

35 kV 开关柜沿面放电图谱分析及特性研究

彭炜文¹, 郑振峰¹, 黄竑铭², 郑宇锋¹, 黄圆皓¹, 林莹莹¹

(1. 国网福建电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 局部放电检测技术是开关柜绝缘检测的有效手段之一。文中采用暂态地电压法、空气式超声波法、特高频法和红外热成像检测法对一起35 kV开关柜的绝缘缺陷进行检测, 结合其放电图谱及特性判定开关柜母线室内发生多处沿面放电。通过开关柜停电解体检查发现, 柜顶的散热铁丝网因盐雾腐蚀锈蚀严重, 母线室内绝缘件表面附着的铁锈和盐分致使母线绝缘水平严重降低。为防止类似缺陷的发生, 建议沿海地区的变电站应严控高压室室内环境, 并常态化开展局部放电检测; 在开关柜设计阶段, 应增强柜体防盐雾腐蚀性能, 且柜顶严禁设置直通式风道。

关键词: 开关柜; 沿面放电; 局部放电; 绝缘缺陷; 图谱; 盐雾

Analysis and Characteristic Research on Surface Discharge Pattern of 35 kV Switchgear Cabinet

PENG Weiwen¹, ZHENG Zhenfeng¹, HUANG Hongming², ZHENG Yufeng¹,
HUANG Yuanhao¹, LIN Yingying¹

(1. Quanzhou Power Supply Company of Fujian Electric Power Co., Ltd., Fujian Quanzhou 362000, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Partial discharge detection technology is one of the effective means of insulation detection of switchgear cabinet. In this paper, an insulation defect of 35 kV switchgear cabinet is detected by using such methods as transient earth voltage (TEV), air ultrasonic wave, ultra-high frequency (UHF) and infrared thermal imaging. The surface discharge at multiple places inside the busbar compartment of the switchgear cabinet is judged in combination with its discharge pattern and characteristic. It is found through power off and disassembly of the switchgear cabinet that the heat-dissipating wire mesh on the top of the cabinet is severely corroded due to the salt mist. And the rust and salinity attached to the surface of the insulating part cause a serious reduction of insulation level of the busbar. For preventing the occurrence of similar defects, it is suggested that the indoor environmental conditions of the high-voltage room of substations located in the coastal areas need to be strictly controlled, and partial discharge detection shall be performed regularly. In the design stage of the switchgear cabinet, the salt mist corrosion resistance performance shall be strengthened, and the straight-through air ducts on the top of the cabinet shall be strictly prohibited.

Key words: switchgear cabinet; surface discharge; partial discharge; insulation defect; pattern; salt mist

0 引言

由于占地面积小、安装和维护方便等优点, 35 kV 交流金属高压铠装开关柜得到了广泛的应用, 其运行的稳定性和可靠性直接影响到电网的安全^[1-4]。相比于其他电力设备, 开关柜内部结构较为复杂, 且由于其设计、材料、安装和现场环境等诸多因素造成的故障率也相对较高。开关柜的故障主要包括机

械故障、载流故障和绝缘故障3个方面^[5]。根据相关统计, 绝缘与载流故障占到了总故障的40%^[6-8]。绝缘与载流故障都是与局部放电有着密切联系, 因此在开关柜正常运行的条件下, 开展带电检测, 对发现早期的绝缘和载流故障具有非常重大的意义。

局部放电是绝缘劣化的先兆, 因此对开关柜定期开展局部放电检测是有效发现绝缘缺陷的重要手段之一^[9-11]。当开关柜内部发生局部放电时, 会伴

随声、光、电、热等物理和化学的变化。根据放电信号的传播特性,现阶段对开关柜局部放电的检测主要采用暂态地电压法^[12-15]、空气式超声波法^[16-18]、特高频法^[19-22]等手段,可从多角度对其绝缘状态进行评估,综合判断内部存在的缺陷隐患,从而采取有效措施,避免因绝缘缺陷引发事故。另外,红外热成像检测技术能有效判断缺陷的具体部位^[23-24],为后续处理提供有力佐证。

文中介绍了一起 35 kV 开关柜绝缘缺陷引发的沿面放电的检测与分析过程,对开关柜进行解体,结合红外热成像、绝缘电阻等检测手段探索了缺陷产生的原因,发现是由于开关柜结构设计存在家族性缺陷,同时对其进行了处理并提出相应的改进预防措施。

