

红外成像技术在氧化锌避雷器热故障中的研究与分析

孟祥海

(国网山西省电力公司晋城供电公司, 山西 晋城 048000)

摘要: 氧化锌避雷器是变电站里一次设备免受过电压冲击的重要设备, 通过吸收各类雷击过电压、工频暂态过电压和操作过电压来保护站内变电设备。因此, 避雷器带电检测工作至关重要。从红外成像技术诊断热故障的原理入手, 通过分析诊断35 kV氧化锌避雷器的因内部受潮引起发热的典型案例, 详细介绍了红外成像在避雷器热故障诊断中的重要性和有效性, 并提出避雷器受潮故障的红外诊断技巧与预防措施。

关键词: 氧化锌避雷器; 热故障; 红外成像; 过电压

Research and analysis of infrared imaging technology in thermal fault of zinc oxide arrester

MENG Xianghai

(Jincheng Power Supply Company, Jincheng 048000, China)

Abstract: Zinc oxide arrester is the important equipment that can protect the substation equipment to avoid suffering overvoltage shock. It can absorb all kinds of lightning over voltages, power frequency temporary overvoltage and switching overvoltage. Accordingly, live detection of zinc oxide arrester is very important. Starting with the principle of infrared imaging technology for diagnosing thermal faults, a case of diagnosing of a 35 kV zinc oxide arrester by means of the infrared imaging is analyzed, and the importance and effectiveness of the infrared imaging technology in finding the damp defect in zinc oxide arrester are introduced. The infrared diagnostic skills and precautionary measures for surge arrester fault are put forward.

Key word: zinc oxide arrester; thermal fault; infrared imaging; over-voltage

0 引言

电力系统中将避雷器并联到被保护设备附近来保护电力设备^[1]。当氧化锌避雷器受到过电压冲击时, 其电阻快速降低, 释放因过电压带来的能量, 有效保护电力设备^[2]。氧化锌避雷器无放电间隙, 具有良好的非线性特性, 使其具有优良的泄流和开断功能^[3]。

运行中的氧化锌避雷器具有多种检测手段, 如总泄漏电流法、3次谐波法、波形分析法和容性电流补偿法等。本文主要介绍泄漏电流带电测试与红外成像技术相结合的热故障诊断研究^[4]。运行中的设备与热现象密不可分, 电气设备因接触不良、绝缘水平劣化造成的热故障均可用红外成像技术进行检测。红外成像是一种新型的红外测温

技术,可远距离地将被测目标表面的热信息瞬间可视化,也可快速定位避雷器因绝缘、接触问题造成的热故障,大大提高了避雷器热故障检测的准确性及安全性^[5]。

1 红外成像技术诊断避雷器热故障的理论分析

1.1 氧化锌避雷器等效电路

目前,电网中广泛应用通流容量优越、抗老化能力突出及非线性特性良好的氧化锌避雷器。其电阻阀片可等效为一个混联电路,由电容部分与电阻部分组成,图1a、b分别为其等效电路图和相量关系图。其中, I_R 为阻性电流; I_X 为全电流; I_C 为容性电流^[6]。

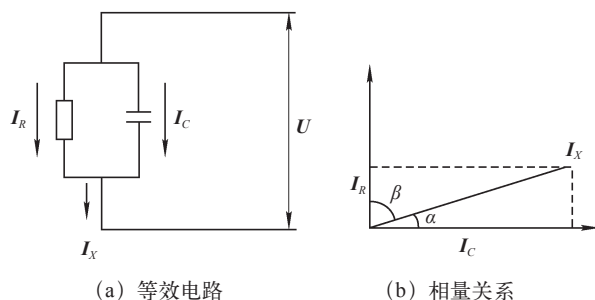


图1 氧化锌避雷器等效电路图和相量关系图

Fig.1 Equivalent circuit diagram and vector relation diagram of zinc oxide arrester

氧化锌避雷器的全电流由阻性电流及容性电流组成。正常运行时,阻性电流仅为全电流的10%~20%,总泄漏电流主要为容性电流。

对氧化锌避雷器的 I_R 、 I_X 进行分析时,要充分考虑周围环境的影响,例如瓷套外表面的受潮污秽、温湿度、相间干扰和电磁场等。而红外成像技术有不受电场、相间干扰的特点^[7]。正常运行时,氧化锌避雷器要消耗一定的功率,其外表发热是整体的,发热量不大,本体温升较小且几何尺寸分布均匀。

