

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.003

特高压换流站交流滤波器电容器发热故障研究

邓于可, 唐金叶, 卢金钊, 张鹤峰, 龚正旭

(国网四川省电力公司特高压直流中心, 成都 610031)

摘要: 交流滤波器作为特高压直流输电系统的重要组成部分, 具有调节电压、滤除谐波和提供无功补偿的作用, 其安全稳定运行对于直流输电系统至关重要。本文对某 ± 800 kV 换流站交流滤波电容器接头发热故障进行了分析与总结, 通过温升试验和电容器例行试验, 对故障进行前期排查; 通过对电容器出线套管接线端子部位的解剖和测试, 分析出嵌入式套管接线头与铜绞线压接不良是导致接头发热的主要原因, 针对性地提出套管接头工艺改进措施和相应的电容器运维策略, 以确保特高压换流站滤波器的安全稳定运行。

关键词: 交流滤波电容器; 发热; 接线端子; 温升试验; 直流电阻; 运维策略

Study on Heating Failure of AC Filter Capacitor at UHV Converter Station

DENG Yuke, TANG Jinye, LU Jinzhao, ZHANG Hefeng, GONG Zhengxu

(State Grid Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610031, China)

Abstract: AC filter, as an important part of ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission systems, has such functions as regulating voltage, filtering harmonics and providing reactive power compensation, and its safe and stable operation is very important for DC transmission system. In this paper, the heating of the joint of AC filter capacitor at a ± 800 kV converter station is analyzed and summarized. The early detection of the fault is conducted through temperature rise tests and routine test of capacitor. It is identified by dissecting and testing the wiring terminals of the outgoing bushing of the capacitor that weak crimping between embedded bushing connectors and copper strands is the main cause of the heating of the joint. The specific process improvements measures of the bushing joint and corresponding maintenance strategies of capacitor are proposed so to ensure safe and stable operation of filter of UHV converter station.

Keywords: AC filter capacitor; heating; wiring terminal; temperature rise test; DC resistance; operation and maintenance strategy

0 引言

常规高压直流输电系统(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)在运行过程中, 换流器设备会产生大量谐波并消耗显著的无功功率^[1-2]。通常情况下, 换流站所消耗的无功功率占额定输送功率的 40%~60% 之间^[3]。因此, 在换流站中配置多组交流滤波器以实现谐波滤除和无功补偿的功能是至关重要的, 其可靠性直接关系到直流输电系统的长期安全与稳定运行^[4-7]。

在 2022 年 8 月和 11 月, 对某 ± 800 kV 换流站 500 kV 交流滤波器场中的 20 小组滤波器电容器进行连续精确红外测温^[8], 结果显示 BP11/13 小组滤波器

中 BP11 电容器普遍存在不同程度的接头发热现象。尽管在 2023 年年度检修中采取了对电容器接头处螺栓紧固、清洁和更换新的一体式线夹等措施, 在 2024 年红外精确测温中, 仍然有 13 台电容器接头温度偏高, 对电力系统的稳定运行构成了潜在隐患^[9]。

交流滤波电容器接头发热情况屡有发生, 常见的故障类型主要分为 2 种^[10-11]: 一是搭接头过热, 通常由于安装工艺不当导致压接头不稳固, 进而引起接触电阻增大, 导致过热^[12]; 二是软接线熔断, 因接头铜丝松散或工艺问题, 导致回路电阻过大, 最终造成软连接熔断^[13]。接线柱发热的持续扩大化还会造成电容器鼓包、损坏, 甚至引起电容器组不平衡跳闸, 对换流站的安全运行构成严重威胁^[14-18]。

收稿日期: 2024-09-23

本文对 2024 年红外精确测温结果中温度最高的 5 台电容器进行深入研究,通过温升试验、电容器例行试验和直流电阻测试,对前期故障进行排查,进一步确定电容器接头发热故障的成因。通过对电容器出线套管中接线端子的解剖分析找出了现有工艺的缺陷,提出针对性的改进建议和运维策略,以期为特高压换流站的可靠运行提供参考。

