

一起特高压换流站交流滤波电容器接线头发热故障分析

刘华臣, 李爽, 王海龙, 常东旭, 梁硕

(国网河南省电力公司直流分公司, 郑州 450000)

摘要: 本文介绍了一起特高压换流站交流滤波器场电容器接线头发热跟踪和处置过程, 并对发热故障原因进行分析。通过分析换流站滤波器配置情况和结构类型, 结合发热案例的发现过程、现场处置、返厂分析等情况, 最终确定发热原因为电容器出线套管的接线导杆下部与铜绞线接触不良所致, 在电容器运行过程中因回路电阻偏大导致发热, 对此提出运维建议, 并对新建站工程制定电容器调试策略。对其他换流站及变电站同结构电容器发热分析具有借鉴和指导意义。

关键词: 特高压换流站; 交流滤波器; 电容器; 接线头发热

Analysis on Heating of AC Filter Capacitor Connection Terminal at UHV Converter Station

LIU Huachen, LI Shuang, WANG Hailong, CHANG Dongxu, LIANG Shuo

(DC Branch Company of SGCC Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In this paper, the process of tracking and handling the heating of connection terminal of capacitor of the field of AC filter at an ultra-high voltage converter station is introduced, and the cause of the heating is analyzed. By analyzing the configuration and structural types of the filter of the converter station in combination with such situations as the discovery process of the heating case, site treatment and return to factory for analysis, it is finally confirmed that the heating is due to the weak contact between the lower part of the conductive rod of the capacitor outlet sleeve and the copper stranded wire and the heat is generated due to the high circuit resistance during the operation of the capacitor. In response to this, the operation and maintenance suggestions are proposed and the debugging strategies of capacitor for the new station project are formulated. It has reference and guiding significance for the analysis of heat generation of capacitor with the same structure in other converter stations and substations.

Keywords: UHV converter station; AC filter; power capacitor; heating of bushing terminal

0 引言

直流输电系统是解决我国能源分布不均衡的重要方法之一, 其功率传输大、输电距离远的特点和实现跨区电网支援目前已成为国家名片^[1-5], 截止2024年底, 我国在运特高压直流工程20个, 在建特高压直流工程4个, 为我国电力需求平衡提供支撑, 为经济发展提供保障。

目前在运的常规、特高压直流输电系统多采用半控的晶闸管元件实现整流和逆变, 会产生大量 $12K\pm 1$ 次谐波和3次非特征谐波, 并从交流系统吸收大量容性无功, 占有功率的40%~60%, 换流站对交流系统来说是一种谐波源和无功负荷^[2-5], 大量谐波易造成交流母线电压畸变、电能质量下降、变

压器铁耗和铜耗增加、换流阀易发生换相失败等。按照就地平衡原则, 换流站站内配置大量滤波设备和无功补偿装置。

以某特高压直流工程逆变换流站为例, 该站配置有交流滤波器和站用电低压电抗器, 交流滤波器有6大组共20小组, 包括12小组HP12/24、4小组HP3、4小组并联电容器(shunt capacitor, SC)直流控保系统, 会根据直流功率升降自动投切, 站用电低压电抗器分为2大组共6小组, 均为电抗器, 一般都在投入状态^[6-12]。

1 交流滤波器介绍

换流站交流滤波器根据直流系统容量、换流阀谐波特点、交流系统电压等因素综合设计滤波器组数和类型^[6, 13-19], 该特高压换流站共设置有12小组

HP12/24 和 4 小组 HP3,可实现滤波和无功补偿,4 小组 SC,主要实现无功补偿。

1.1 HP12/24交流滤波器结构介绍

HP12/24、HP3、SC 3 种类型滤波器结构类似,均配置有大量电容器,以 HP12/24 交流滤波器为例进行介绍。该滤波器电气图见图 1。滤波器主要由电容器(图 1 中 C_1 、 C_2)、电阻器(图 1 中 R_1)、电抗器(图 1 中 L_1 、 L_2)、避雷器(图 1 中 F_1 、 F_2)、电流互感器(图 1 中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4)串并联组成,实现滤除固定频率谐波功能^[3]。

