

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.014

配网 10 kV 无间隙氧化锌避雷器温升特性及状态评估研究

黄伟翔^{1,2}, 陈千懿^{1,2}, 张炜^{1,2}, 胡刚³, 林秀清⁴,
黄志都^{1,2}, 张龙飞^{1,2}

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530023; 2. 广西电网设备监测及诊断工程技术研究中心, 南宁 530023;
3. 广西电网有限责任公司百色供电局, 广西百色 533000; 4. 广西电网有限责任公司计量中心, 南宁 530025)

摘要: 金属氧化物避雷器是配电网中重要的组成元件, 对其进行带电检测, 以诊断其可能存在的缺陷, 对保证电力系统的安全稳定运行有重要意义。目前红外测温技术是避雷器带电检测的主流方法之一, 而掌握避雷器的温升特性是该技术的基础。鉴于此, 文中研究了配网无间隙氧化锌避雷器的温升特性。文中分别选取不同老化、受潮程度的样品进行了对比试验, 探究不同老化程度以及不同阻性电流下氧化锌避雷器的温升情况。试验发现避雷器承受的电压越高, 阻性电流越大, 温度上升越快。避雷器温升和阻性电流呈现良好的二次函数拟合关系。试验结果和拟合曲线均得出: 避雷器样品阻性电流为 50 μA 时, 温差为 1~2 K; 阻性电流为 70 μA 时, 温差为 3~6 K 左右; 阻性电流为 100 μA 时, 温差在 7 K 以上, 从而证明了试验的准确性。文中的研究将有助于为 10 kV 无间隙氧化锌避雷器的带电检测提供参考。

关键词: 金属氧化物避雷器; 红外测温; 温升特性; 老化; 受潮

Study on Temperature Rise Characteristics and State Assessment of 10 kV Gapless Zinc Oxide Arrester in Distribution Network

HUANG Weixiang^{1,2}, CHEN Qianyi^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, HU Gang³, LIN Xiuqing⁴,
HUANG Zhidu^{1,2}, ZHANG Longfei^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi Power Grid Equipment Monitoring and Diagnosis Engineering Technology Research Center, Nanning 530023, China; 3. Baise Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guangxi Baise 533000, China; 4. Measurement Center of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530025, China)

Abstract: Metal oxide arresters are critical components in power distribution network. Conducting live detection on the arresters to diagnose their potential defects is of great significance for ensuring the safe and stable operation of power system. At present, the infrared temperature measurement technology is one of the mainstream methods for live detection of lightning arresters, and mastering the temperature rise characteristics of the arresters is the basis of this technology. In view of this, in this paper the temperature rise characteristics of gapless zinc oxide arresters in distribution network is studied. In this paper samples with different extent of aging and dampness are selected for comparative tests to explore the temperature rise of zinc oxide arresters under different aging extent and different resistance current. It is found by test that the higher the voltage withstood by the arresters, the greater the resistive current and the faster the temperature rise. The temperature rise and resistive current of the arresters show a good quadratic function fitting relationship. The experimental results and fitting curves show that the temperature difference is 1-2 K when the resistive current of arrester sample is 50 μA . In case of the resistive current at 70 μA , the temperature difference is about 3-6 K. When the resistive current is 100 μA , the temperature difference is more than 7 K,

收稿日期: 2025-07-16; 修回日期: 2025-09-20

基金项目: 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20220125); 广西科技基地与人才专项(AD22080006)。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd.(GXKJXM20220125), Guangxi Science and Technology Base and Talent Project(AD22080006).

which thereby proving the accuracy of the test. The research in this paper will be helpful to provide reference for the live detection of 10 kV gapless zinc oxide arresters.

