

一起换流站交流滤波器电阻器烧蚀故障分析

郭磊¹, 张朝峰², 胡润阁², 高新轶³, 张旭⁴, 马云瑞¹, 王默¹, 魏震⁴

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 郑州 450052;

3. 河南黄河能源创新中心有限公司, 郑州 450052; 4. 国网河南省电力公司直流中心, 郑州 450052)

摘要: 本文针对某换流站交流滤波器电阻器发生的烧蚀故障, 结合电气、材料、保护等方面对电阻器故障原因进行了综合分析, 最终认为故障是因电阻器主回路连接线长期锈蚀断裂, 导致高电位电阻片连接棒端头处金具对周围悬浮放电。最后, 针对此类问题提出应对措施, 为今后类似交流滤波器电阻器故障分析提供一定的参考。

关键词: 交流滤波器电阻器; 烧蚀; 悬浮放电; 应力腐蚀

Ablation Analysis of AC Filter Resistor in a Converter Station

GUO Lei¹, ZHANG Chaofeng², HU Runge², GAO Xinyi³, ZHANG Xu⁴,

MA Yunrui¹, WANG Mo¹, WEI Zhen⁴

(1. HAEPC Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

3. Henan Yellow River Energy Innovation Center Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

4. State Grid Henan DC Center, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In this paper, the cause of the ablation of AC filter resistor of certain converter station is comprehensively analyzed from such aspects as electrical, material, and is finally concluded that the fault is due to the long-term corrosion and breakage of the main circuit connection line of the resistor, leading to the suspension discharge of the fitting of high potential resistor piece at the end of the bar. Finally, the countermeasures for such issue is proposed, which can provide some reference for the fault analysis of similar AC filter resistors in the future.

Keywords: AC filter resistor; ablation; suspension discharge; stress corrosion

0 引言

交流滤波器是换流站直流系统中的重要设备, 起到无功补偿和过滤谐波的作用^[1-5]。2024年某换流站现场巡视发现单元 I 3608 ACF 滤波器 R₁ 电阻器 A 相上层下部西南角出现持续放电现象, 在将该滤波器转检修后, 现场检查发现 A 相 R₁ 电阻器上层下部西南角电阻片出现由下自上的贯穿性烧蚀, 侧面的电阻器硅橡胶绝缘子表面有电弧闪络痕迹、靠近金属构架的芯棒烧蚀熔断, 故障发生时保护未动作。该单元 I 330 kV 侧 HP12/24 交流滤波器 R1 电阻器型号为 LXW-330/52-700, 共计 9 台, 2004 年投运。同厂家、同类型产品还有 LXW-330/186-4400、LXW-330/40-1000 型电阻器, 全站共计 21 台。近

3 年该站同类型电阻器还发生两起类似事件, 2021 年 6 月单元 I 3601ACF 交流滤波器 A 相 R₁ 电阻器电阻丝烧蚀、2022 年 5 月单元 I 3608 ACF 交流滤波器 B 相 R₂ 电阻丝烧蚀, 经检查单元 I 330 kV 交流滤波器场电阻器近 3 年例行试验情况, 数据未见异常。本次故障发生后, 笔者结合电气、材料、保护等方面对电阻器烧蚀故障开展分析^[6-9], 查找故障原因, 并提出应对措施。

1 电气方面分析

1.1 现场检查情况

巡视检查发现, 3608 ACF 滤波器 A 相电阻器上层下部西南角出现持续放电现象, 放电现象是由电阻器上层下部西南角某部位因高电位向空气及

周围物体放电引起的。放电部位见图 1。电阻器该部位正常运行时对周围电势差应较低,放电原因是由于该部位异常高电位差导致^[10]。



图1 电阻器放电部位
Fig. 1 Discharge position of resistor

电阻器停电后,现场检查发现 3608 ACF 滤波器 R_1 电阻器 A 相上层下部西南角出现烧蚀现象,烧蚀部位见图 2。近距离检查发现, R_1 电阻器 A 相上层的最下部绝缘连杆上金属抱箍片处的绝缘杆表面有明显的放电白痕现象;金属抱箍片处上侧的电阻片已呈现贯穿性烧蚀痕迹,固定电阻丝的绝缘绳(水平方向)已烧断,一部分电阻丝(垂直方向)已熔化;金属抱箍片处右侧的主回路连接导线已断开;最右侧的硅橡胶绝缘子表面有电弧闪络痕迹、靠近金属构架的芯棒烧蚀熔断。