1 事件概述

2019年12月,对某110 kV 变电站 35 kV 开关柜进行局部放电检测时,发现2号主变35 kV 侧进线柜31B开关柜顶部存在明显的异常信号。该开关柜型号为ASN1-40.5,由库柏电气有限公司生产,现场开关柜见图1。

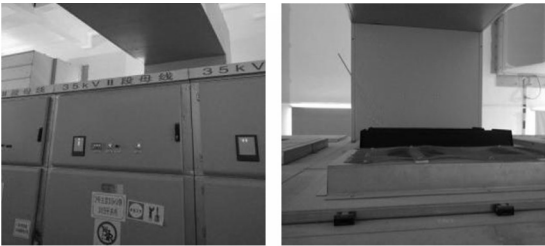


图1 35 kV 开关柜现场实物图

Fig. 1 Physical map of 35 kV switchgear

1.1 暂态地电压检测

当开关柜内部发生局部放电时,会在金属表面感应出高频电流,为此采用电容耦合原理能检测到局部放电的幅值和脉冲^[25-26]。对31B开关柜及相邻的几个开关柜开展暂态地电压检测,测量结果见表1。

表1 暂态地电压检测结果

Table 1 TEV testing data

位置	暂态地电压/dB					
	前中	前下	顶部	后上	后中	后下
金属背景	32	32	32	32	32	32
311	34	33	36	35	34	37
312	33	34	33	35	36	35
313	35	36	42	41	40	36
31B	37	38	57	48	45	39
3001 开关柜	34	35	43	40	37	35
1 号站用变	35	34	35	33	36	37
PT 柜	37	35	38	35	37	35
314	35	34	36	37	35	36

不同开关柜、不同部位之间的暂态地电压测量数据见图2。由图2可知,2号主变35 kV 侧31B开关柜暂态地电压检测数值较其他柜整体偏大,且其顶部最大值为57 dB,与背景值相比相差25 dB,超过了相关规程的20 dB 标准,因此判其内部存在较为严重的放电情况。

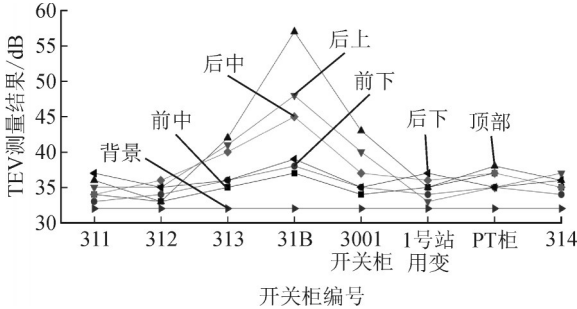


图2 开关柜 TEV 测试数据横向对比

Fig. 2 Lateral comparison of TEV testing data for different switchgears

1.2 超声波检测

为了判断31B开关柜内部的放电类型,文中采用空气式超声波法对其进行跟踪检测,检测结果见表2,其中有效值、峰值为测得的超声波信号通过转换所得的电信号参数。

表2 超声波检测结果

Table 2 Results of ultrasonic detection

参数	前中	前下	顶部	后上	后中	后下
有效值/dB	22	21	45	41	34	20
峰值/dB	29	24	52	46	35	28
与 50 Hz 相关性	0	1	0	0	0	0
与 100 Hz 相关性	12	14	20	23	16	11

由表2可知,开关柜顶部的信号值最大,其超声波检测图谱见图3,其分别为PRPS、PRPD及 Q_{max} 图谱。由图3中可以看出,放电图谱较对称,放电峰值相差较大,且存在100 Hz 相关性,无50 Hz 相关性,呈现沿面放电的特征。图中统计得到的放电图谱在任何时间段内都是连续性的放电,而传统意义上的放电由于充放电需要时间且具有随机性,一般存在间歇性,为此可以判断开关柜内部的异常局放信号为多个放电源的叠加。

1.3 特高频检测及放电点定位

为了进一步判断放电的严重程度和定位放电源的位置,文中采用特高频检测法对31B开关柜进行检测,其PRPD、PRPS、 Q_{max} 图谱见图4。

由图4可知,特高频信号的最大幅值为-29 dB。对于周期图谱,局部放电信号呈现出工频周期内两簇较为对称的放电信号,而对于PRPD/PRPS图谱,放电幅值较分散,放电时间间隔不稳定,具有较大的100 Hz 相关性,符合沿面放电特征。