Key words: metal oxide arresters; infrared thermometry; temperature rise characteristics; aging; moisture

0 引言

电力系统运行中的避雷器产生缺陷后如不能被及时发现和更换,可能会导致炸裂等事故,将对电力系统安全稳定运行构成严重的威胁^[1-4]。金属氧化物避雷器的阀片长期承受运行电压,避雷器热稳定性和阀片的老化程度都会影响泄漏电流的大小,而泄漏电流的增大将导致避雷器的发热,会进一步加速避雷器阀片的老化^[5-6]。为此,获取避雷器状态量、评估避雷器状态,及时发现事故隐患,对避雷器定期进行带电检测具有重要意义,同时也顺应了如今由预防性试验向状态检修方式过渡的趋势。目前无间隙避雷器的带电检测手段主要包括阻性电流测试^[7-8]、红外测温^[9-10]、超声局放检测^[11-12]等。

红外测温技术是避雷器带电检测的主流方法之一,其通过光学系统接受红外辐射并聚焦在红外探测器上,以数字或二维热图像的形式显示目标避雷器的温度值或温度场分布。目前国内外关于避雷器热特性以及红外检测的研究已有不少。桑建平^[13]、彭珑^[14]等通过试验分别研究了复合外套避雷器的稳态热特性和电阻片固有热特性,给出了常见的热特性规律;张金岗^[15]、刘晓飞^[16]等结合两起红外测温技术诊断500 kV氧化锌避雷器运行状态的案例,从外观检查和解体检查分析了红外测温技术在发现避雷器受潮缺陷中的有效性;胡锡幸^[17]等提出了基于温度补偿的金属氧化物避雷器带电测试方法,明显提高了现场检测准确性。在结合现场案例和红外检测技术发展基础上,有关标准^[18-19]初步提出了避雷器等电力设备的缺陷诊断判据。上述研究表明红外测温技术可有效检测避雷器本体因老化或受潮而引起的发热现象,但是相关技术研究和标准均未明确避雷器老化状态量。

文中主要开展以下工作:通过对不同老化程度以及不同阻性电流下氧化锌避雷器的温升情况进行试验研究,获得避雷器试品温差情况,进一步结合校正决定系数得到避雷器试品温差与阻性电流的关系拟合曲线。研究可为工程实际中的无间隙避雷器红外检测技术提供参考依据。

1 试验样品装置及试验方法

1.1 试验样品

试验采用YH5WS-17/50型氧化锌避雷器,包含性能正常的样品,经过雷电冲击老化的样品,经过水煮的样品以及工作现场取回的样品。其中性能正常的样品参数值见表1。

表1 YH5WS-17/50型氧化锌避雷器样品的参数值

Table 1 Parameter values of YH5WS-17/50 zinc oxide arrester samples

参数	数值
系统标称电压/kV	10
额定电压/kV	17
持续运行电压/kV	13.6
标称放电电流/kA	5
直流1 mA参考电压/kV	不大于25
雷电冲击电流下残压/kV	不大于50

雷电冲击老化样品为经过5 kA负极性雷电流(8/20 μ s)冲击300次的样品,阀片损坏严重;水煮样品为新到货避雷器样品经过沸水煮,期望达到人为使避雷器阀片受潮的目的;工作现场取回的样品为运行了10年的避雷器,长期承受工频电压,阀片老化程度较高。

1.2 试验电路布置与试验方法

布置试验电路见图1。通过升压系统对避雷器施加工频电压,利用电容分压器获取避雷器两端电压信号,并利用阻性电流测试仪观测避雷器的全电流及阻性电流值,每隔2~5 min对避雷器表面进行一次红外测温,记录避雷器表面温度以及此时阻性电流值与室温;待避雷器表面温度稳定后,记录室温温差。断电后,待避雷器冷却后,方可进行下一组试验。

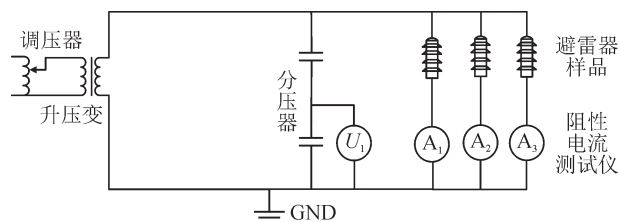


图1 试验电路

Fig. 1 Test circuit

改变试验电压(电流)或更换试品,重复上述步骤试验。

2 试验结果分析

2.1 不同老化程度避雷器的温升情况

10 kV 配电网线路正常运行时,施加在避雷器两端的电压为 $10/\sqrt{3} = 5.77$ kV(相电压)。对不同老化程度的避雷器(样品 1-4)施加 5.77 kV 的电压,所得泄漏电流见表 2。