1 交流滤波器概述

电容器是储存电量和电能(电势能)的元件,通常与电抗器配合使用,以实现调节电压、滤除谐波、提供无功功率等功能。在某 ±800 kV 换流站的 500 kV 交流滤波器场中,BP11/13 小组滤波器的 BP11 电容器组型号为 :ZAL489.89/500-118632/494.3-1QW。每相共 240 台电容器单元,采用单桥差接线,每相单元 4 并 60 串,每桥臂 2 并 30 串,每相接线原理见图 1。电容器组额定电压 489.89 kV,装置额定电流 381.49 A,总容量 118 632 kvar,电容器单台额定电流 95.38 A。

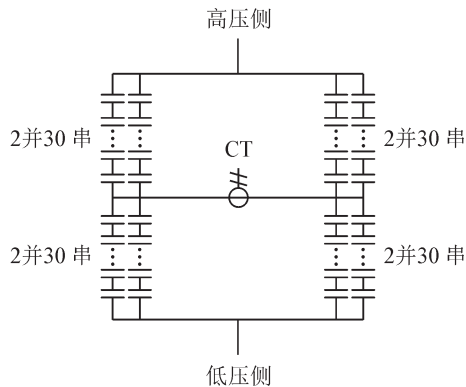


图1 电容器组电气连接原理图
Fig. 1 Electrical wiring principle diagram of capacitor bank

BP11 滤波器组的单元电容器型号为 AAMr8.165-494.3-1Wh,额定电容量 23.65 μF。单元电容器采用全膜结构浸渍苜蓿基甲苯,内部 15 并 4 串,主要包括心子、外壳和出线套管 3 部分结构,单元电容器电气连接原理见图 2,结构见图 3。

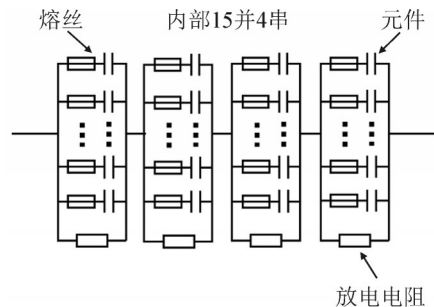


图2 单元电容器电气连接原理图
Fig. 2 Electrical wiring principle of unit capacitor

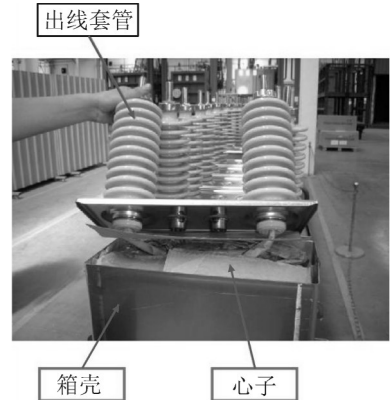


图3 单元电容器的结构
Fig. 3 Structure of unit capacitor

出线套管采用一体压嵌式绝缘套管。该套管内部出线结构为:固定长度的多股铜绞线熔焊成一体后,将铜绞线端头在模具内冲压成与接线头连接管内孔配合的圆棒,采用冷压工艺将接线头和铜绞线压接锁紧后嵌入瓷套管内部,如图 4 所示。

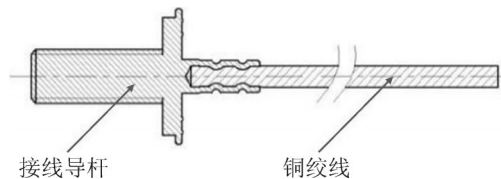


图4 电容器套管内部端子结构
Fig. 4 Structure of internal terminal of capacitor bushing

2 电容器发热情况

2022 年、2023 年、2024 年经半侧式精确红外测温方式多次发现 BP11 电容器接头套管部位有发热现象,红外测温图谱见图 5。

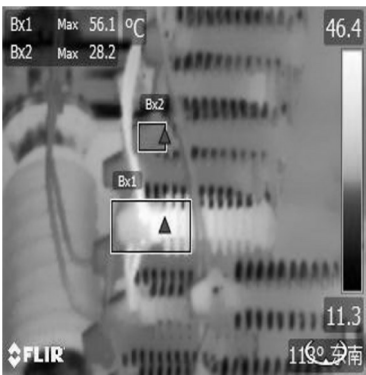


图5 套管发热红外测温图谱
Fig. 5 Infrared thermometry spectrum of bushing heating

根据半侧式精确红外测温图谱显示,发热点明确位于电容器接线端子处。为了解决这一问题,前期将发热电容器进行打磨,并更换一体式线夹。观察一年之后仍有发热情况,其中 5643 小组中 5 台电

