

从红外测温及发热部位特征结果来看,该套管发热是由导电杆端子和线夹抱箍之间接触不良所

引起。抱箍在外观检测中,发现有轻微变形的迹象,且抱箍存在材质不符合标准要求和内部有孔洞等缺陷,为探究套管发热是否由抱箍所引起,有必要对其进行相关验证工作,以便分析所用。

2 验证

2.1 载流能力计算

极I高端400 kV直流穿墙套管结构见图6,电流经四分裂导线、线夹、导体等传输至换流阀,导电杆为铝质材料,其端部端子铜头和抱箍一样均采用T2纯铜。

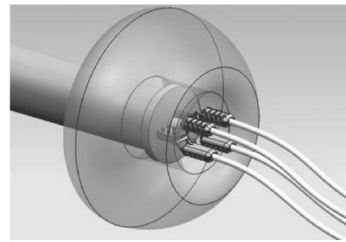


图6 套管结构图

Fig. 6 Structure diagram of sleeve

DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》:当回路电流大于2 000 A时,接触面两侧均是铜质材料时,载流密度不能大于0.12 A/mm²[29];《直流换流站五项管理规定五通一措》规定当额定电流超过5 000 A时,载流密度宜采用DL 5222—2005标准的0.8倍执行,即0.096 A/mm²。根据上述标准,分别对设计图纸和样品载流接触面积进行了计算,再通过“载流面积*载流密度”倒推抱箍接触面最大载流能力,实测数据均略小于设计要求。其结果见表2。

表2 接触面积和最大载流能力

类别	接触面积/ mm ²	DL/T 5222— 2005:最大载 流/A	直流五通:最 大载流/A
设计图	65 312	7 837	6 269
实测	64 662	7 759	6 208

2.2 应力计算

抱箍重量壁厚为14 mm,导线长约8.5 m、重约38.5 kg,线夹重约11 kg,边界条件的设定,依照图7的位置,铜头端子右边的一排螺栓孔约束完全固定,靠铜头端子左边最近的一排螺栓孔不固定下 x 、 y 两个方向的位移,其他的约束都固定,铜头端子左端另外的两排螺栓孔用来施加载荷,铜头端子沿着 z 轴的负方向那一端约束设置为完全固定,将上述边界条件导入仿真试验模型,计算其位移总量,经

计算抱箍在 y 方向产生的最大位移为2.02 mm,

在 x 方向上产生的最大位移为 1.27 mm。位移仿真见图 8。

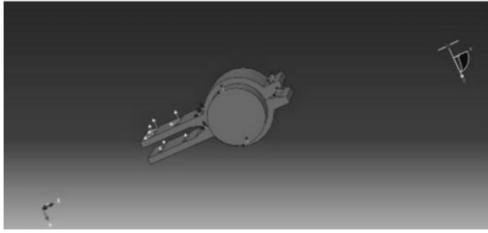
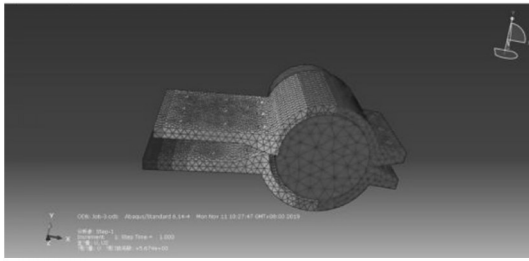
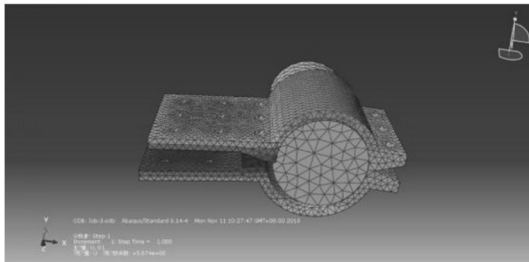