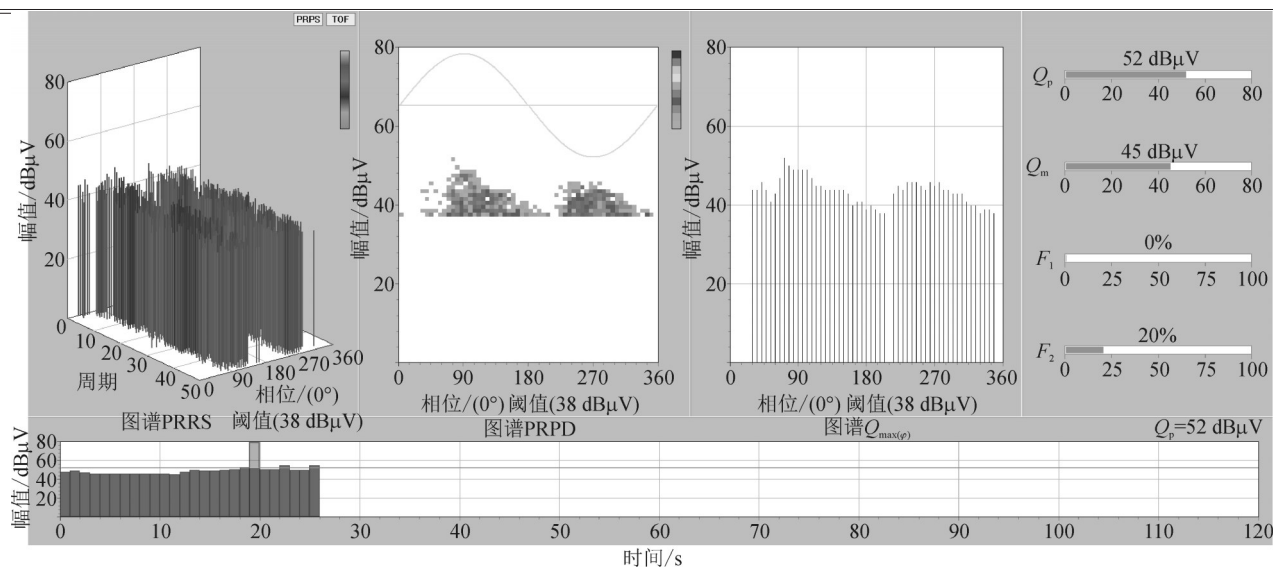


图3 超声波检测图谱

Fig. 3 The map of ultrasonic detection

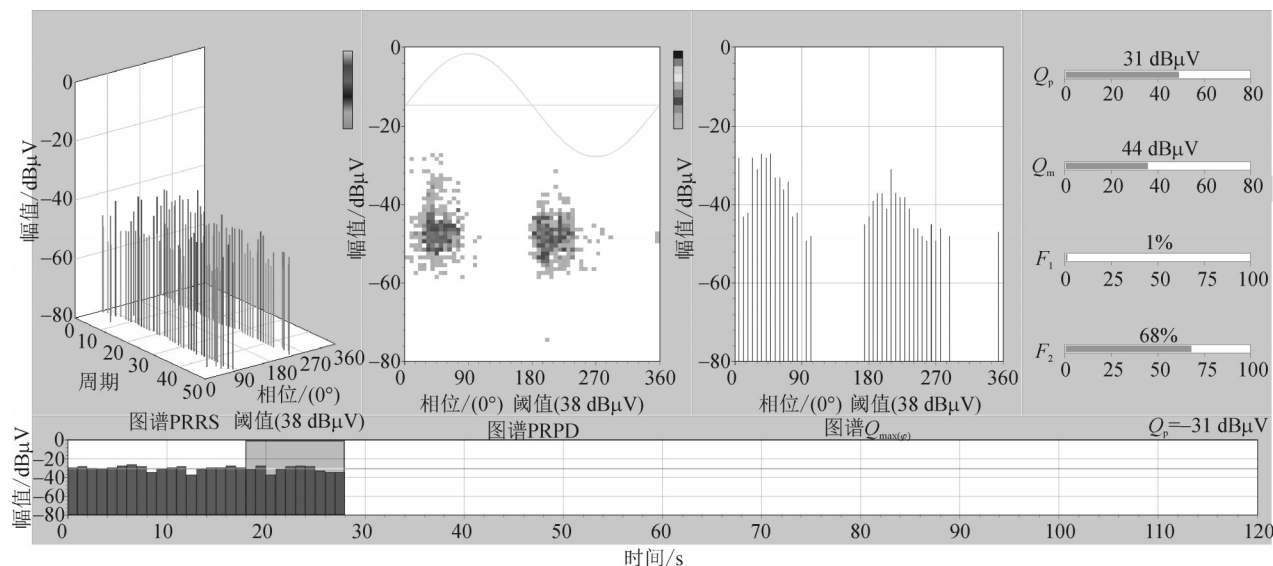


图4 特高频检测图谱

Fig. 4 The map of UHF detection

为了确定放电源的具体位置,采用示波器及两个特高频传感器对放电源进行定位。文中采用的方法是平面法,包括横向、纵向及深度3个方向的定位检测,通过时差法及检测幅值来判断放电源的位置。而在多次检测定位中发现,每一次的放电位置均不相同,结合超声波局部放电检测结果,判定31B内部存在多个放电源。

2 解体检查

2.1 外观检查

为了准确判定开关柜内部引起沿面放电缺陷的原因,避免进一步发展造成供电事故,供电单位对31B开关柜及35 kV II段母线进行了紧急停电,

并联合厂家对开关柜进行了开仓检查,31B开关柜母线仓内部结构见图5。



图5 开关柜母线仓结构图

Fig. 5 The structure figure of busbar chamber