容器的发热情况最为严重。2024 年年度检修期间,将 5 台电容器进行更换并后续开展返厂解体检修。

根据《DL/T 664—2016 带电设备红外诊断应用规范》^[19],温差 ΔT 与相对温差 δ 的计算公式为

$$\Delta T = T_1 - T_2 \tag{1}$$

表 1 发热情况最严重的 5 台电容器红外测温结果

Table 1 Infrared thermometry results of 5 sets of capacitors with the most serious heating						
序号	编号	容量/ μF	实测温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	温差/ K	相对温差/%
1	1343	23.57	36.9	13	20.1	84.1
2	1388	23.66	50.6	13	37.6	89.4
3	1245	23.66	54.5	13	37.3	89.8
4	1108	23.66	56.4	13	38.2	88.0
5	1251	23.65	73.1	13	52.5	87.4

3 试验检测与故障排查

3.1 温升试验

使用高压发生器对 5 台更换后返厂的电容器进行 6 h 的额定电压温升试验。试验过程中,额定电压为 8.165 kV。在温升试验 6 h 后,使用红外测温仪对每台电容器温度进行精确测量。温升试验红外测温图谱及结果分别见图 6-7。

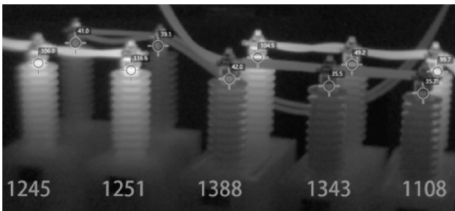


图 6 发热电容器红外测温图谱
Fig. 6 Infrared thermometry spectrum of the heating bushing

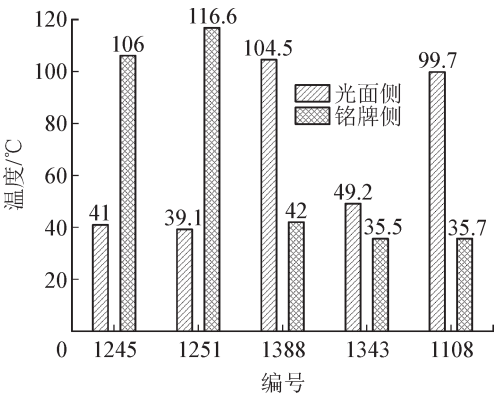


图 7 发热电容器温度及发热位置、编号
Fig. 7 Temperature, heating position and number of the heating capacitor

使用铭牌侧(靠近铭牌)、光面侧(远离铭牌)区分同一电容器上不同套管。可以看出 5 台电容器套管接头均存在不同程度的发热现象,且发热接头位置与站内运行时发热位置一致。接头发热情况

$$\delta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中: T_1 为热点温度; T_2 为正常相对应点的温度; T_0 为环境温度。

5 台发热情况最严重的电容器半侧式精确红外测温结果见表 1。

最严重的为 1251 铭牌侧,温度为 116.6 $^{\circ}\text{C}$,发热情况最为轻微的为 1343 电容器,温度最高点为 49.2 $^{\circ}\text{C}$ 。电容器的温升试验温度最高点都集中在电容器套管的接线端子下部与铜绞线压接的部位。

3.2 电容器例行试验

温升试验结束后,使用一体式测试设备对 5 台电容器开展例行试验,试验内容包括电容值测量、端子间交流耐压(0.75 倍出厂试验电压:13.17 kV)、端子对外壳交流耐压(0.75 倍出厂试验电压:37.5 kV)^[20]和电容器损耗角正切 $\tan \delta$ 测量。5 台电容器例行试验结果见表 2。