表 2 各避雷器样品 5.77 kV 下的泄漏电流值

Table 2 Leakage current value of each arrester sample at 5.77 kV

样品编号	全电流/ μ A	阻性电流/ μ A	备注
1	79	13	正常
2	122	21	阀片老化
3	257	52	阀片受潮
4	9 300	1 900	阀片受损

由避雷器在 5.77 kV 电压下的泄漏电流值可知,不同老化程度的避雷器在性能上有很大的差异,尤其经过 300 次雷电冲击的避雷器试品阀片受损严重,已无法承受正常的系统电压。受潮样品内部水分没有充分蒸发,因此呈现出较高的泄漏电流。保持电压不变,用红外测温仪测量各避雷器表面的温度,测试结果见图 2。

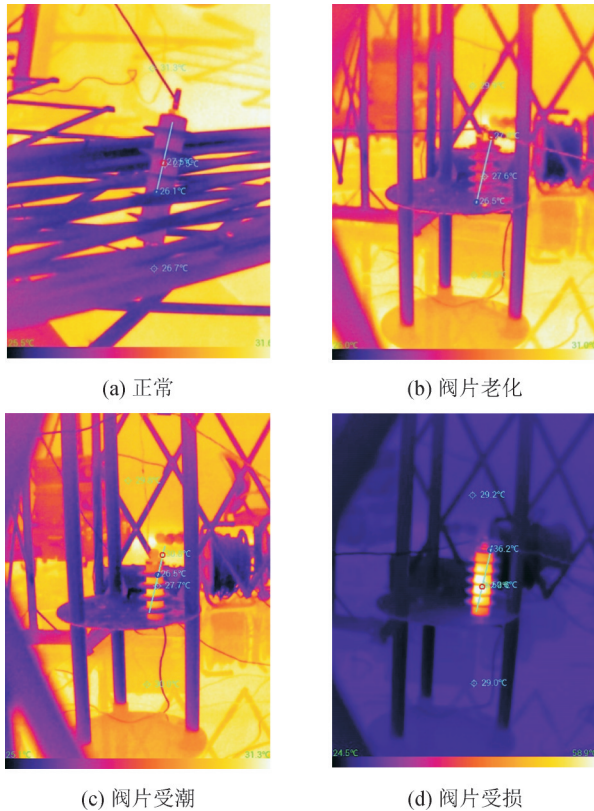


图 2 阀片不同程度老化避雷器温升对比图

Fig. 2 Comparison diagram of temperature rise of arrester with different aging of varistors

试验过程中选取的温度为避雷器表面温度的最高点,正常情况下避雷器温度分布较均匀,最高点一般为中部或中部偏上,但试验过程中个别样品的温度最高点为中部偏下位置,造成这种情况的原因是该样品中部偏下位置的阀片损坏严重,发热比其他阀片要严重。

观察各避雷器红外测温图可以看出,各个避雷器的发热程度会有较大区别,这是因为各避雷器经过了不同程度的老化,其各自伏安特性曲线有所不同,因而在相同电压下会呈现出不同大小的电流,从而导致各避雷器样品发热程度不同,阻性电流越大,发热情况越严重。因此,可以利用红外测温技术初步分析判断避雷器阀片的损坏及受潮情况。

图 2 中,雷电冲击老化后的避雷器发热尤其严重,这是因为经过 300 次雷电流冲击后避雷器阀片损坏严重,在避雷器承受工作电压时就会形成热崩溃,避雷器温度会持续增长且不会稳定下来,与此同时避雷器的泄漏电流也会不断增大。发生热崩溃的原因一方面是因为电流太大,发热情况严重,散热速度跟不上发热速度;另一方面因为避雷器阻性电流会随温度变化而变化,在避雷器阀片温度升高的同时,阻性电流会变大,导致避雷器阀片的进一步发热增加,形成正反馈,最终导致热崩溃。