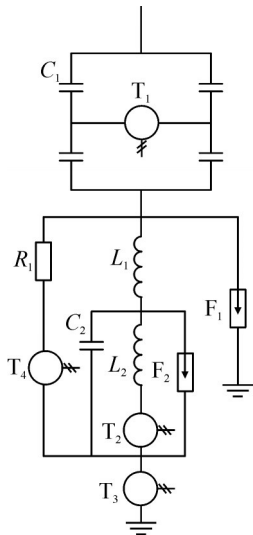


图1 HP12/24交流滤波器电气图
Fig. 1 Electrical diagram of HP12/24 AC filter

现场实际安装的滤波器三相独立,结构布置见图 2。围栏内从右至左分别为 C_1 电容器高压塔、 C_1 电容器低压塔、 F_1 避雷器、 R_1 电阻器、 L_1 电抗器、 C_2 电容器、 L_2 电抗器等。

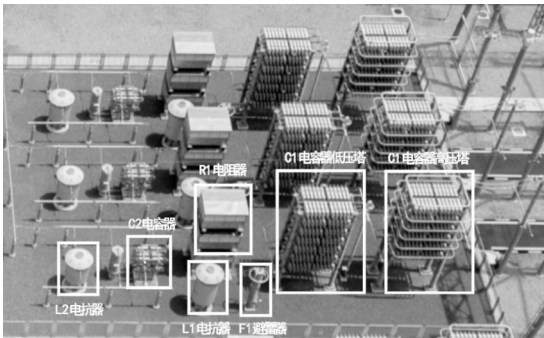


图2 HP12/24交流滤波器结构图
Fig. 2 Structural diagram of HP12/24 AC filter

1.2 交流滤波器电容器介绍

以 HP12/24 交流滤波器 C_1 电容器为例进行介绍, C_1 电容器分为高压塔和低压塔,每塔有 7 层,层高度为 1 000 mm,每层分为 A、B 对称两面,每面安装有 12 支电容器,每一塔的每一面 81 支电容器通过 3 并 27 串组成桥臂电容(C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14}),4 个桥

臂电容再通过 2 串 2 并联组成 C_1 ,桥臂间有不平衡 CT(图 1 中 T_1),电路图见图 3。

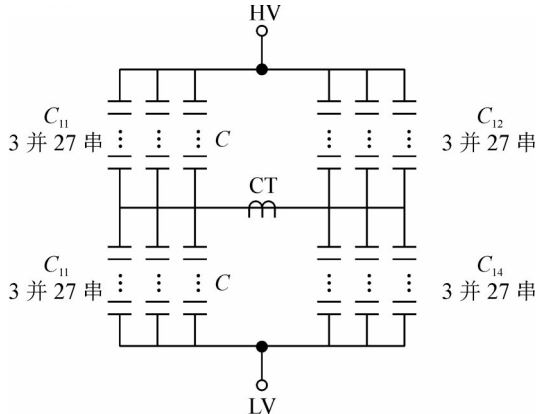


图3 电容桥电路图
Fig. 3 Circuit diagram of capacitive bridge

若单支电容器出现故障,桥臂平衡打破,不平衡电流超过限值,CT 发出报警或跳开小组滤波器,高压塔总高 10 810 mm,低压塔总高 9 225 mm,结构图见图 4。