表 2 电容器例行试验结果
Table 2 Routine test results of capacitor

编号	电容值/ μF	端子间	端子对外壳	电容器损耗角正切/%
		交流耐压	交流耐压	
1251	23.629	通过	通过	0.018 8
1245	23.628	通过	通过	0.020 7
1108	23.625	通过	通过	0.021 0
1343	23.547	通过	通过	0.014 1
1388	23.616	通过	通过	0.022 1

从测试结果可以看出,5 台电容器电容值、端子间交流耐压及端子对外壳交流耐压均满足要求。编号 1245、1108、1388 电容器的 $\tan \delta$ 偏大,分别为 0.020 7%、0.021 0%、0.022 1%,均超过标准值 0.02%。编号 1251 电容器的 $\tan \delta$ 为 0.018 8%,接近标准值要求的 0.02%。

通常情况下,电容器的损耗主要来自电容器薄膜和油等介质的损耗^[21]。介质损耗指的是绝缘材料在电场作用下,由于介质电导和介质极化的滞后效应,在其内部引起的能量损耗,可以衡量电容器的发热量变化^[22-27]。可以发现,除发热情况最轻微的 1343 电容器外,其余电容器的损耗角正切均有不同程度的增大。尽管测试值反映的是整个电容器(包

括出线 and 心子)的损耗,端子的温升与整体电容器的损耗不成正比关系,但仍有正相关性。可以认为损耗角正切的试验值对电容器端子发热情况检测有一定的参考作用。

3.3 电容器解体检查

温升试验结束后,根据试验结果,首先对发热温度最高的 1251 电容器进行解体处理。具体步骤如下:

1)切割与取下套管:首先,使用切割机对电容器的一体式压嵌式套管进行精确切割,将出线套管与箱体分割,并确保切割过程中不损伤电容器内部结构。切割完成后,小心取下套管,以便进一步检查内部组件;

2)套管直流电阻测试:取下套管后,使用直流电阻测试仪,对套管两侧的接线进行直流电阻测试,以评估其内部电气连接状态是否正常;

3)套管拆解与端子检查:在确认套管直流电阻后对套管进行拆解,使用榔头敲击套管,使其碎裂后取出电容器端子压接部分。再次使用直流电阻测试仪,对压接部分的两端进行直流电阻测试,以进一步分析端子压接部位的接触效果。

1251 电容器解体流程见图 8。

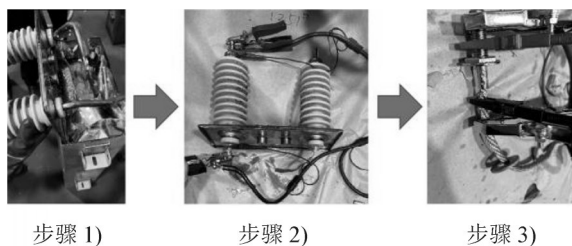


图8 电容器解体流程示意图
Fig. 8 Disassembly process schematic diagram of capacitor

其余 4 台电容器跳过切割的步骤,直接使用榔头敲击套管,使套管碎裂后取出电容器端子压接部分,对压接部分的两端进行直流电阻测试。

观察套管端子与软铜绞线冷压连接处的外观,发现发热套管的导线出现发热变色现象,而不发热套管的导线外观则正常,如图 9 所示。



图9 出线套管铜绞线颜色对比
Fig. 9 Color comparison of copper stranded wire of outgoing bushing