2.2 不同阻性电流下避雷器的温升情况

试验不再考虑经多次雷电冲击的样品,因其阀片损坏过于严重,内部等效电阻水平已无法同实际情况中的避雷器样品相比较,发热特性已不具参考意义;而经水煮的样品在水煮过后几天时间内,内部水分逐渐蒸发,性能逐渐恢复,待其内部水分蒸发完毕后,其内部等效电阻已同新避雷器相接近;相较之下,现场取回的运行 10 年的避雷器样品的发热特性更具参考意义。试验用的新拆封样品(样品 1、5、6)以及现场老化样品(样品 2、7、8)在 5.77 kV 下的阻性电流见表 3。

表 3 试品在 5.77 kV 下阻性电流测试情况

Table 3 Resistance current test of test object at 5.77 kV

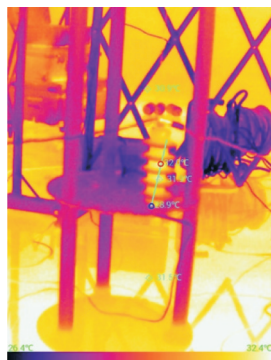
样品编号	全电流/ μ A	阻性电流/ μ A	备注
1	79	13	
5	68	11	新设备
6	87	16	
2	122	21	
7	120	21	运行 10 年
8	115	20	

逐步升高加在避雷器两端的电压,以模拟避雷器在不同泄漏电流下的发热特性。利用红外测温仪测取避雷器外表面的温度,测试结果见表 4,试验现场红外测温图见图 3-6。

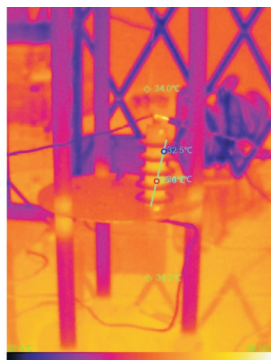
表4 避雷器在不同阻性电流下的红外测温结果(环境温度 27 °C)

Table 4 Infrared temperature measurement results of arrester under different resistive currents (ambient temperature 27 °C)

电压/kV	阻性电流/ μ A						温升/K					
	1号	5号	6号	2号	7号	8号	1号	5号	6号	2号	7号	8号
5.77	13	0.0	11	0.0	16	0.0	21	0.0	21	0.0	20	0.0
9.10	21	0.0	20	0.0	25	0.0	31	0.0	40	0.4	30	0.0
11.60	33	0.4	30	0.2	40	0.4	50	1.0	70	3.2	45	1.0
14.40	42	0.6	38	0.4	45	0.5	95	5.9	100	5.9	75	3.9
15.50	45	1.0	43	0.8	50	1.2	135	10.7	165	12.1	100	9.7
16.40	59	3.6	52	1.6	60	4.0	380	36.0	500	46.7	163	18.3
17.00	80	10.8	63	4.0	83	12.1					276	42.7
18.90	300	47.5										



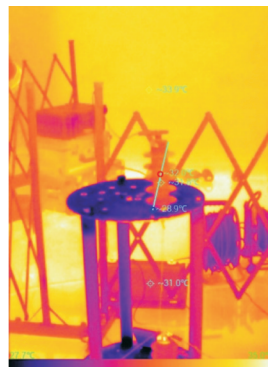
(a) 试验前



(b) 试验后

图3 阻性电流 50 μ A 下避雷器温升为 1 K

Fig. 3 The temperature rise of arrester is 1 K when the resistive current is 50 μ A



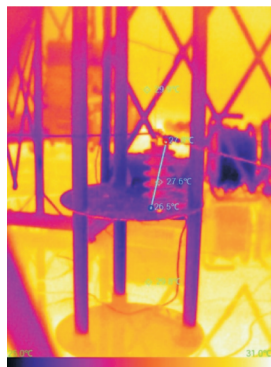
(a) 试验前



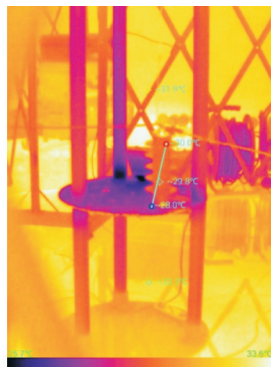
(b) 试验后

图5 阻性电流 100 μ A 下避雷器温升为 10.5 K

Fig. 5 The temperature rise of arrester is 10.5 K when the resistive current is 100 μ A