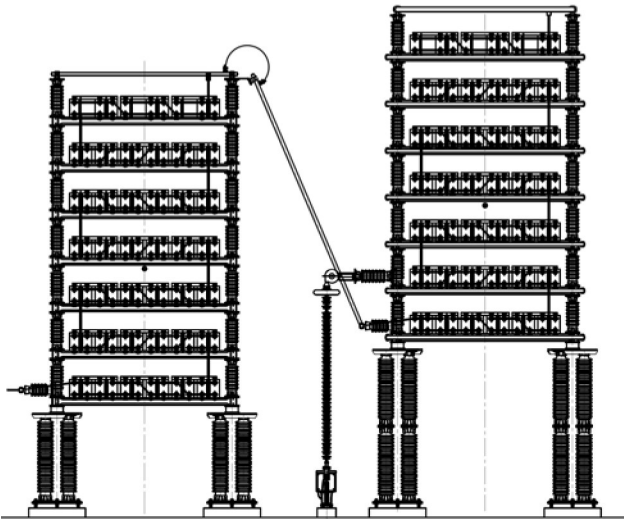


图4 HP12/24交流滤波器 C_1 电容器结构图
Fig. 4 Structural diagram of C_1 capacitor for HP12/24 AC filter

以某特高压换流站为例,全站共配置有 20 小组滤波器,每小组滤波器分为 A、B、C 三相,每相 C_1 分为高压塔和低压塔,经统计,全站共配置有 2 万余支电容器。

1.3 单支电容器结构介绍

各厂家的单支电容器整体结构类似,为长方体结构,电容器箱盖有两支出线套管,根据具体情况,单层电容器可选择立放或平放,电容器出线套管的接线头通过顶部哈弗线夹结构与双分裂导线相连,每层内电容器哈弗线夹一般为厂内预装,现场逐层组装后连接层间引线^[20-23]。

单支电容器电压一般在 6 kV 左右,飞鸟、异物等极易导致电容器套管间短路,为此在每个哈弗线夹外安装氟硅橡胶材质防鸟帽^[24-27],详见图 5。

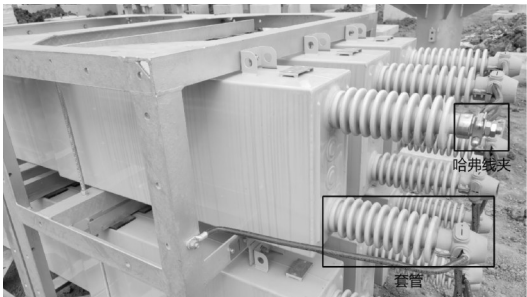


图5 单支电容器外部结构图
Fig. 5 External structural diagram of single capacitor

由于换流站电容器数量庞大、接线头众多,基建验收和常规检修时无法逐支测量电容器套管接线头接触电阻,且由于套管质量问题,经常会发生电容器接线头发热问题,为方便红外测温跟踪,防鸟帽外侧开有测温孔,但须通过固定角度进行测量^[28-29]。

2 一起接线头发热案例介绍

2.1 案例的跟踪和处理

2022 年 6 月,检修人员精确测温首次发现 5633、5664 等间隔共计 8 处电容器端头存在异常发热情况(最高 71.3℃,正常部位 24℃),9 月年度检修期间,对发热点进行了处理,回路电阻(小于 50 μΩ)均符合要求,投运后发现仍有 3 处发热问题未得到根治,见表 1。

表1 小组滤波器发热情况统计(2022年6月) Table 1 Statistics of heat generation in AC Filters (June, 2022)			
小组编号	套管位置	缺陷编号	备注
5621	A相C ₁ A塔A面第1层第2支下套管接线头	2022-1	—
	C相C ₁ B塔A面第4层第5支下套管接线头	2022-2	—
	B相C ₁ A塔B面第2层第9支上套管接线头	2022-3	—
5633	B相C ₁ A塔A面第3层第6支上套管接线头	2022-4	治理效果差
5642	B相C ₁ A塔B面第4层第3支下套管接线头	2022-5	治理效果差
5651	C相C ₁ A塔B面第7层第6支上套管接线头	2022-6	—
5652	A相C ₁ B塔B面第2层第4支下套管接线头	2022-7	—
5664	A相C ₁ A塔A面第4层第1支下套管接线头	2022-8	治理效果差