5 台电容器铭牌侧和光面侧的直流电阻与温升试验温度对比分别如图 10 所示。

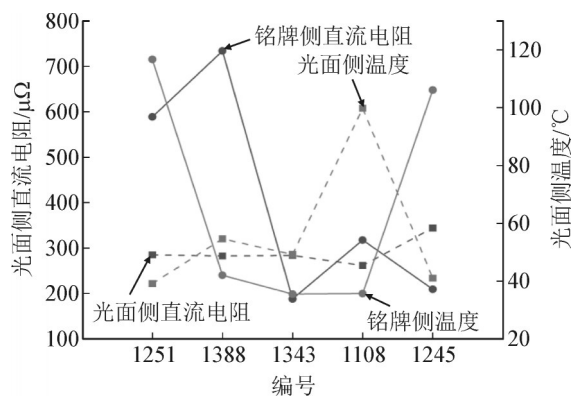


图10 铭牌侧和光面侧直流电阻与温升试验温度对比图
Fig. 10 Comparison diagram of DC resistance and temperature rise test of nameplate side and plain side

从图中可以看出,编号为 1251 电容器现场直接切割后直流电阻测试结果显示,出现发热情况的压接部分直流电阻与温度同时高于不发热压接部分的直流电阻与温度,符合发热规律。分析另 4 台 1388、1343、1108、1245 电容器温度与套管敲击后压接处直流电阻未呈现正相关规律原因可能为:使用榔头敲击电容器套管压接部分过程中敲击点位、力度无法控制到一致,压接部分受到不同力度敲击后压接部分出现不同程度的松动和变形,从而影响直流电阻的值。但从测试结果来看,发热的导杆压接部位的直流电阻异常且呈现出不稳定状态,由此可以判定是该部位压接出现异常。

3.4 端子压接部分切割试验

使用切割机对 3.3 节中直流电阻最大的 1388 铭牌侧和直流电阻最小的 1343 铭牌侧端子压接部位进行纵向切割,以剖析端子压接的情况。端子压接部分剖面图见图 11。

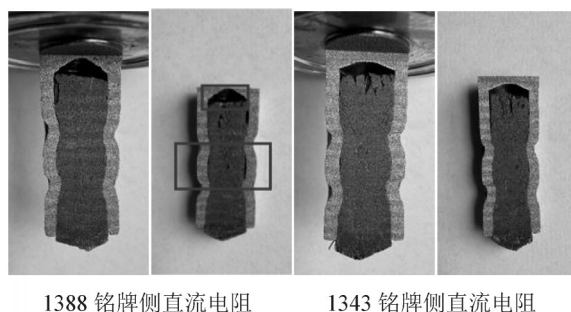


图11 端子压接部分剖面图对比
Fig. 11 Comparison of sectional diagram of terminal crimping position

从套管端子与铜绞线冷压连接处的切割面能看出,接触电阻最大的 1388 铭牌侧的冷压连接处,

剖面铜绞线与铜管内壁接触面有空隙,显著缩小了接触面积。直流电阻最小的 1343 铭牌侧铜绞线与铜管内壁接触面紧密,接触面积较大。同时,对比铜绞线与接线端子接触部分顶部,接触电阻最大的 1388 铭牌侧较直流电阻最小的 1343 铭牌侧铜绞线插入更深,顶部缝隙更小。

4 电容器发热故障分析及改进措施

4.1 发热故障原因分析

根据导体的发热公式,发热量 Q 等于导体电阻损耗的热量与导体吸收太阳辐射的热量之和^[28],公式为

$$Q = Q_R + Q_I \tag{3}$$

式中: Q_R 指单位长度导体电阻损耗的热量; Q_I 指单位长度导体吸收太阳辐射的热量,公式为

$$Q_I = E_i A_i D \tag{4}$$

式中: E_i 为太阳照射功率密度; A_i 为导体的吸收率; D 为导体的直径。

如式(4)所示,在相同环境下,同一大小的材料吸收太阳辐射的热量 Q_I 是一定的,发热量 Q 的变化仅与 Q_R 有关, Q_R 公式为

$$Q_R = I_w^2 R_{ac} \tag{5}$$

式中: I_w 为导体中通过的工作电流; R_{ac} 为导体交流电阻值。

本次电容器端子发热根本原因是由于压嵌式套管接线头与铜绞线压接不良,导致接线导杆与铜绞线压接部分缝隙过大,从而增加了接线导杆与铜绞线之间的接触电阻,进而导致电容器端子压接部分过热。