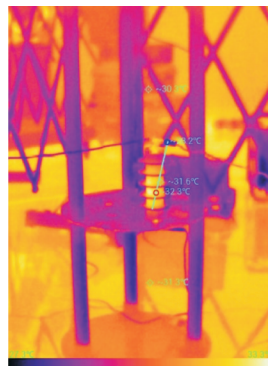
(a) 试验前



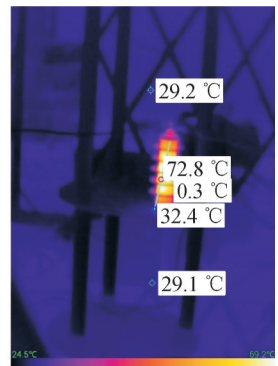
(b) 试验后

图4 阻性电流 70 μ A 下避雷器温升为 2.5 K

Fig. 4 The temperature rise of arrester is 2.5 K when the resistive current is 70 μ A



(a) 试验前



(b) 试验后

图6 阻性电流 230 μ A 下避雷器温升为 40 K

Fig. 6 The temperature rise of arrester is 40 K when the resistive current is 230 μ A

由试验现场红外测温图以及温升数据可知,避雷器承受电压越高,阻性电流会越大,温度上升会越快,最终呈现出来的温度也越高。

当避雷器阻性电流低于 50 μ A 时,避雷器本体温升较小,一般为 1 K 以下,此时需通过红外精确测温方能检测出避雷器发热现象;当避雷器阻性电流在 50~100 μ A 时,避雷器本体会出现明显发热,温升

达到数 K 至十余 K,此时通过红外检测,可明显发现避雷器过热缺陷;当避雷器阻性电流超过 100 μ A 甚至数百 μ A 时,此时,避雷器本体温升较高,趋近热崩溃,由于阀片组为负温度系数,发热引起等效电阻下降,又促使发热加剧,形成恶性循环,打破热平衡后,避雷器加速损坏。

分析发现,避雷器与室温或其他样品直接的温

差与电流呈现出较好的相关性,利用多项式模型对阻性电流和温差进行拟合,其中目标函数满足^[20]

$$T = a_1 I^n + a_2 I^{n-1} + a_3 I^{n-2} + \dots + a_n I^1 + a_{n+1} \quad (1)$$

式(1)中: T 为拟合后的温差; a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_n 、 a_{n+1} 为多项式拟合系数; I 为阻性电流值。避雷器温升与阻性电流关系拟合曲线见图7。

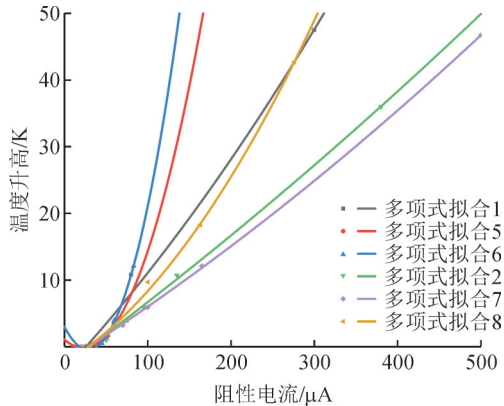


图7 避雷器温升与阻性电流关系拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of relationship between temperature rise and resistive current of arrester

校正决定系数(adjust R-square)越接近1,越说明模型的选择与拟合越成功。各避雷器样品1-3阶的校正决定系数见表5。由表5可以看到,2阶拟合效果最好,电流越大,发热越严重,温差越大,且增长速度会更快。

表5 校正决定系数

Table 5 Adjust R-square

样品编号	系数		
	1阶	2阶	3阶
1	0.974 28	0.983 75	0.972 38
5	0.973 64	0.991 45	0.984 03
6	0.963 12	0.992 84	0.990 25
2	0.966 74	0.993 60	0.992 64
7	0.834 98	0.966 33	0.912 19
8	0.978 95	0.982 82	0.976 63