对31B开关柜母线仓解体检查,发现穿墙套管、开关静触头盖和母排热缩套表面落满了铁锈,进一步检查发现绝缘件表面附着大量盐分,存在明显的放电痕迹,具体见图6。

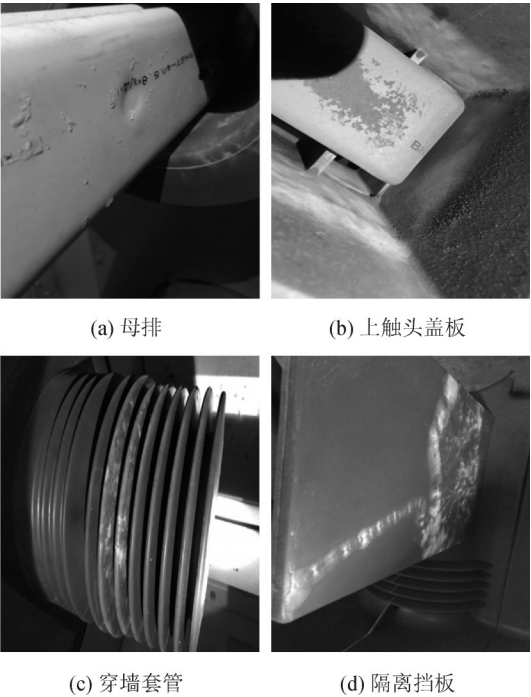


图6 母线仓内绝缘器件

Fig. 6 The insulation device of busbar chamber

从图6可以看出,绝缘器件表面由于持续的放电出现发白的痕迹,将白色粉末通过X荧光元素进行分析,发现其主要是钠(Na),另外包含铁(Fe)、镍(Ni)、锌(Zn)等元素,说明该粉末是由盐分和金属分解组成。

2.2 绝缘性能检测

为了进一步探究绝缘情况,采用绝缘电阻表对各绝缘部件绝缘电阻进行测量,测量时选择5 000 V电压,测量情况见图7。从图7中可以看出,测量过程中出现明显的放电火花,说明表面绝缘失效。



图7 绝缘电阻测量

Fig. 7 Insulation resistance measurement

各部位绝缘电阻的具体测量数值见表3。由表3可知,绝缘部件表面的绝缘电阻数值非常低,作为对比,现场对同型号、全新的绝缘部件进行相同位置的绝缘电阻测量,测得结果均为无穷大。