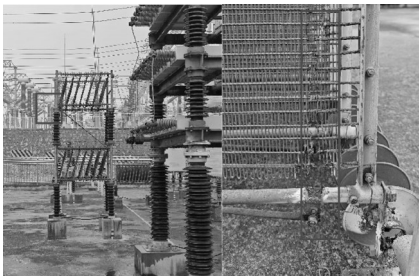


图2 电阻器烧蚀部位
Fig. 2 Ablation position of resistor

1.2 电气回路分析

电阻器外观结构见图 3,3608 ACF 滤波器 R_1 电阻器共分上下两层,上下两层串联结构。每层有 7 个电阻片串联构成,每个电阻片均为一根单独的电阻丝“W”型垂直方向绕制,并通过绝缘绳(水平方向)加以固定,电阻片与电阻片间通过底部电阻片连接棒首尾连接构成电阻器的主回路连接,该电阻片连接棒的端部即通过螺栓和金属抱箍片固定在绝缘连杆上,每个电阻片通过四周的硅橡胶绝缘子固定及不同电位点之间的电气绝缘。

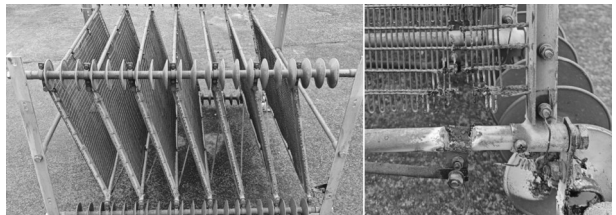


图3 电阻器外观结构
Fig. 3 Appearance structure of resistor

3608 ACF 滤波器电气接线图见图 4。正常运行时, R_1 电阻片的电阻丝末端连接底部电阻片连接棒的首端,底部电阻片连接棒的末端连接下一个电阻片的电阻丝首端,构成串联回路。若电阻丝首端的主回路连接线发生断线,即 R_1 断开无电流,由于底部电阻片连接棒的首端连接高电位(母线侧),则会造成底部电阻片连接棒的末端电位悬浮抬升,连接棒末端上固定有金属抱箍片,也就是金属抱箍片的电位迅速抬升(达到连接母线滤波器 C_1 末端电位水平),而下一个电阻片电阻丝首端电位会与 L_1 电抗器末端电位保持一致。由于金属抱箍片上方距离下一个电阻片电阻丝下侧“U”形拐弯位置较近,他们之间由于存在电位差,高电位的金属抱箍片对

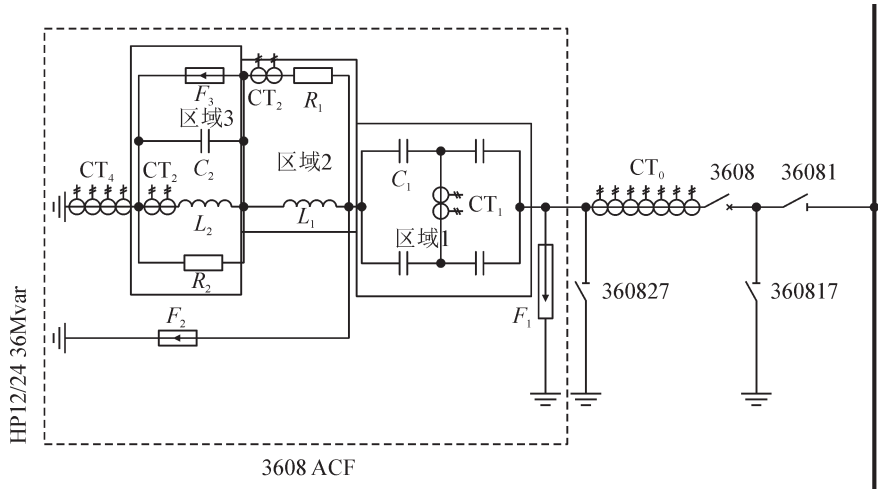


图4 故障滤波器电气接线图
Fig.4 Electrical wiring diagram of faulty filter

“U”形拐弯位置电阻丝放电,电弧向上飘移烧蚀电阻丝、烧断绝缘绳。

假设区域1部分整体为4个电容串并联成一个电容,电抗为 X_1 ;区域2部分为 R_1 和 L_1 并联,并联后电抗为 X_2 ;区域3部分为 C_2 、 L_2 、 R_2 并联后构成一个电抗 X_3 ,母线电压为 U ,则 R_1 两端电压 U_1 公式为

$$U_1 = U \times \frac{X_2}{X_1 + X_2 + X_3}$$

进一步简化为

$$U_1 = U \times \frac{X_2}{X + X_2} = U \times \frac{1}{X/X_2 + 1}, \text{ 即 } X_2 \text{ 越大, } U_1$$