1.2 氧化锌避雷器受潮时的热像特征

氧化锌避雷器受潮后,其绝缘支撑件、阀片侧面、瓷套内和外表面绝缘水平会降低,泄漏电流增大,阻性电流更是成倍增长,造成氧化锌避

雷器有明显的温升,甚至爆炸。据统计,氧化锌避雷器故障中由受潮引起的约占70%^[8]。

根据避雷器内部受潮程度不同,红外成像的热图像也不同。氧化锌避雷器内部轻度受潮时,其阀片电容变大,造成该元件阻性电流变大后发热,红外图谱表现为局部过热;当氧化锌避雷器严重受潮后, I_R 慢慢接近甚至大于 I_C ,不仅受潮元件温度升高,正常元件也开始发热、损耗增大,甚至超过受潮部位,红外图谱变现为整体过热,受潮部位处于热像图的暗淡区^[9]。

1.3 氧化锌避雷器的热破坏现象

所谓热破坏,就是避雷器遭受过电压冲击后,其瞬时的发热大于自身的散热能力,或者受潮后阀片 I_R 变大引起绝缘劣化。避雷器热平衡图如图2所示。

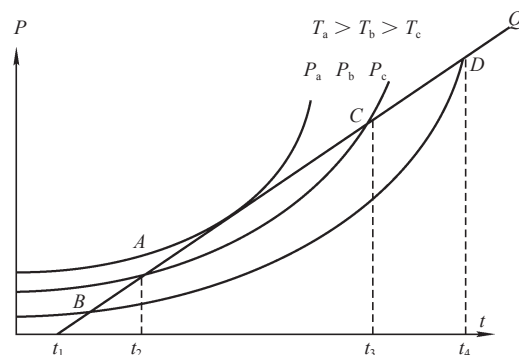


图2 避雷器热平衡图

Fig.2 Thermal balance diagram of surge arrester

阀片温度升高后,其功率损耗增加。温度为 T_c 时,功率曲线 P 与散热曲线 Q 包围的面积较大,说明热稳定性较好。随着温度的增加,包围的面积逐渐减小直至为零,说明逐渐出现热破坏现象。因此,避雷器受潮产生温升后,其自身的热平衡现象会遭到破坏。

2 应用案例研究与分析

2.1 避雷器缺陷的发现过程

2015年12月24日9:00电气试验人员在对220 kV丹河变电站进行例行巡视过程中,发现1#主变压器35 kV侧避雷器在线监测数据异常,A相全电流数据严重偏大,已达到1 550 μA ,B、C相全电流

数据正常,分别为150 μA 、145 μA ,严重影响避雷器的正常工作,随时有爆炸的危险,极易造成1[#]主变压器35 kV侧接地、短路等故障。1[#]主变压器35 kV侧避雷器铭牌如表1所示。

表1 1[#]主变压器35 kV侧避雷器铭牌

Tab.1 1[#]Name plate of 35 kV side arrester for main transformer

名称	金属氧化物避雷器	型号	HY5WZ-51/34
持续运行电压	40.8 kV	工频参考电压	52 kV
持续运行电流	0.000 3 kA	工频放电电压	34 kV
出厂日期	2012.09.01	投运日期	2012.09.24
出厂编号	A:1559	生产厂家	西安安特高压 电器有限公司
	B:1560		
	C:1561		

2015年12月24日10:00,电气试验人员到达现场,运用避雷器带电测试仪对其进行带电测试,数据如表2所示,从中可以看出,A相避雷器全电流、阻性电流与之前的数据相比明显增大,阻性电流增加8.56倍。

表2 旧避雷器带电测试数据

Tab.2 Live test data of old arresters

(单位: μA)

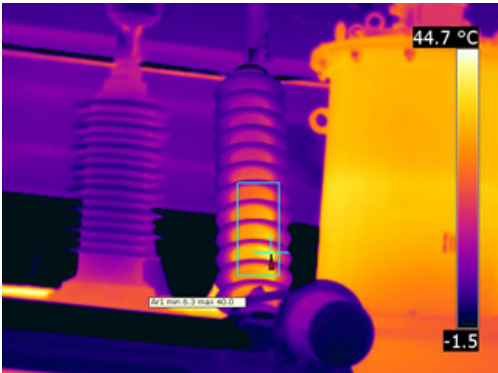
设备名称	相别	2015年4月27日		2015年12月24日	
		全电流	阻性电流	全电流	阻性电流
1 [#] 主变压器35 kV侧避雷器	A	171	25	1 678	239
	B	168	24	158	23
	C	173	25	164	24