表3 绝缘电阻测量结果

Table 3 Results of insulation resistance measurement MΩ				
参数	A相左侧	A相触头盖	A相触头盖	A相右侧
	套管	内侧	外侧	套管
绝缘电阻	2.6	3.5	3.8	2.9

2.3 红外热成像检测

为了准确定位放电源位置,对母线试加运行相电压20 kV,然后采用红外检测仪进行观察,其红外图谱见图8。从图8中可以看出,在运行电压的作用下,31B开关柜母线仓的穿墙套管及静触头盖均出现了明显的温升现象,综合考虑暂态地电压、超声波及特高频的检测 results 及开关柜母线仓的解体情况,可以断定31B开关柜的母线穿墙套管及静触头盖由于污秽、潮湿发生了多处沿面放电。

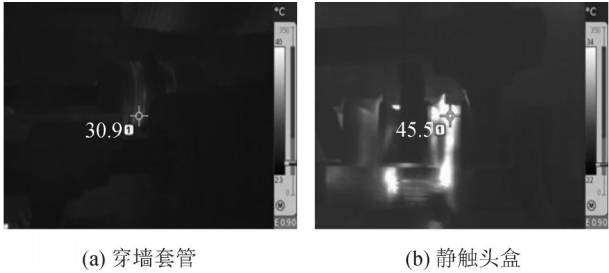


图8 母线仓的红外图谱

Fig. 8 Infrared spectra of busbar chamber

3 故障处理及原因分析

对照上述绝缘电阻失效和发热点位置,用纯净水对31B开关柜后上柜内的母线穿墙套管、母线热缩套、开关柜静触头上盖板等部位进行反复擦拭,清除表面的盐分和铁锈,然后用电风吹干。处理完毕后,各绝缘件的绝缘电阻值恢复至几十GΩ以上,运行电压下的局放信号恢复到正常值以内,原先的大量红外检测发热点消失,试验结果合格。重新送电后进行局放信号复测,未发现异常。

据了解,事发变电站位处沿海地区,35 kV高压室的室内环境条件不理想,空气湿度大,且盐雾现象明显。经现场检查发现,ASN1-40.5型号开关柜的顶部安装有直通式风道的散热铁丝网,其外表面发生了严重腐蚀,布满了铁锈。因此,可推断开关柜母线仓内穿墙套管、开关静触头盖和母排热缩套表面的铁锈是从开关柜顶部的散热铁丝网掉落下来的。另外,由于母线仓内气温较高,空气中的水分易蒸发,随后形成体积极小的盐粒,长时间的积累便在母排表面形成大量的盐分。综合上述两个因素的共同作用致使母线整体绝缘水平下降,在运行电压条件下引发多处沿面放电。为此,对该开关柜顶部的散热铁丝网进行了更换和封堵处理。

4 预防措施

开关柜正常工作时会产生热量,热量的高低取决于电流大小。对于大电流金属封闭式开关柜,母线室的母排流经的电流达到3 150 A甚至更大,若母线室的散热与通风设计不合理,会导致开关柜的温

升超标,进而影响设备的安全稳定运行。虽然在开关柜的顶部安装散热铁丝网可在一定程度上有效降低母线室的温升,但对于位处沿海地区的变电站,实践证明这种设计并不符合设备运行可靠性要求。为此,针对文中所介绍的35 kV开关柜绝缘缺陷引发的沿面放电故障案例,提出了以下几点预防措施。

1)开关柜柜顶的防护等级不应小于IP4X,确需要进行通风或其他专用散热的隔室应配置防尘罩,不应出现直通式风道,且同步实现防爆压力释放装置的开启。

2)对高压室室内的环境湿度及盐雾成分含量进行实时监测^[27],严格控制空气湿度及氯离子含量,并将空气盐雾成分含量超标纳入变电站智能化预警管控系统。

3)虽然现运行开关柜的柜体及隔室隔板在制造前均进行了防腐处理,但在一些特定的场合,如高盐雾,现有技术的防腐措施已无法适用;为提高沿海地区开关柜的运行可靠性,可采用防腐性能更高的合金类材质,或在柜体外表面涂刷耐蚀层^[28-29],以解决开关柜防盐雾腐蚀性能不足的问题。