越大。

因 X_2 由 R_1 和 L_1 并联构成, X_2 应小于并联支路最小值。当 R_1 断开无电流,区域2部分并联回路仅剩 L_1 ,则 X_2 相对以前变大, U_1 也相对以前变大,主回路电流 I 相对以前变小,区域1和区域3分得电压相对以前变小,表明 R_1 处断线,对区域1和区域3设备影响不大,但是提高并联电抗器 L_1 两端电压,并联电抗器设备状态可能受到影响。

1.3 小结

1)电阻片与电阻片连接棒之间的主回路连接线断线,导致电阻片连接棒电位悬浮,高电位电阻片连接棒接头处金属抱箍片对方电阻片放电,电弧导致电阻丝熔化、绝缘绳(水平方向)熔断。同时,金属抱箍片也沿临近支撑复合绝缘子表面对绝缘子固定螺栓放电,导致硅橡胶绝缘子烧断。

2)并联电抗器 L_1 两端电压异常升高,可能对匝间绝缘产生影响,应在检修停电后开展匝间绝缘检测试验^[11]。

3)对比2021年单元I 3601 ACF交流滤波器、2022年单元I 3608 ACF交流滤波器两起相似电阻丝烧蚀故障见图5,会发现3起事件存在一些共性特征:烧蚀现象均发生在电阻片与电阻片连接棒接头处金属抱箍片上方、主回路连接线均断线、保护装置均未动作。需要进一步结合材料、保护方面开展分析^[12]。



图5 前两次相同故障
Fig. 5 Same faults at the first two times

2 材料方面分析

2.1 光学体视镜检查

为查清主回路连接线断线的原因,笔者利用奥林巴斯光学体视镜对断裂主回路连接线进行宏观观察,主回路连接线为单根硬质铜线。根据断裂主回路连接线的体视镜照片(如图6-8所示),断裂主回路连接线位于螺栓侧断口无明显的颈缩现象,如图8所示,断口整体形状较平整,大致处于一个平面内,说明不是由于外界拉扯力导致的连接线断裂;断口表面虚线左侧部分存在较多颗粒状熔珠,虚线右侧部分断口较平整,表现出机械断裂形貌特征,断口表面存在大量的锈蚀痕迹,与图6中主回路连接线侧面腐蚀情况接近,证明主回路连接线断口处早已存在裂纹切面,且已长期锈蚀严重;图7所示断裂主回路连接线位于弹簧侧断口已熔融成金属熔球,熔球下方有明显的灼烧痕迹,证明弹簧侧断口上有电弧现象,应该是主回路连接线断开的一瞬间,弹簧侧断口端头向上弹至临近金属抱箍片处,导致高电位金属抱箍片对其放电烧蚀。



图6 主回路连接线位于螺栓侧断口
Fig. 6 The main circuit connection line located at the bolt side fracture



图7 主回路连接线位于弹簧侧断口
Fig. 7 The main circuit connection line located at the spring side fracture

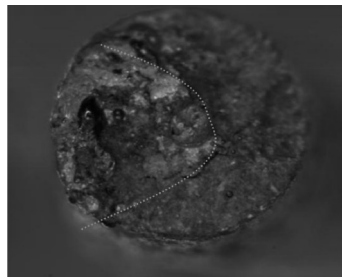


图8 主回路连接线螺栓侧断口微观形貌
Fig. 8 Fracture micromorphology of bolt side of main circuit connection line

2.2 扫描电镜检查

为进一步了解图8螺栓侧断口表面颗粒状熔珠的性质,利用EVO18扫描电镜对断裂连接线断面较平整侧进行微观观察,断口扫描电镜见图9,断口大部分区域保持原始形貌,图8断口表面虚线左侧部分可见较多颗粒状熔珠,利用EVO18扫描电镜的能谱仪对颗粒状熔珠进行能谱分析,发现7号和10号位置的白色颗粒主要是C和O为主的杂质颗粒,8号和9号位置基材则主要是Cu、C和O为主的金属氧化物。