标准: I_R 初值差达+50%时,避雷器检测周期应按实际情况适当缩短;阻性电流增加一倍时,必须停电检查

对避雷器进行红外成像测温,发现A相避雷器有明显发热现象,热点温度为40.1 $^{\circ}\text{C}$,B、C相温度分别为3.1 $^{\circ}\text{C}$ 、3.0 $^{\circ}\text{C}$,A、B相温差为37 K,远大于1 K,图3为A相及三相整体避雷器的红外图,图4为其对应的可见光照片。初步判断A相避雷器内部存在严重缺陷,判定为危急缺陷,立即申请停电,更换1[#]主变压器35 kV侧避雷器。

2.2 避雷器缺陷的处理

2015年12月24日14:00,工作人员对更换后的避雷器分别做了绝缘电阻试验、直流泄漏电流试验,试验数据如表3所示,试验结果符合相关标准规定。



(a) A相单体红外图谱



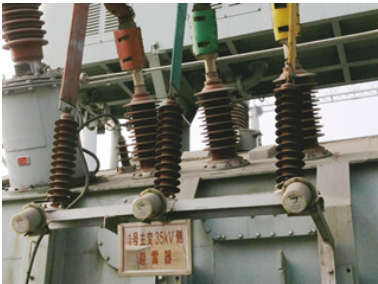
(b) 三相整体红外图谱

图3 检修前避雷器红外图谱

Fig.3 Infrared spectrum of surge arrester before maintenance



(a) A相单体可见光照片



(b) 三相整体可见光照片

图4 检修前避雷器可见光照片

Fig.4 Visible light photograph of surge arrester before maintenance

表3 新避雷器试验数据

Tab.3 New arrester test data

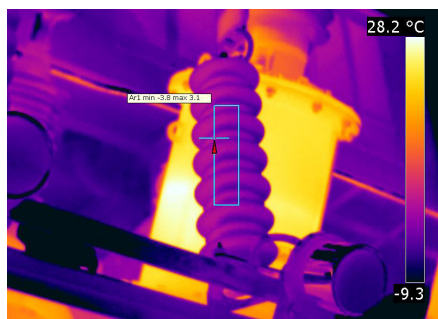
设备名称	相别	绝缘电阻/MΩ	底座绝缘电阻/MΩ	直流1 mA的电压 U_{1mA} /kV	75% U_{1mA} 泄漏电流/ μ A
1#主变压器35 kV侧避雷器	A	335 000	24 000	77.5	6
	B	330 000	23 000	77.4	9
	C	325 000	24 000	77.6	7

标准：绝缘电阻不低于1 000 MΩ； U_{1mA} 实测值与初始值比较，变化不大于±5%；75% U_{1mA} 下的泄漏电流不大于50 μ A

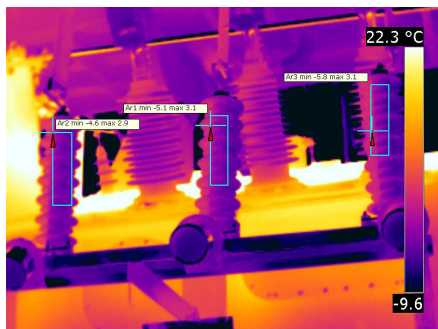
随后，1#主变压器停电完毕，工作人员对有故障的避雷器进行整体更换，检修过程如图5所示。2015年12月25日7:00，1#主变压器恢复送电。

2.3 避雷器缺陷的处理效果

2015年12月26日9:00，1#主变压器已带负荷运行26 h，电气试验人员对35 kV侧避雷器再次进行红外成像测温，A、B、C三相温度分别为3.1 $^{\circ}$ C、3.1 $^{\circ}$ C和2.9 $^{\circ}$ C，三相温差小于1 K，红外成像测温正常。分别对A相单体、三相整体避雷器拍摄了红外图谱和对应的可见光照片，如图5、图6所示。



(a) A相单体红外图谱



(b) 三相整体红外图谱

图5 检修后避雷器红外图谱

Fig.5 Infrared spectrum of surge arrester after maintenance



(a) A相单体可见光照片



(b) 三相整体可见光照片

图6 检修后避雷器可见光照片

Fig.6 Visible light photo graph of surge arrester after maintenance

避雷器在线监测数据正常，A、B、C三相全电流分别为151 μ A、155 μ A和149 μ A。电气试验人员对更换后的避雷器在运行状态下进行直流泄漏试验， I_R 、 I_X 数据正常，如表4所示。