图7 边界条件

Fig. 7 Boundary condition



(a) y 方向位移



(b) x 方向位移

图8 位移仿真

Fig. 8 Diagram of displacement simulation

2.3 受力分析

T2 纯铜抗变形能力较差, 在运行中, 受拉拔(载荷)、剪切(导线舞动)力的影响, 存在塑性变形的可能。

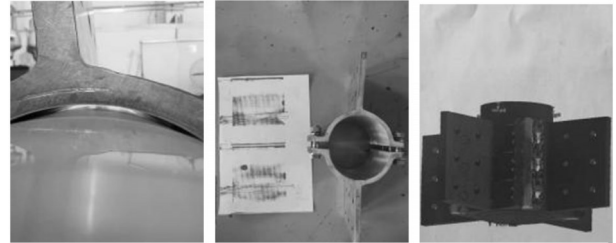
从图 4 可见, 抱箍采用两分瓣式结构, T2 纯铜整体铸造, 引弧板和抱箍本体间圆滑过渡, 抱箍和端子铜头的装配仅靠高强度紧固件连接。从图 6 可见, 抱箍侧四分列线夹与直流场相连, 端子铜头侧穿墙套管安装在阀厅上部。这样的结构将使接头承受载荷和风载共同作用, 外力会对抱箍的变形产生影响, 还包括温度, 荷载以及其他因素等。

当材料产生形变时, 如果所受到的载荷超过了材料本身弹性极限, 那么当荷载去除时, 材料产生的变形就不能完全恢复, 就会产生塑性形变。理论计算的抱箍最大应力达到了 180 MPa, 但 T2 纯铜的抗拉强度为 170 MPa, 因此, 长期运行工况下, 抱箍存在变形的可能, 外观检查结果也佐证了该结论。

2.4 配合验证

为对抱箍变形迹象进行验证, 在抱箍返厂后, 对其进行了相关试验。首先, 将它放在与现场相同

规格的端子铜头上, 进行了空载模拟配合, 结果显示, 抱箍中间位置引流板部位与端子铜头之间存有较为明显的空隙, 宏观检查有较明显的变形现象, 见图 9(a); 然后, 按工艺要求的扭矩使用扭力扳手对其紧固, 进行了压紧试验, 结果显示, 抱箍与端子铜头间存在失配现象, 见图 9(b); 最后, 将各参数输入仿真软件, 进行了仿真计算, 结果显示, 抱箍与端子铜头也存在失配迹象, 发亮的区域表明该部位存在间隙见图 9(c)。



(a) 空载模拟配合

(b) 压紧试验

(c) 仿真试验

图9 试样照片

Fig. 9 Pictures of samples

3 讨论

T2 纯铜的导电率很高(仅次于银), 但其强度(或硬度)不高, 因此, 为达到高强度、高导电率的目的, 需对铜进行强化处理。在铜基材料合金化中, 仅 Ag、Cd、Zn 等元素对导电率影响较小, 尤其是 Cu-Ag 合金化是高强度、高导电率的研究方向^[30]; 相关研究表明, Sn 小于 0.2% 时, 导电率下降较慢, 但抗拉强度是随着 Sn 含量的增加而升高^[31], 元素 P、Fe 的作用也是用来增加强度^[32-33]。

根据光谱试验结果, 抱箍本体材质不符合 T2 纯铜要求。材料化学成分不合格, 特别是纯铜含量不达标, 且锡含量增大会影响金属的导流能力, 其特征为电阻增大, 导电率下降; 程柄午^[34]等分别采用电流涡流法和直流电阻电桥法对 99.96%(Sn<0.000 5%)、99.98%(Sn=0.001 2%)、99.78%(Sn0.012%) 的铜锡合金试样进行了导电率测试, 其导电率分别为(96.9%~97.1%)IACS、(92.7%~93.3%)IACS、(91.1%~91.4%)IACS。从上述数据中可以看出, 随着含铜量的下降, 从 99.96% 下降到到 99.78% 时, 其导电率也是下降的, 相差约 6%IACS。

另外, 本次试验在抱箍内部发现了一个直径约为 $\phi 2$ mm 的封闭孔洞, 考虑到抱箍内径为 $\phi 132$ mm, 厚度为 14 mm, 通过载流能力计算, 可以排除孔洞对通流能力的影响。虽然 P、Fe、Sn 等元素对导电率的影响, 是随着上述元素的增加致使导电率逐渐下降, 但按 DL 5222—2005 还是直流五通的规定计算