4)对于位处沿海高盐雾地区的变电站,可适当缩短开关柜的停电检修周期,并结合专业巡视作业项目常态化开展开关柜的局部放电检测,以及早发现异常运行的设备。

5 结语

文中介绍了一起沿海地区变电站的开关柜因盐雾腐蚀造成内部绝缘缺陷而引发沿面放电的故障案例。通过开关柜解体检查发现,ASN1-40.5型号开关柜的顶部设计有散热铁丝网,这种设计结构不适用于沿海地区高盐雾的环境条件,属于家族性缺陷。针对此缺陷,文中提出了柜顶严禁设置直通式风道、严控高压室室内环境湿度及盐雾成分含量、增强柜体防盐雾腐蚀性能、常态化开展局部放电检测等预防措施。

参考文献:

- [1] 叶成刚. 35 kV在役开关柜绝缘结构改进研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
YE Chenggang. Research on insulation structure improvements of 35 kV in service switchgear panel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [2] 顾云霞,孙海文,金虎. TEV与超声波法在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 陕西电力, 2012, 40(12): 12-16.
GU Yunxia, SUN Haiwen, JIN Hu. Probe into partial discharge detection and location of switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods[J]. Shaanxi Power, 2012, 40(12): 12-16.
- [3] 林奕夫,叶兆平,刘冬晨,等. 高压开关柜局部放电 TEV 信号传播衰减特性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 224-231.
LING Yifu, YE Zhaoping, LIU Dongchen, et al. Propagation and attenuation of TEV signals by partial discharge in high voltage switchgear[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 224-231.
- [4] 聂一雄,徐卫东,周文文,等. 12 kV 固体绝缘开关柜中绝缘气隙缺陷的放电特征[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2894-2902.
NIE Yixiong, XU Weidong, ZHOU Wenwen, et al. Discharge characteristics of air-gap defects in insulating material of 12 kV solid insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2894-2902.
- [5] 梁亮. 珠海配网 10 kV 开关柜故障分析及对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
LIANG Liang. Analysis and countermeasures of 10 kV switchboard malfunction in Zhuhai distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [6] 陶诗洋,张学哲,段大鹏,等. 开关柜绝缘缺陷暂态地电压检测技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 215-221.
TAO Shiyang, ZHANG Xuezhe, DUAN Dapeng, et al. Research on transient earth voltage detection technology for switchgear insulation defects[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 215-221.
- [7] 郭志伟,徐子涛,刘波,等. 基于最优特征量选取的开关柜故障判别方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 85-91.
GUO Zhiwei, XU Zitao, LIU Bo, et al. Research on switchgear fault judgment method based on optimal feature quantity selection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 85-91.
- [8] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 145-149.
TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, et al. High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 145-149.
- [9] 高阳,谷彩连,刘宝良,等. 高压开关柜局部放电特性分析与抗干扰研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(3): 15-19.
GAO Yang, GU Cailian, LIU Baoliang, et al. Analysis of partial discharge characteristics and external interference characteristics of switch cabinet and anti-interference research[J]. Power Electronics, 2020, 54(3): 15-19.
- [10] 李永祥,亢银柱,王天正,等. 高压开关柜内部电气设备局部放电特性的检测与分析[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 97-103.
LI Yongxiang, KANG Yinzhu, WANG Tianzheng, et al. Detection and analysis of partial discharge characteristics for high voltage switchgear internal electrical device[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 97-103.
- [11] 覃煜,范伟男,张行,等. 开关柜绝缘缺陷的局放带电检测及综合诊断分析[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 278-283.