2023 年 5 月,对滤波器场区域开展差异化测温

跟踪,发热电容器接线头数量逐渐增加 13 处,为避免接线头发热情况恶化导致小组滤波器不可用情况发生,经综合研判确定迎峰度夏前对 5633、5663、5664 3 小组滤波器 8 处接线头进行停电处理,其中 7 处力矩符合相关技术要求,在采取更换一体式线夹、接线头打磨处理措施后送电,仍有 6 处(含 2022 年遗留的 2 处)发热点治理效果不理想,见表 2、图 6。

表2 小组滤波器发热情况统计(2023年6月) Table 2 Statistics of heat generation in AC filters (June, 2023)			
小组编号	套管位置	缺陷编号	备注
5633	B相C ₁ A塔A面第3层第6支上套管接线头	2022-4	2022年遗留,治理效果不良
	C相C ₁ A塔A面第4层第5支上套管接线头	2023-1	
	C相C ₁ B塔B面第5层第6支上套管接线头	2023-2	治理效果不良
	C相C ₁ B塔B面第6层第3支下套管接线头	2023-3	治理效果不良
	C相C ₁ B塔B面第4层第6支下套管接线头	2023-4	治理效果不良
	C相C ₁ B塔B面第4层第9支下套管接线头	2023-5	治理效果不良
5653	A相C ₁ B塔B面第4层第4支下套管接线头	2023-6	
5664	A相C ₁ A塔A面第4层第1支下套管接线头	2022-8	2022年遗留,治理效果不良
5641	A相C ₁ B塔B面第3层第3支下套管接线头	2023-7	—
	B相C ₁ B塔B面第4层第3支下套管接线头	2023-8	—
5642	B相C ₁ A塔B面第4层第3支下套管接线头	2022-5	2022年遗留
5652	A相C ₁ B塔A面第1层第4支上套管接线头	2023-9	—
	B相C ₁ A塔A面第7层第4支上套管接线头	2023-10	—

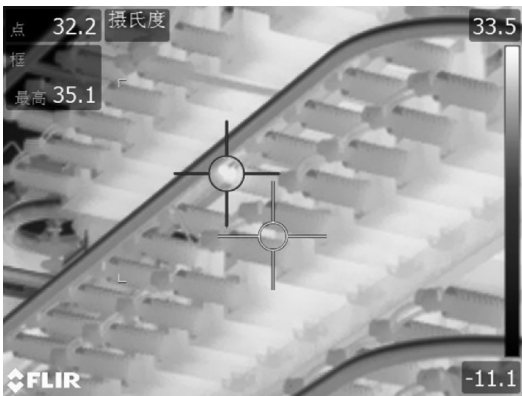


图6 发热点 2022-4 测温图谱
Fig. 6 Temperature measurement chart of heat point 2022-4

2023 年迎峰度夏期间,加强电容器接线头精确测温,截止到 9 月份年度检修前,发热点达到 21 处,部分 2022 年治理过的发热点再次出现发热情况。考虑到部分电容器的发热情况始终未得到根治,初步怀疑是电容器质量存在问题,经各方研讨决定在年度检修期间,将不同厂家的编号为 2022-4、2022-8 的两支电容器更换并返厂解体。

2.2 编号 2022-8 电容器返厂解体情况

对电容器在室温的环境下按现场运行状态施加额定电压,运行 6 h 并进行红外测温,下部套管内部的铜接线头和铜绞线压接部位存在十分明显的异常发热,初步判断该套管端子内部存在接触不良,见图 7。

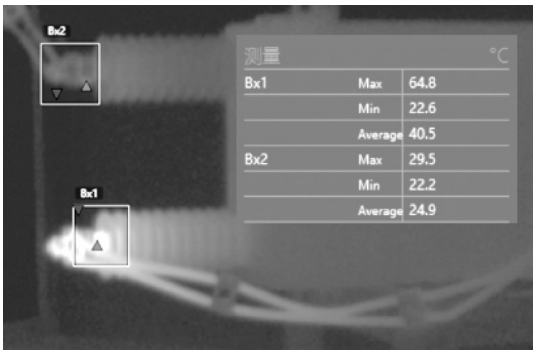


图7 发热点 2022-8 测温图谱
Fig. 7 Temperature measurement chart of heat point 2022-8

拆解电容器并取出内部接线导杆及连接线,测量发热套管接线导杆回路电阻 453.8 $\mu\Omega$ 、正常套管接线导杆回路电阻 82.9 $\mu\Omega$;将压接部位纵向切割开,从切面可看出发热接线导杆压接部位接触不紧密。解剖后的接线导杆见图 8。