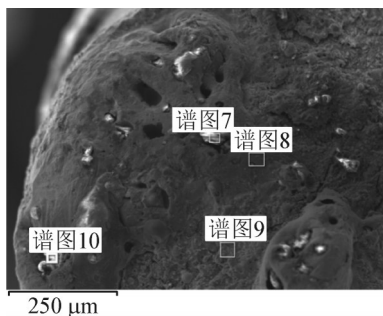


图9 断口扫描电镜照片
Fig. 9 SEM photo of the fracture

2.3 小结

1)根据主回路连接线断口宏观形貌、微观形貌及能谱分析得出:图8螺栓侧断口腐蚀严重,该断口为长期腐蚀导致;图9螺栓侧断口出现的金属熔珠和杂质颗粒,应为熔融金属及紧固纤维(绝缘绳)喷溅所致;图7弹簧侧断口出现的大颗粒熔球为弹簧侧断口端头烧蚀、熔融、凝固形成。因此,该主回路连接线断线的原因为主回路连接线在螺栓下面应力集中处发生应力腐蚀^[13],长期缓慢锈蚀导致微裂纹产生,且锈蚀导致裂纹切面加剧扩展,最终发生断裂。

2)主回路连接线裂纹扩展会导致导线载流面积减小,运行中会出现异常发热。因此,对于同一批次的其他电阻器,在平时运行时应重点强化对电阻片与电阻片连接棒接头处主回路连接线的红外测温检查工作,在出现异常温升时及时将电阻器停电检修处置^[14-15]。

3 保护方面分析

3.1 保护动作情况

故障期间,监控后台未见相关告警及动作事件,交流滤波器保护装置也无动作及告警报出。

3.2 保护逻辑分析

故障交流滤波器保护装置型号为RCS-976A,投入的保护包括差动速断保护、比例差动保护、变

化量差动保护、高端不平衡保护、过流保护、零序过流保护、电阻热过负荷保护、电抗热过负荷保护、失谐监视等。

图4区域2中与 R_1 支路CT相关的保护为电阻过负荷保护与电抗过负荷保护。保护原理为将流过滤器中的电阻或电抗的电流一一转换为等效(电抗考虑集肤效应)的工频热效应电流,然后再分别进行保护逻辑计算^[16-18]。调取故障录波(图10)分析,发现3608 HP12/24滤波器电阻支路CT₂A相电流为0,表明高端电阻 R_1 电阻片断线造成了电阻器主回路断路,导致电阻支路CT₂无电流流过。电阻过负荷保护与电抗过负荷保护均采用电流换算热效应,CT₂无流导致保护计算结果始终为零,无法满足过量保护判据要求,保护不可能动作。

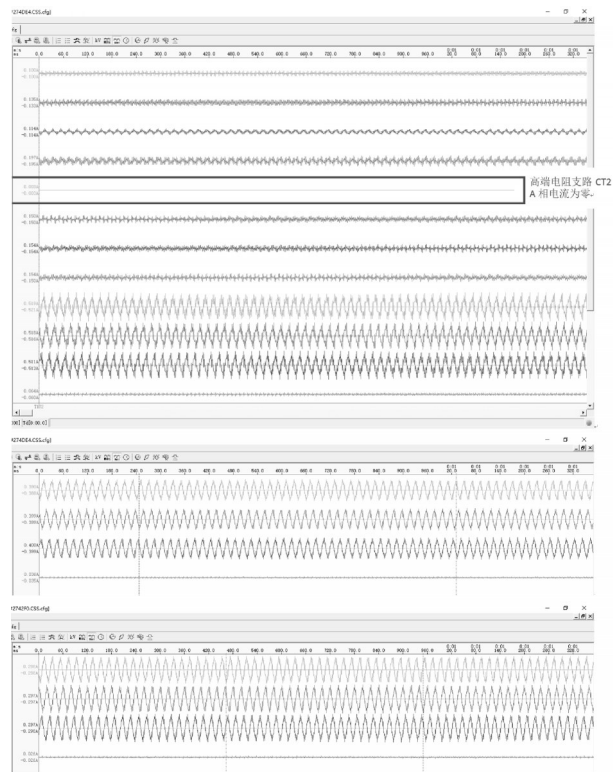


图10 交流滤波器电阻熔断后电阻支路波形
Fig. 10 the resistance branch waveform after the AC filter resistance is blown