的载流能力均能满足设计值,设计要求最大载流为5 343 A。因此,可以判定元素不合格应是引起套管接头发热的次因。

运行表明,空隙对载流能力的影响极大。通过应力计算和受力分析,发现该只抱箍在载荷和风载共同作用下产生了塑性变形缺陷,使得抱箍和端子铜头间存在较大的空隙,而配合试验的结果也有力的佐证了直流套管接头部位空隙的存在。为了验证配合空隙对导体导电率的影响,又进行了导电率测试,在测试中发现接触面积对载流能力影响是巨大的。取纯铜标准片进行导电率测试,经试验发现接触面积与导电率成正比关系,即接触面积在T2铜标准片上的占比与载流能力成正比关系,如接触面积为80%,那么导电率约下降为完全接触状态下的80%左右。同时,在载流能力计算中,实测最大载流数值均小于根据实测面积所计算的最大设计载流能力,也佐证了接触面积变化对载流能力的影响较大。

根据运行记录,发现通过发热部位的实际负荷电流约为4 700~5 000 A之间,小于设计值。而利用在标准片上通过不同接触面积测得的导电率,可判定,引起该套管接头发热的主因是抱箍变形。变形使得抱箍和端子铜头之间形成空隙,接触面积变小,载流能力下降,电阻增大,进而引起了接头部位异常发热,同时,元素不合格导致的导电率下降,反过来进一步促进了载流能力的下降。

4 结论

±800 kV某换流站直流穿墙套管设备接头异常发热情况的主因是抱箍变形引起导体有效载流接触面积减小,使得局部部位导电率下降,电阻增大所导致;次因是材质不符合标准要求。据此,提出以下建议:

1)对套管导体端子铜头和线夹抱箍内外表面进行表面镀银处理,以增强载流能力。

2)对四分之一线夹本体进行重新设计,安装加强筋,提高抗变形能力。

3)提高抱箍内径加工精度,减少因加工误差造成的配合间隙。

4)严格执行现场装配工艺,并计算合理的紧固扭矩。

参考文献:

[1] 张章奎. 国内外特高压电网技术发展综述[J]. 华北电力技术,2006(1):1-2.

- ZHANG Zhangkui.A survey of UHV power grid technology development[J]. North China Electric Power, 2006(1):1-2.
- [2] 张运洲. 特高压交流输电的经济运行分析[J]. 电器工业,2007(4):34-39.
- ZHANG Yunzhou.Analysis of economic operation of the over - voltage AC power transmission[J]. China Electrical Equipment Industry, 2007(4): 34-39.
- [3] 本报评论员. 加快建设特高压 推进电网科学发展[N]. 国家电网报,2018-10-18(001).
- Our Newspaper Commentator. Accelerate the construction of UHV to promote the scientific development of the power grid[N]. State Grid News, 2018-10-18(001).
- [4] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.
- LIU Zhenya. Ultra - high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Press, 2005.
- [5] 张文亮,胡毅. 发展特高压交流输电,促进全国联网[J]. 高电压技术,2003,29(8):20-22.
- ZHANG Wenliang, HU Yi. To develop UHV AC power transmission and advance the united power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 20-22.
- [6] 张文亮,吴维宁,胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术,2003,29(9):16-18.
- ZHANG Wenliang, WU Weining, HU Yi.Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9):16-18.
- [7] 刘旭斐,吴琛,张丹,等. 考虑后效性的柔性直流输电黑启动方案评估方法[J]. 电力科学与技术学报,2020, 35(6):110-116.
- LIU Xufei, WU Chen, ZHANG Dan, et al. Evaluation method of black-start scheme with VSC-HVDC considering aftereffects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6):110-116.
- [8] 张安安,周志通,庄景泰,等.基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力,2020, 48(2):78-84.
- ZHANG An'an, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2):78-84.
- [9] 罗澍忻,董新洲. 基于LCC的高压直流输电线路保护分析及展望[J]. 广东电力,2019,32(12):121-129.
- LUO Shuxin, DONG Xinzhou. Analysis and prospects of HVDC transmission line protection based on LCC [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12):121-129.
- [10] 张文亮,胡毅. 特高压输变电设备应用于工程的分析研究[J]. 电力设备,2004,5(7):15-18.
- ZHANG Wenliang, HU Yi.Analysis and research of EHV