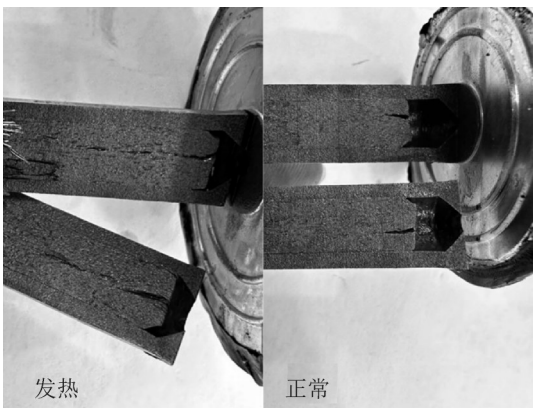


图8 解剖后的接线导杆(左为发热,右为正常)
Fig. 8 The dissected wiring rod (left is heating, right is normal)

2.3 编号 2022-4 电容器返厂解体情况

温升试验时 2022-4 电容器接线头发热与 2022-8 现象类似,套管拆解发现注油孔侧接线导杆套管端

子与内部连接线压接部位有明显过热痕迹,接线导杆回路电阻 554.1 $\mu\Omega$,非注油孔侧接线导杆回路电阻 325.5 $\mu\Omega$,接线导杆回路电阻均较大。接线导杆存在发热迹象见图 9。

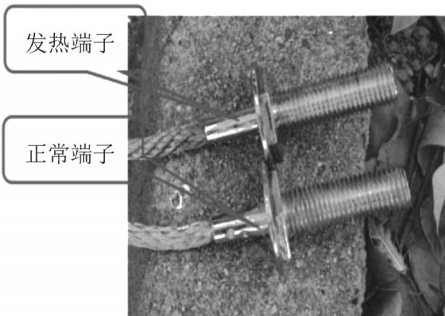


图9 接线导杆存在发热迹象
Fig. 9 Heating trace of wiring rod

2.4 发热原因分析

两厂家的电容器套管均由同一家第三方公司供货,其供货套管占系统内在运电容器超 60%,整体运行情况良好。电容器套管内接线导杆为第三方公司外购产品,经进一步排查分析,发现异常接线导杆压接端内径正常,但外径偏小,外径偏小原因为接线导杆供货商机床新换车刀后调整不到位,车刀调试阶段试产的外径偏小接线端子管理不到位混入合格品中,第三方公司在对接线导杆压接铜绞线时压接不到位导致接触不良。接线导杆结构示意图见图 10。

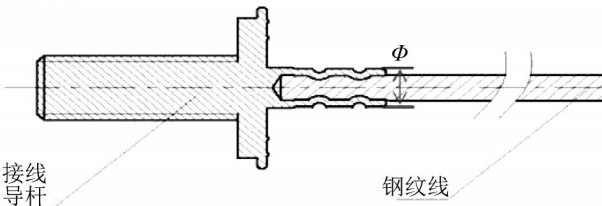


图10 接线导杆结构示意图
Fig. 10 Structural schematic diagram of wiring rod

对发热套管接线导杆压接端的外径检测(铜杆未冷压部位),图纸尺寸要求是 $\Phi 10\sim\Phi 10.1\text{ mm}$,现场检测发现其外径偏小,分别为 $\Phi 9.78\text{ mm}$ 、 $\Phi 9.82\text{ mm}$,而同台电容器涉及的另一只正常套管,接线导杆压接端外径分别为 $\Phi 10.02\text{ mm}$ 、 $\Phi 10.04\text{ mm}$ 。为模拟接线导杆压接端外径偏小导致的压接收缩不够的情况,对合格接线导杆压接端外径整体打磨处理至 9.8 mm 后,和正常接线导杆压接端在压接模具内压接铜绞线测试接触电阻对比,正常接触电阻为 56.5 $\mu\Omega$,打磨后接触电阻为 280.2 $\mu\Omega$ 。从排查情况和试验验证情况看,异常套管端子与铜绞线接触