避雷器试品温差与阻性电流的关系拟合后,曲线如上各图。通过拟合曲线,计算各样品50、70、100 μA 的温差值,结果见表6。

表6 拟合曲线计算温差

Table 6 Calculation of temperature difference by fitting curve

样品编号	温差/K		
	50 μA	70 μA	100 μA
2	2.621 88	6.125 07	18.620 75
5	2.007 96	4.768 83	9.310 20
7	0.905 51	3.127 28	7.691 69

从表6可以看到,避雷器样品阻性电流为50 μA

时,温差为1~2 K;阻性电流为70 μA 时,温差为3~6 K左右;阻性电流为100 μA 时,温差在7 K以上。

3 结论

通过对不同老化程度的避雷器样品施加工频电压,模拟避雷器在不同电流下的温升特性,观察分析试验现象和结果,可以得出以下几个结论:

1)不同老化程度的避雷器在工作电压下发热情况有较明显差异,阀片受潮及阀片老化的避雷器表面温度会略高于正常避雷器,而阀片受损的避雷器发热比较严重,阀片损伤严重的会形成热崩溃。利用红外测试仪测试避雷器表面温度能够初步分辨受潮和阀片受损等有缺陷避雷器。

2)在阻性电流较小(低于50 μA)时,避雷器本体温升较小,一般为1 K左右,此时需通过红外精确测温方能检测出避雷器发热现象,应结合停电检修和带电作业方式,更换避雷器。

3)当避雷器阻性电流在50~100 μA 时,此时,通过红外检测可发现避雷器温升为数K至十余K,此时应立即安排不停电作业或停电计划,及时更换避雷器。

4)当避雷器阻性电流超过100 μA 时,避雷器本体温升较高,发热明显,通常在10 K以上,避雷器趋近热崩溃。当阻性电流进一步增大,达到数百 μA 时,由于阀片组为负温度系数,发热引起等效电阻下降,又促使发热加剧,形成恶性循环,打破热平衡后,避雷器加速损坏。

5)通过对避雷器阻性电流与温差的关系曲线的拟合,并对校正决定系数进行对比,发现阻性电流与温差关系2阶拟合效果最好。避雷器的阻性电流与温升呈二次函数关系,避雷器老化越严重,其阻性电流越大,发热越严重,避雷器温升越高。

6)通过拟合曲线进一步确认了,避雷器样品阻性电流为50 μA 时,温差为1~2 K;阻性电流为70 μA 时,温差为3~6 K左右;阻性电流为100 μA 时,温差在7 K以上。这可以为10 kV无间隙氧化锌避雷器的带电检测提供参考。

参考文献:

[1] 巢亚锋,王峰,李豫湘,等.架空输电线路避雷器保护失效原因分析及建议[J]. 电瓷避雷器,2022(3):81-88.
CHAO Yafeng, WANG Feng, LI Yuxiang, et al. Analysis and suggestions on MOA protection failure of overhead transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):81-88.

[2] 豆敏娜,田影,王毅钊,等.基于积分面积的直流配网单极接地故障选线方法[J]. 电网与清洁能源,2025,41(1):10-16.
DOU Minna, TIAN Ying, WANG Yizhao, et al. A single - pole