- equipments for power transmission and transformation applied in project[J]. *Electrical Equipment*, 2004, 5(7): 15-18.
- [11] 周静, 马为民, 蒋维勇, 等. 特高压直流工程的可靠性[J]. *高电压技术*, 2010, 36(1): 173-179.
ZHOU Jing, MA Weimin, JIANG Weiyong, et al. Reliability about UHVDC project[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(1): 173-179.
- [12] 柴影辉, 张楠楠. 特高压直流穿墙套管在 ± 800 kV换流站中的应用[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(30): 233.
CHAI Yinghui, ZHANG Nannan. The application of ultra-high voltage DC wall bushing in ± 800 kV converter station[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2013(30): 233.
- [13] 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.
- [14] 韦晓星, 张晋寅, 楚金伟, 等. 500 kV 直流穿墙套管空心复合绝缘子连接界面失效分析[J]. *电瓷避雷器*, 2019(1): 207-212.
WEI Xiaoxing, ZHANG Jinyin, CHU Jinwei, et al. Failure analysis of the interfaces and connections of end fittings for composite hollow core insulator used in 500 kV DC wall buhsing[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(1): 207-212.
- [15] 丁永福, 王祖力, 张燕秉, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站阀厅金具的结构特点[J]. *高压电器*, 2013, 49(9): 13-18.
DING Yongfu, WANG Zuli, ZHANG Yanbing, et al. Design structure characteristics of valve hall fittings in the ± 800 kV HVDC converter station[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(9): 13-18.
- [16] 张启浩, 吴德贯, 马正霖. ± 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[J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 239-244.
ZHANG Qihao, WU Deguan, MA Zhenglin. Defect and improved method of DC wall bushing design in ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 239-244.
- [17] 曹小龙, 曹小虎. 一起变压器套管接头发热缺陷的分析及处理[J]. *电工电气*, 2016(7): 23-26.
CAO Xiaolong, CAO Xiaohu. Analysis and treatment for generate heat defect of transformer casing pipe connector[J]. *Electrotechnics Electric*, 2016(7): 23-26.
- [18] 熊兰, 曾泽宇, 杨军, 等. 小电流直流故障电弧的数学模型及其特性[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(13): 2820-2829.
XIONG Lan, ZENG Zeyu, YANG Jun, et al. Mathematical model and characteristics of low current DC fault arc[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(13): 2820-2829.
- [19] 何良, 王红梅, 张旭波, 等. 一起220kV GIS设备发热异常检测及解体分析实例[J]. *高压电器*, 2018, 54(6): 236-240.
HE Liang, WANG Hongmei, ZHANG Xubo, et al. Detection and disassembly analysis on an abnormal heat fault of 220 kV GIS equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(6): 236-240.
- [20] 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.
- [21] 李怡, 王彤, 曾彦珺. ± 800 kV 直流穿墙套管对接结构接触状态评估方法[J]. *电瓷避雷器*, 2017(4): 160-164.
LI Yi, WANG Tong, ZENG Yanjun. An evaluation method of contact state of butt joint structure in ± 800 kV DC wall bushing[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(4): 160-164.
- [22] 潘凯, 周禹, 吴德贯, 等. 换流站 ± 800 kV 直流穿墙套管回路电阻异常[J]. *云南电力技术*, 2015, 43(4): 43-44.
PAN Kai, ZHOU Yu, WU Deguan, et al. Analysis on abnormal circuit resistance of ± 800 kV DC wall bushing in converter station[J]. *Yunnan Electric Power*, 2015, 43(4): 43-44.
- [23] 张晋寅, 韦晓星, 夏谷林, 等. 南方电网直流穿墙套管运行特性分析[J]. *电瓷避雷器*, 2019(4): 230-237.
ZHANG Jinyin, WEI Xiaoxing, XIA Gulin, et al. Operating characteristic analysis of DC wall bushings in CSG[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(4): 230-237.
- [24] 张晋寅, 杨旭, 邓军, 等. ± 800 kV 柔性直流穿墙套管温升特性研究[J]. *变压器*, 2021, 58(12): 38-41.
ZHANG Jinyin, YANG Xu, DENG Jun, et al. Study on temperature rise characteristics of ± 800 kV VSC DC wall bushing[J]. *Transformer*, 2021, 58(12): 38-41.
- [25] 张雪松, 朱宽军, 司徒钧, 等. 特高压直流换流站端子温升计算及影响因素[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1351-1358.
ZHANG Xuesong, ZHU Kuanjun, SI Jiajun, et al. Temperature rise calculation of connector terminal in UHV DC converter station and analysis of influencing factors[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1351-1358.
- [26] 周榆晓, 刘璐, 刘旸, 等. 穿墙套管故障分析及解决