电阻偏大,问题在于该发热套管接线导杆压接端外径尺寸较正常范围小 0.18~0.22 mm,经过整圆收缩冷压后,其外径在模具内不能被有效压缩,冷压后压接端与软铜绞线不能充分接触,导致接触电阻变大。



图11 打磨前后回阻示意图

Fig. 11 Schematic diagram of circuit resistance before and after polishing

3 结语

这是一起典型的因设备制造工艺不良导致的运行异常案例,运维单位经过长时间跟踪分析,最终确定了故障深层原因,经过分析,制定运维建议如下:

1)针对该站同厂家在运电容器,应加强红外跟踪,在2024年至2026年安排专人,每季度开展精确红外测温,迎峰度夏期间频次提升至每月一次,动态跟踪并建立台账清册,根据测温情况制定相应检修策略并在停电检修期间辅助现场实施。两厂家对备用电容器分批返厂检测,确保备用电容器接线头正常,对发热异常的电容器利用停电窗口期分批更换并返厂检查并换新,根据异常分析结果制定下一步措施。

2)针对新建工程,建议在电容器逐层吊装前,逐个对每个电容器接线头开展回阻测量,确保回阻值不大于 100 $\mu\Omega$,电容器带电调试期间,逐组逐塔逐层逐个精确红外测温,温差超过 5 $^{\circ}\text{C}$ 应在调试停电窗口期检查和分析。试运行阶段制定专项工作,在小组滤波器投入 24 h 后开展一次专项测温,一周后、以后每月再次测温比对,分析是否存在逐步发热问题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陆书豪,贾秀芳. LCC-MMC 混合直流输电系统单阀投入过程定有功 MMC 站电压平衡策略[J]. 电测与仪表,

2023, 60(2):111-116.

- LU Shuhao, JIA Xiufang. Voltage balance strategy for constant active power MMC station in the process of valve de-block in LCC - MMC hybrid DC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 111-116.
- [3] 熊俊,甘文风,陈愚,等.受端电网故障下真双极柔性直流输电系统电压协同控制方法[J].电网与清洁能源, 2024, 40(5):32-41.
XIONG Jun, GAN Wenfeng, CHEN Yu, et al. A voltage collaborative control method for symmetrical bipolar MMC - HVDC under the receiving-end grid fault[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5):32-41.
- [4] 马文忠,李文飞,王玉生,等. MMC-LCC 混合直流输电系统分段下垂控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 100-107.
MA Wenzhong, LI Wenfei, WANG Yusheng, et al. Segmented droop control strategy of MMC - LCC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5):100-107.
- [5] 高磊,张慧媛,许军,等.海上柔性直流输电系统的宽频带振荡非同时性研究[J].电测与仪表, 2024, 61(7): 50-56.
GAO Lei, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Asynchronous characteristics research of wideband oscillation in offshore wind farms connected to MMC-HVDC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 50-56.
- [6] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 中国电力出版社, 2011.
- [7] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1):1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [8] 常东旭,刘华臣,符李鹏,等.换流站高压交流电容器塔防鸟害措施研究与应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6):12-16.
CHANG Dongxu, LIU Huachen, FU Lipeng, et al. Study and application of AC capacitor tower's anti-bird damage measures at UHVDC converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 12-16.
- [9] 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):230-236.
ZHANG Jinyin, WEI Xiaoxing, XIA Guln, et al. Operating characteristic analysis of DC wall bushings in CSG[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 230-236.
- [10] 郑振峰,陈上义,陈承相,等. 集合式电容器套管接头发热缺陷分析与改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5):37-41.