4.2 电容器套管接头改进措施

为改善电容器套管端子部位接线导杆与铜绞线压接问题,现提出一种压接改进方法。

4.2.1 原冷压工艺

原有的电容器套管接线柱与铜绞线采用冷压压接工艺,流程见图 12,具体步骤如下:



图 12 原冷压工艺流程图
Fig. 12 Original cold pressing flow chart

1) 首先将需要长度的铜绞线在电阻焊机上将铜绞线端头熔焊成一体,熔焊后裁切成段;

2) 其次将裁切好的铜绞线端头在冲压模具内冲压成与接线头连接管内孔配合的圆棒;

3) 再将冲压好的铜绞线插入接线头尾部连接管内孔,然后在对应的模具锁紧槽内冲压,使接线头尾部连接管整体收缩 $\geq 0.4\text{ mm}$, 从而锁紧管内铜绞线。

4.2.2 冷压工艺的优化改进方案

为改善电容器套管端子部位接线导杆与铜绞线压接问题,控制原冷压工艺因人工操作导致的随机性,使用液压工艺进行代替。压接模具结构见图 13,采用三段弧面设计,通过整体同时收缩机制,三段弧面模具同步向圆心施加压力,这样的协同作用使铜管对绞线的压缩更加一致,提高挤压的均衡性。

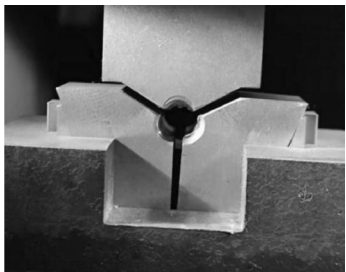


图 13 液压工艺用压接模具
Fig. 13 Crimping module of hydraulic process

使用新液压工艺对剩余的解体电容器套管端子压接部分进行重新压接后,使用回路电阻仪器进行接触电阻测试,液压处理前后端子压接部分电阻值测试结果见图 14。

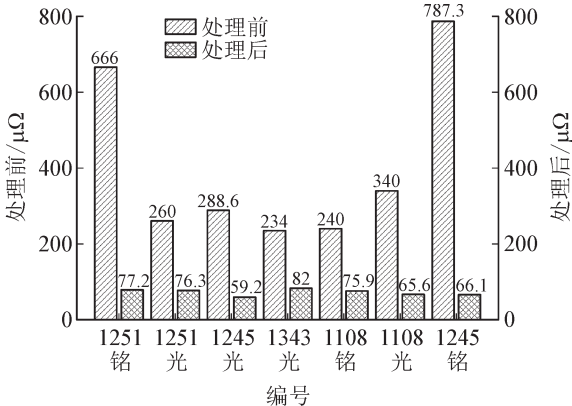


图 14 液压处理前后端子压接部分电阻值
Fig. 14 Resistance of terminal crimping part before and after hydraulic treatment

可以看出,液压工艺处理后的直流电阻值较未处理前有明显下降,且数值较为稳定,可以作为解决电容器发热问题的阶段性成果。今后将持续观察新工艺生产的电容器的温升情况,作为对新工艺效果的检验。

5 结语

通过对交流滤波电容器发热问题的检查分析,本文找到了发热的原因,得出如下结论,同时为特高压换流站运维提出以下几点建议:

1)压嵌式套管接线头与铜绞线压接不良而产生较大的接触电阻是所研究电容器发热的主要原因;

2)采用新的液压工艺处理后,套管出线端子的直流电阻值明显下降,且数值较为稳定;

3)建议对于有异常发热点利用半侧式测温方法观察6 h以上。如果为接头发热则进行线夹更换,桩头清理;如果为套管接头引线压接处发热则直接更换电容器;