- ground fault selection method for DC distribution networks based on integral area[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(1): 10-16.
- [3] 徐 鹏. 220 kV 氧化锌避雷器泄漏电流异常现象分析及对策[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 36-40.
XU Peng. Analysis and countermeasures of the abnormal leakage current of 220 kV zinc oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 36-40.
- [4] 沈海滨, 雷 挺, 贺子鸣, 等. 再议 10 kV 线路避雷器雷电耐受技术参数的选用[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3729-3736.
SHEN Haibin, LEI Ting, HE Ziming, et al. Selection of lightning tolerance technical parameters for 10 kV line arresters[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3729-3736.
- [5] 孙林涛, 艾云飞, 张翻喆, 等. 一起金属氧化物避雷器异常状态诊断与分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 43-46.
SUN Lintao, AI Yunfei, ZHANG Xuanzhe, et al. Diagnosis and analysis of a MOA abnormality[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 43-46.
- [6] 史志强, 邓 维, 罗日成, 等. 500 kV 氧化锌避雷器阀片老化缺陷试验分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 231-236.
SHI Zhiqiang, DENG Wei, LUO Richeng, et al. Experimental study on valve strip aging of 500 kV zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 231-236.
- [7] 邢 超, 赵 军, 刘 涛, 等. 基于容性设备接地电流的金属氧化物避雷器阻性电流现场检测方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 113-117.
XING Chao, ZHAO Jun, LIU Tao, et al. On-site detection method for resistive current of metal-oxide surge arrester based on ground current of capacitive equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 113-117.
- [8] 李 谦, 彭 刚, 董玉玺, 等. 无间隙金属氧化物避雷器带电测试存在的问题及其解决方案[J]. 南方电网技术, 2018, 12(6): 23-29.
LI Qian, PENG Gang, DONG Yuxi, et al. Problem and its solution of live-line measurement of non-gap metal-oxide surge arresters[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(6): 23-29.
- [9] 靳海军, 靳文星. 红外测温诊断技术在避雷器内部过热故障诊断中的应用[J]. 能源与节能, 2019(10): 175-176.
JIN Haijun, JIN Wenxing. Application of infrared temperature measurement diagnosis technology in overheat fault diagnosis of lightning arrester[J]. Energy and Conservation, 2019(10): 175-176.
- [10] 杨海龙, 刘 航, 魏 钢, 等. 基于红外测温技术的金属氧化物避雷器故障诊断[J]. 电工技术, 2017(10): 94-95.
YANG Hailong, LIU Hang, WEI Gang, et al. Fault diagnosis of metal zinc oxide arrester based on infrared temperature measurement[J]. Electric Engineering, 2017(10): 94-95.
- [11] 陈 欣, 韦瑞峰, 张 诣, 等. 高频脉冲电流法在氧化锌避雷器带电局放检测中的运用[J]. 云南电力技术, 2020, 48(2): 58-61.
CHEN Xin, WEI Ruifeng, ZHANG Yi, et al. Application of high frequency pulse current method in live partial discharge detection of Zinc oxide arrester[J]. Yunnan Electric Power, 2020, 48(2): 58-61.
- [12] 罗容波, 李国伟, 李 慧. 局放检测技术在避雷器状态诊断中的应用[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 84-88.
LUO Rongbo, LI Guowei, LI Hui. Application of partial discharge detection technology in surge arrester state diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 84-88.
- [13] 桑建平. 避雷器热等价性及复合外套避雷器稳态热特性初探[J]. 电瓷避雷器, 2013(2): 53-58.
SANG Jianping. Study on thermal equivalency of arrester and the steady-state thermal behaviors of polymeric housing arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(2): 53-58.
- [14] 彭 珑, 李 雨, 徐党国, 等. 避雷器电阻片温度分布特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 84-87.
PENG Long, LI Yu, XU Dangguo, et al. Research on temperature distribution characteristics of arrester varistors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(3): 84-87, 95.
- [15] 张金岗. 红外测温技术在氧化锌避雷器带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 200-204.
ZHANG Jingang. Application of infrared temperature measurement technology to live detection of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 200-204.
- [16] 刘晓飞, 赵冀宁, 李建鹏. 35 kV 氧化锌避雷器异常诊断及原因分析[J]. 山西电力, 2022(4): 28-30.
LIU Xiaofei, ZHAO Jining, LI Jianpeng. Abnormal diagnosis and cause analysis of 35 kV zinc oxide arrester[J]. Shanxi Electric Power, 2022(4): 28-30.
- [17] 胡锡幸, 鲍巧敏, 华盛继. 基于温度补偿的金属氧化物避雷器带电检测技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 96-99.
HU Xixing, BAO Qiaomin, HUA Shengji. Research on moa's on-line detection technology based on temperature compensation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 96-99.
- [18] 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664—2008[S]. 2008. Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment: DL/T 664—2008[S]. 2008.
- [19] 交流无间隙金属氧化物避雷器: GB 11032—2020[S]. 2021. Metal-oxide surge arresters without gaps for A.C. systems: GB 11032—2020[S]. 2021.
- [20] 李庆扬. 数值计算原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
LI Qingyang. Principles of numerical computation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- 黄伟翔(1993—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事配网防雷、智能配用电技术研究(通信作者)(E-mail: huang_wx.sy@gx.csg.cn)。