- ZHENG Zhenfeng, CHEN Shangyi, CHEN Chengxiang, et al. Analysis and improvement measures of heating defect in bushing joint of assembling capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 37-41.
- [11] 郑振峰, 陈灵峰, 彭炜文, 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.
- [12] 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. Trouble-shooting and fault prevention of main transformer capacitor heating in substation[J]. Electric Engineering, 2023(11): 111-113.
- [13] 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.
- [14] 李楷然. 变电站电力电容器状态监测与缺陷诊断系统的设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [15] 黄进红, 白洋, 郇浪, 等. 电容器组在运行过程中连接线发火烧毁原因分析及对策[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2018年学术交流会. 2018.
- [16] 檀英辉, 金海望, 李振动, 等. 变电站电容器组连接处发热的处理与改进[J]. 电气技术, 2017(6): 123-127.
- TAN Yinghui, JIN Haiwang, LI Zhendong, et al. The treatment and improvement of connection point heating of the transformer substation capacitor group[J]. Electrical Engineering, 2017(6): 123-127.
- [17] 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.
- [18] 袁德富. 10 kV 并联电容器组发热原因分析及其对策[J]. 通讯世界, 2016(14): 154-154.
- [19] 邱永波. 电容器组各类设备发热情况初步分析报告[J]. 通讯世界, 2016(14): 170-170.
- [20] 马小林. 电力电容器常见故障分析[J]. 中国管理信息化, 2015(14): 125-125.
- [21] 祖树涛, 张宁, 李光, 等. 35 kV 电容无功补偿装置发热缺陷分析及对策[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(4): 62-66.
- ZU Shutao, ZHANG Ning, LI Guang, et al. Heating analysis and countermeasures on 35 kV reactive power compensation installation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 62-66.
- [22] 冯建清, 唐明晓. 电容器发热问题分析及解决措施[J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 80-81.
- FENG Jianqing, TANG Mingxiao. Analysis of capacitor giving out heat and the improving strategies[J]. Power Electronics, 2007, 41(5): 80-81.
- [23] 朱明轩, 罗毅, 杜纯钢, 等. 高压滤波电容器在电力系统中的性能分析[J]. 电力设备管理, 2025(3): 279-281.
- [24] 吴永利, 国江, 冯春林, 等. 电力电容器在工频与谐波条件下的热稳定性能研究[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 136-144.
- WU Yongli, GUO Jiang, FENG Chunlin, et al. Research on thermal stability performance of power capacitor under power frequency and harmonic condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 136-144.
- [25] 倪学锋, 贾华, 赵倩. 我国高压电容器几个关键问题的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 86-90.
- NI Xuefeng, JIA Hua, ZHAO Qian. Research on several key issues of high-voltage capacitors in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 86-90.
- [26] 彭寅章, 王海云, 张维宁, 等. 特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护故障研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 6-13.
- PENG Yinzhong, WANG Haiyun, ZHANG Weining, et al. Study on unbalance protection fault of AC filter capacitor bank of UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 6-13.
- [27] 杨潇, 张凯藤. 高压滤波补偿装置处理变电站谐波的方案研究[J]. 电工技术, 2023(z1): 185-186.
- YANG Xiao, ZHANG Kaiteng. Research on the scheme of high voltage filter compensation device for handling substation harmonics[J]. Electric Engineering, 2023(z1): 185-186.
- [28] 杨南, 张星, 王建永, 等. 高可靠性交流滤波电容器优化设计研究[J]. 电气技术与经济, 2022(6): 17-23.
- [29] 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.

作者简介:

刘华臣(1988—), 男, 高级工程师, 从事特高压换流站一次设备运维工作。E-mail: sandflying@yeah.net。

李爽(1994—), 男, 工程师, 从事特高压换流站一次设备运维工作。

王海龙(1985—), 男, 高级工程师, 从事特高压换流站一次设备运维工作。

常东旭(1982—), 男, 高级工程师, 从事特高压换流站一次设备运维工作。

梁硕(1994—), 男, 助理工程师, 从事特高压换流站一次设备运维工作。