4)建议根据DL/T 604—2020《高压并联电容器装置使用技术条件》9.4的规定^[29],对各连接处温升不超过50 K,热点温度不超过60℃的电容器加强观察,热点温度≤80℃待停电时处理。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 吕文韬,谢海葳,徐群伟,等. 特高压直流换流站交流滤波器组对电网谐波的影响分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):217-225.
LYU Wentao, XIE Haiwei, XU Qunwei, et al. Analysis on impact of AC filter sets on power grid harmonic in UHVDC converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 217-225.
- [3] 邓艳平,杨秀,张美霞,等. ±800 kV 向上直流换流站交流滤波器的配置与控制[J]. 高压电器,2017,53(2):8-13.
DENG Yanping, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Configuration and control of AC filter for converter station of Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV DC power transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 8-13.
- [4] 左千清,叶建铸,石延辉,等. 特高压换流站直流滤波电容器故障分析研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(6):88-94.
ZUO Ganqing, YE Jianzhu, SHI Yanhui, et al. Study on fault analysis of DC filter capacitor for UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 88-94.
- [5] 周睿,徐剑锋,蔡然. 特高压换流站电容器发热缺陷诱因相关性分析[J]. 江西电力,2023,47(1):17-20.
ZHOU Rui, XU Jianfeng, CAI Ran. Correlation analysis of the causes of capacitor heating defects in ultra-high voltage converter stations[J]. Jiangxi Electric Power, 2023, 47(1): 17-20.
- [6] 魏鑫. 高压电力电容器故障原因分析与保护研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [7] 郭卫明,黄华,蔡国准,等. 一起交流滤波器保护误动引起直流极闭锁的故障分析[J]. 广东电力,2017,30(1):121-125.
GUO Weiming, HUANG Hua, CAI Guozhun, et al. Fault analysis on DC bipolar blocking caused by AC filter protection malfunction[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 121-125.
- [8] 丛廷滋. 红外测温技术在判断电气设备热故障中的应用研究[J]. 科技创新与应用,2020(17):171-172.
CONG Tingzi. Research on the application of infrared temperature measurement technology in diagnosing thermal faults in electrical equipment[J]. Technology Innovation and Application, 2020(17): 171-172.
- [9] 解诗锐,张杰武,乔丰,等. 变电站主变电容器发热故障排除及故障防范[J]. 电工技术,2023(11):111-113.
XIE Shirui, ZHANG Jiewu, QIAO Feng, et al. Troubleshooting and fault prevention of main transformer capacitor heating in substation[J]. Electric Engineering, 2023(11): 111-113.
- [10] 张小平,刘小波,苏文字,等. 电容器组连接件发热故障分析及解决措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(5):16-20.
ZHANG Xiaoping, LIU Xiaobo, SU Wenyu, et al. Heat fault analysis and solution on capacitor connections banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5): 16-20.
- [11] 古智鹏. 换流站交流滤波器电容器运维分析及故障处理[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(6):58-61.
GU Zhipeng. Operation and maintenance analysis and fault treatment on AC filter capacitor at converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 58-61.
- [12] 王振河,陈天,咸日常,等. 电力电容器常见故障分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2):42-46.
WANG Zhenhe, CHEN Tian, XIAN Richang, et al. Analysis of common faults and preventive measures for power capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 42-46.
- [13] 郑振峰,陈灵峰,彭伟文,等. 电容器组接头发热缺陷的原因分析及防范措施[J]. 电世界,2023,64(4):28-29.
ZHENG Zhenfeng, CHEN Lingfeng, PENG Weiwen, et al. Cause analysis and preventive measures for heating defects in capacitor group joints[J]. Electrical World, 2023, 64(4): 28-29.
- [14] 郝江涛,黄葵. 天生桥换流站直流滤波电容器近年来频繁损坏的原因分析及改造措施[J]. 高压电器,2010,46(9):94-98.
HAO Jiangtao, HUANG Kui. Damage analysis of the DC filter capacitors in Tianshengqiao converter station with coun-