- QIN Yu, FAN Weinan, ZHANG Hang, et al. Partial discharge on-line detection and comprehensive diagnosis analysis of insulation defects in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 278-283.
- [12] 李宾宾, 张健, 柯艳国, 等. 基于暂态地电压的开关柜局放特征提取及类型识别方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 37-44.
- LI Binbin, ZHANG Jian, KE Yanguo, et al. Research on partial discharge feature extraction and type identification method of switchgear based on transient earth voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 37-44.
- [13] 时广华. 开关柜局部放电带电检测与故障模式识别[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
- SHI Guanghua. Partial discharge charge detection and fault pattern recognition of switchgear[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018.
- [14] 黄世龙, 王晓辉, 郭旭敏, 等. 采用TEV传感器的开关柜局部放电检测技术研究与应用[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 19-26.
- HUANG Shilong, WANG Xiaohui, GUO Xumin, et al. Research and implementation of partial discharge in HV switchgear using TEV sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 19-26.
- [15] 张丽娜, 黄恽, 汪良杰, 等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤F-P局部放电超声传感器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 2-9.
- ZHANG Lina, HUANG Yi, WANG Liangjie, et al. High sensitivity fiber optic F-P partial discharge ultrasonic sensor based on a grooved silicon diaphragm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 2-9.
- [16] 白鹭, 李小婧, 董理科, 等. 基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 42-48.
- BAI Lu, LI Xiaojing, DONG Like, et al. Study on the partial discharge types of ring network cabinets based on ultrasonic method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 42-48.
- [17] 易鹏飞, 邹平, 梁科, 等. 基于超声波技术的开关柜故障预警方法研究[J]. 电工技术, 2021(2): 108-109.
- YI Pengfei, ZHOU Ping, LIANG Ke, et al. Research on fault warning method of switch cabinet based on ultrasonic technology[J]. Electric Engineering, 2021(2): 108-109.
- [18] 郑祥, 管鹏, 田伟. 基于超声波局部放电信号的开关柜绝缘缺陷类型识别[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 124-127.
- ZHENG Xiang, GUAN Peng, TIAN Wei. Identification of insulation defect type based on ultrasonic partial discharge signal[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(16): 124-127.
- [19] 牛博, 张欣宜, 李亚峰, 等. 基于特高频法识别配电站房开关柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 43-47.
- NIU Bo, ZHANG Xinyi, LI Yafeng, et al. Study on identification of partial discharge types of switch cabinets in distribution station room based on UHF method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 43-47.
- [20] 何金, 田涛, 宋晓博, 等. 基于特高频法的开关柜局部放电识别方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 90-95.
- HE Jin, TIAN Tao, SONG Xiaobo, et al. Research on partial discharge identification method of switchgear based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 90-95.
- [21] 侯春光, 张润奇, 曹云东, 等. 开关柜局部放电信号抗干扰算法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(12): 22-27.
- HOU Chunguang, ZHANG Runqi, CAO Yundong, et al. Research on anti-interference algorithm of partial discharge signal switch cabinet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(12): 22-27.
- [22] 朱楠楠, 李腾飞. 特高频定位技术在高压开关柜故障诊断中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 43-49.
- ZHU Punan, LI Tengfei. Application of ultra-high frequency location technology in fault diagnosis of high voltage switchgear[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 43-49.
- [23] 高伟. 矩阵式红外测温仪在10 kV开关柜在线监测中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- GAO Wei. Application of matrix infrared thermometer in on line monitoring of 10 kV switchgear[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [24] 叶海蓉, 葛乐矣, 钟桂英. 固体绝缘开关柜在线检测技术[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 35-40.
- YE Hairong, GE Leyi, ZHONG Guiying. Online detection technology of solid insulation RMU based on infrared thermal imaging[J]. Electric Power, 2016, 49(9): 35-40.
- [25] 林俊浩. 开关柜局放的超声波及地电波检测技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- LIN Junhao. The detection technology of switchgear partial discharge base on ultrasonic and transient earth voltage[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [26] 王鹏, 刘玉婷, 邹阳, 等. TEV和超声波检测法在开关柜局部放电检测中的应用评述[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 75-83.
- WANG Peng, LIU Yuting, ZOU Yang, et al. Application of TEV and ultrasonic detection methods in partial discharge detection of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 75-83.
- [27] 查娜. 近海环境配电箱温度控制和盐雾沉积率监测系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- ZHA Na. Study on temperature control and salt spray deposition rate monitoring system of distribution box in offshore environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [28] 胡校, 张贤斌, 陈林. 一种防盐雾腐蚀的高压开关柜: CN206283131U[P]. 2017-06-27.
- HU Xiao, ZHANG Xianbin, CHEN Lin. A high-voltage switchgear against salt fog corrosion: CN206283131U[P]. 2017-06-27.
- [29] 李延雷, 刘静茹. 沿海电厂防盐雾腐蚀的措施[J]. 价值工程, 2017, 36(29): 218-219.
- LI Yanlei, LIU Jingru. Measures against salt fog corrosion in coastal power plants[J]. Value Engineering, 2017, 36(29): 218-219.

彭伟文(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究(E-mail: 710355069@qq.com)。