3.3 小结

当前交流滤波器配置的保护主要是针对发生接地故障、电容器击穿、过负荷等异常工况,在发生电阻器熔断时,均不能灵敏反应该工况,导致保护装置无任何报文报出,不能及时发现电阻器熔断。

4 结语

综合分析可得到如下结论:

1)电阻片与电阻片连接棒之间的主回路连接

线断线,导致电阻片连接棒电位悬浮,高电位电阻片连接棒接头处金属抱箍片对上方电阻片放电,电弧导致电阻丝熔化、绝缘绳(水平方向)熔断。同时,金属抱箍片也沿临近支撑复合绝缘子表面对绝缘子固定螺栓放电,导致硅橡胶绝缘子烧断^[19-20];

2)主回路连接线断线的原因为主回路连接线在螺栓下面应力集中处发生应力腐蚀,长期缓慢锈蚀导致微裂纹产生,且锈蚀导致裂纹切面加剧扩展,最终发生断裂;

3)因交流滤波器配置的保护在发生电阻器熔断时均不能灵敏反应该工况,导致保护装置无任何报文报出,不能及时发现电阻器熔断^[21]。

同时,建议如下措施:

1)在设备运行期间,对于同批次的其他电阻器,重点强化对电阻片与电阻片连接棒接头处主回路连接线的红外测温、紫外电晕检测工作,在出现异常温升、放电时及时将电阻器停电检修处置^[22-24];

2)在设备停电期间,重点检查同批次电阻器主回路连接线、金属抱箍处电阻片状态,此外,该间隔并联电抗器 L_1 两端电压异常升高,可能对匝间绝缘产生影响,应在检修停电后开展匝间绝缘检测试验;

3)需进一步结合仿真分析电阻器熔断时,电流幅值变化特征、滤波器各支路电流谐波特征等,提出保护装置告警判据,实现快速识别滤波器组电阻器熔断异常,保护装置自动生成告警报文。

参考文献

- [1] 并联电容器装置设计规范:GB 50227—2017[S]. 2017.
Code for design of installation of shunt capacitors:GB 50227—2017 [S]. 2017.
- [2] 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.
- [3] 陈薪羽,马维勇. 一起220 kV变电站并联电容器装置故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(2): 62-67.
CHEN Xinyu, MA Weiyong. Fault analysis on shunt capacitor installation at 220 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(2): 62-67.
- [4] 赵启承,王敏,金涌涛,等. 一起20 kV并联电容器组火灾事故的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 13-21.
ZHAO Qicheng, WANG Min, JIN Yongtao, et al. Fire accident of 20 kV shunt capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 13-21.
- [5] 李胜川,高殿滢. 一起66 kV电容器故障的分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3): 51-56.
LI Shengchuan, GAO Dianying. Analysis and precaution of a 66 kV capacitor failure[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 51-56.
- [6] 王晋,王勇. 一次电容器跳闸的故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(3): 47-49.
WANG Jin, WANG Yong. Analysis on fault trip of capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(3): 47-49.
- [7] 蒋跃强,周行星,陆志浩. 华东500 kV电网无功补偿电容器故障分析[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 19-21.
JIANG Yueqiang, ZHOU Hengxing, LU Zhihao. Fault analysis for reactive compensation capacitors of East China 500 kV grids[J]. East China Electric Power, 2008, 36(11): 19-21.
- [8] 张科,原会静,郭磊,等. 换流站交流滤波电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(1): 74-79.
ZHANG Ke, YUAN Huijing, GUO Lei, et al. Fault analysis of AC filtering reactor at power converting station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1): 74-79.
- [9] 苗俊杰,姜庆礼. 500 kV变电站35 kV干式电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(2): 65-69.
MIAO Junjie, JIANG Qingli. Fault analysis of a 35 kV dry-type reactor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(2): 65-69.
- [10] 江少城,戴瑞海,夏晓波,等. 干式空心电抗器匝间绝缘检测原理及试验分析[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 67-71.
JIANG Shaocheng, DAI Ruihai, XIA Xiaobo, et al. Principle and analysis on inter-turn insulation detection of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 67-71.
- [11] 胡红光,刘军杰. 并联电容器的运行环境与故障分析[J]. 高压电器, 2008, 28(2): 56-57.
HU Hongguang, LIU Junjie. Analysis of operation environment and fault of parallel capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2008, 28(2): 56-57.
- [12] 张化良,杨伦,蔡德江,等. 110 kV并联电容器装置的参数配置探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(5): 13-17.
ZHANG Hualiang, YANG Lun, CAI Dejiang, et al. Discussion on parameter allocation of 110 kV shunt capacitor device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(5): 13-17.
- [13] 苏赤勇. 关于接头的腐蚀和发热及防止措施[J]. 广西电力技术, 2000, 23(2): 27-29.
SU Chiyong. Corrosion, heat and their prevent measures about connector[J]. Guangxi Electric Power Technology, 2000, 23(2): 27-29.