- 措施[J]. 东北电力技术, 2017, 38(9):43-46.
- ZHOU Yuxiao, LIU Lu, LIU Yang, et al. Fault analysis and solving measures of wall bushing[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(9):43-46.
- [27] 李洪涛, 陶风波, 贾勇勇, 等. 基于相似模型的气体绝缘母线接头过热失效模拟[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12):99-107.
- LI Hongtao, TAO Fengbo, JIA Yongyong. Overheat failure simulation test for gas-insulated switchgear bus contact based on scale model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12):99-107.
- [28] 孙庆峰, 周平, 陈胤楨, 等. 支柱瓷绝缘子端面平行度, 孔中心偏移检测[J]. 电工电气, 2019(5):53-57.
- SUN Qingfeng, ZHOU Ping, CHEN Yinzhen, et al. Detection of end face's parallelism and maximum offset between circular axes of two holes' center of the high voltage post insulators of ceramic material[J]. Electrotechnics Electric, 2019(5):53-57.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 导体和电器选择设计技术规定: DL/T 5222—2005[S]. 2005.
- The National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Design technical rule for selecting conductor and electrical equipment: DL/T 5222—2005[S]. 2005.
- [30] 徐洪辉, 杜勇, 陈海林, 等. 高强度、高导电率铜基合金材料的研究现状及发展[J]. 材料导报, 2004(10):37-40.
- XU Honghui, DU Yong, CHEN Hailin, et al. Present status and development of Cu-based alloy with high strength and high conductivity[J]. Materials Review, 2004(10):37-40.
- [31] 张明明. Sn和In在Cu中的作用机理[D]. 赣州:江西理工大学, 2012.
- ZHANG Mingming. Mechanism of action of Sn and In in Cu[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012.
- [32] 董琦祎, 汪明朴, 贾延琳, 等. 磷含量对Cu-Fe-P合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6):75-79.
- DONG Qiyi, WANG Mingpiao, JIA Yanlin, et al. Effect of P content on microstructure and property of Cu-Fe-P alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(6):75-79.
- [33] 张毅, 刘平, 田保红, 等. 微量合金元素对Cu-Ni-Si合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011(6):18-21.
- ZHANG Yi, LIU Ping, TIAN Baohong, et al. Effect of trace element on microstructure and properties of Cu-Ni-Si alloy[J]. Hot Working Technology, 2011(6):18-21.
- [34] 程柄午, 郑程, 许鹤君. 测量铜合金导电率的方法比较[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(9):628-631.
- CHENG Bingwu, ZHENG Cheng, XU Hejun. Method comparison of electrical conductivity measurement of copper alloy[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part a (Physical Testing), 2015, 51(9):628-631.
- 孙庆峰(1981—), 男, 工程师, 主要从事电网金属技术监督检测及失效分析工作(E-mail: sunqingfen@126.com)。
- 张杰(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事电网金属技术监督检测及失效分析工作(E-mail: 22148723@qq.com)。