- termesures[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 94-98.
- [15] 马虎涛, 吴永利, 申廷进, 等. 换流站 TILP 型交流滤波器电容器接线柱发热分析研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(4): 1-4.
- MA Hutao, WU Yongli, SHEN Tingjin, et al. Study on heating analysis of TILP AC filter capacitor terminals in converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(4): 1-4.
- [16] 刘磊, 李小鹏, 张纯, 等. ± 800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过电压分析[J]. 四川电力技术, 2023, 46(2): 59-63.
- LIU Lei, LI Xiaopeng, ZHANG Chun, et al. Analysis of unbalance current and overvoltage of BP13 high-voltage capacitor in ± 800 kV Yalongjiang converter station[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(2): 59-63.
- [17] 杨徽, 龚亮, 欧波, 等. 线夹在超负荷及导线断股情况下发热状况研究[J]. 中国测试, 2021, 47(S02): 102-105.
- YANG Hui, GONG Liang, OU Bo, et al. Research on heating status of clamp under overload operation and conductor broken strand[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(S02): 102-105.
- [18] 朱裕庆. 内熔丝式电容器击穿故障特征分析[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [19] 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664—2016[S]. 2016. Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment: DL/T 664—2016[S]. 2016.
- [20] 张照辉, 徐江涛, 刘子全, 等. 一起特高压换流站交流滤波电容器故障分析与思考[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 47-52.
- ZHANG Zhaohui, XU Jiangtao, LIU Ziquan, et al. Fault analysis and consideration on AC filter capacitor at UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 47-52.
- [21] 赵凯林. 电力电容器中油膜绝缘电老化与热老化的介电响应特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [22] 丁林祥, 李越欢, 张佳萍, 等. 温度应力和电应力作用下多层陶瓷电容器 (MLCC) 可靠性研究[J]. 中国测试, 2020, 46(S02): 137-139.
- DING Linxiang, LI Yuehuan, ZHANG Jiaping, et al. Reliability study of multi-layer ceramic capacitors (MLCC) under temperature and electrical stresses[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(S02): 137-139.
- [23] 彭倩, 吴广宁, 周力任, 等. 电容器绝缘检测技术的现状与发展[J]. 绝缘材料, 2008, 41(1): 67-70.
- PENG Qian, WU Guangning, ZHOU Liren, et al. The actuality and perspective of capacitor insulation detection techniques[J]. Insulating Materials, 2008, 41(1): 67-70.
- [24] 赵峰, 杨和, 李玲. 关合电容器组高频涌流对真空灭弧室绝缘特性的影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 169-176.
- ZHAO Feng, YANG He, LI Ling. Research on impact of high frequency inrush current when making capacitor bank on insulation characteristic of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 169-176.
- [25] 姚璐勤, 王琦, 李妍, 等. 计及设备损耗成本的含光储配电网分布式电压控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 52-63.
- YAO Luqin, WANG Qi, LI Yan, et al. Distributed voltage control strategy of distribution network with photovoltaic and energy storage considering equipment loss cost[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 52-63.
- [26] 李岩, 刘一帆, 齐磊杰, 等. 高压电缆皱纹护套损耗系数改进计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 49-57.
- LI Yan, LIU Yifan, QI Leijie, et al. An improved calculation method for high voltage cable corrugated sheath loss coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 49-57.
- [27] 陈滇斐, 邢宁, 李志新, 等. SVPWM 逆变器供电时 FSCW-PMSM 损耗特性研究[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 73-83.
- CHEN Zhenfei, XING Ning, LI Zhixin, et al. Loss characteristics investigation of FSCW-PMSM under SVPWM inverter supply[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 73-83.
- [28] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [29] 高压并联电容器装置使用技术条件: DL/T 604—2020[S]. 2020. Technical specification of high-voltage shunt capacitor installation: DL/T 604—2020[S]. 2020.
- 作者简介:**
- 邓于可(1997—), 男, 助理工程师, 主要从事换流站常规一次设备研究工作。E-mail: yuke_mirai@foxmail.com。
- 唐金叶(1996—), 男, 助理工程师, 主要从事特高压电容器及其故障分析工作。
- 卢金钊(1998—), 男, 助理工程师, 主要从事特高压电容器及其故障分析工作。
- 张鹤峰(1997—), 男, 助理工程师, 主要从事高压直流套管绝缘结构设计与绝缘诊断工作。
- 龚正旭(1993—), 男, 工程师, 主要从事换流站常规一次设备研究工作。