- [14]胡帅,马涛,王辉. 电容器组连接件过热的模拟试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1):80-83.
HU Shuai, MA Tao, WANG Hui. Simulation test study on overheating of connection elements of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 80-83.
- [15]安鸽,南军波. 无功补偿装置中电抗器异常发热现象分析及解决方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(1): 6-9.
AN Ge, NAN Junbo. Analysis and solutions of abnormal heat phenomenon of reactor in reactive power compensation device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 6-9.
- [16]黄云程,沈谢林,张国灿,等. 电容器组故障的分布式电流保护方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3):1-7.
HUANG Yuncheng, SHEN Xieli, ZHANG Guocan, et al. Research on distributed current protection method for the faults of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3): 1-7.
- [17]文俊,孟伟,殷威杨,等. ± 800 kV特高压直流输电工程交流滤波器优化设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(4):912-917.
WEN Jun, MENG Wei, YIN Weiyang, et al. Optimizing design of AC filters of ± 800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 912-917.
- [18]黄莹,黎小林,饶宏,等. 云广 ± 800 kV直流输电工程交流滤波器设计关键问题研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2):67-71.
HUANG Ying, LI Xiaolin, RAO Hong, et al. Study on the key issues of AC filter design for Yunnan-Guangdong ± 800 kV DC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 67-71.
- [19]杨代勇,余飞宏,矫立新,等. 66 kV变电站并联电容器组故障发展特征研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2):5-11.
YANG Daiyong, YU Feihong, JIAO Lixin, et al. Study on fault development characteristics of shunt compensation capacitor bank in 66 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 5-11.
- [20]廖斌,梁晨,陈松,等. 一起35 kV并联电容器装置故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5):1-6.
LIAO Bin, LIANG Chen, CHEN Song, et al. Fault analysis on 35 kV shunt capacitor device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 1-6.
- [21]颜红岳,吴洪林. 直流滤波电容器内部熔丝的过流能力验证及对保护的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5):33-37.
YAN Hongyue, WU Honglin. Verification of overcurrent capability of internal fuses of DC filter capacitor and influence on protection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 33-37.
- [22]侯杰,谢远伟. 电力电容器损坏原因与抑制措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5):55-57.
HOU Jie, XIE Yuanwei. Study on damage causes of power capacitor and preventive measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(5): 55-57.
- [23]金向朝,黄松波,陆培钧,等. 电容器故障监测系统的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(3):40-44.
JIN Xiangchao, HUANG Songbo, LU Peijun, et al. Application study of the on-line monitoring system of shunt capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(3): 40-44.
- [24]王肃朝,白宏伟,刘玉超. 电力电容器常见故障分析及预防研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(3):112-115.
WANG Suchao, BAI Hongwei, LIU Yuchao. Research on common faults, causes and preventive measures of power capacitor[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(3): 112-115.

作者简介:

郭磊(1982—),男,正高级工程师,主要从事设备状态检测研究工作。E-mail:icefirephoenix@163.com。

张朝峰(1983—),男,高级工程师,主要从事直流设备运检管理工作。E-mail:cfz0115@163.com。

胡润阁(1989—),男,高级工程师,主要从事设备状态检测研究工作。E-mail:825096990@qq.com。

高新轶(1990—),男,工程师,主要从事电力设备状态评价研究工作。E-mail:gao.xinyi@qq.com。

张旭(1988—),男,工程师,主要从事特高压设备运维,检修管理工作。E-mail:979259500@qq.com。

马云瑞(1990—),男,高级工程师,主要从事设备状态检测研究工作。E-mail:810789147@qq.com。

王默(1987—),男,高级工程师,主要从事交流保护监督工作。E-mail:wangmo123@126.com。

魏震(1993—),男,工程师,主要从事特高压交直流设备检修工作。E-mail:65602331@qq.com。