表4 新避雷器带电测试数据

Tab.4 Live test data of new arresters

(单位： μ A)

设备名称	相别	2015年12月26日	
		全电流/ μ A	阻性电流/ μ A
1#主变压器35 kV侧避雷器	A	166	24
	B	169	26
	C	171	25

标准：测量运行电压下的全电流、阻性电流，测量值与初始值相比，不应有明显变化，阻性电流初值差达到+50%时，适当缩短监测周期；阻性电流增加一倍时，必须停电检查

2.4 避雷器缺陷的诊断分析

2015年12月25日8:00，电气试验人员对旧避雷器做了绝缘电阻和直流泄漏电流试验，试验数据如表5所示。从表5中可以看出，A相避雷器绝缘电阻和直流1 mA时的电压 U_{1mA} 严重降低，75% U_{1mA} 下的泄漏电流远远大于50 μ A。

表5 旧避雷器试验数据
Tab.5 Test data of old arresters

设备名称	相别	绝缘电阻/ MΩ	底座绝缘电阻/ MΩ	直流1 mA时的电压 U_{1mA} /kV	75% U_{1mA} 下 泄漏电流/ μ A
1#主变压器35 kV侧避雷器	A	66	25 000	15.2	360
	B	320 000	23 000	77.7	10
	C	310 000	23 000	77.6	6

标准：绝缘电阻不低于1 000 MΩ； U_{1mA} 实测值与初始值比较，变化不大于±5%；75% U_{1mA} 下的泄漏电流不大于50 μ A。

通过带电测试、在线监测、红外成像测温 and 停电试验等多种试验手段，可以看到1#主变压器35 kV侧A相旧避雷器全电流明显增大，已达到B、C相全电流的10倍，绝缘电阻和直流1 mA时的电压 U_{1mA} 严重降低，75% U_{1mA} 下的泄漏电流远远大于50 μ A，红外图谱中发热明显，表现为整体严重发热，热点温度达到40.1 $^{\circ}$ C，B、C相温度分别为3.1 $^{\circ}$ C和3.0 $^{\circ}$ C，A、B相温差为37 K，远大于1 K。初步分析1#主变压器35 kV侧A相避雷器内部阀片严重受潮或老化^[10]。

2015年12月25日9:00，电气试验人员对A相避雷器进行了解体检査，发现内部受潮严重，氧化锌和内壁有清晰的水痕，弹簧锈蚀严重，如图7所示，最终确定1#主变压器35 kV侧A相避雷器故障为内部严重受潮所致。受潮原因是避雷器顶部密封不严，长期运行过程中潮气大量进入避雷器本体。

3 避雷器受潮故障红外诊断技巧与预防措施

3.1 避雷器受潮故障红外成像诊断技巧

经过多年的经验积累，红外成像诊断技术不断提高，总结出避雷器受潮红外诊断技巧主要有以下几方面。

1) 工作人员对变电站设备巡视时，要重点检查避雷器泄漏电流的指示、外观是否正常以及有无局部放电声音。

2) 避雷器受潮故障属于电压致热型，相间温



(a) 氧化锌、弹簧受潮锈蚀照片



(b) 避雷器内壁水痕照片

图7 避雷器内部受潮照片

Fig.7 Moisture photographs inside arresters

差较小，红外成像技术检测时发热特征不明显，因此需要认真检测，同时选取合适的色标温差，降低检测和分析难度。

按规程要求开展避雷器泄漏电流带电测试和红外测温，停电试验与带电测试相结合，多渠道、多手段对避雷器进行在线检测。积极学习同类设备的红外图谱，便于对故障进行分析与判断。

对试验数据进行横向和纵向对比，同时要排除周围环境等的干扰，给出最准确的检测结果。

积极完善各类设备的红外图谱库，对后续解决类似热故障提供充分的参考资料，且具有重要的借鉴作用。

3.2 避雷器受潮故障预防措施

预防避雷器因受潮而产生的热故障有如下三方面措施。

1) 严格把控安装工艺，避雷器顶部与铝排连接处螺栓紧固到位，避免潮气趁虚而入。

2) 避雷器检修试验结束后，在避雷器顶部涂上密封胶，避免因检修时造成顶部缝隙引起受潮

发热现象。

3) 建立避雷器温度和红外图谱数据库, 认真比对和分析数据变化趋势, 对疑似缺陷应缩短检测周期。

4 结束语

氧化锌避雷器是一种能吸收过电压能量、限制过电压幅值的保护设备, 对保护电力设备起到至关重要的作用, 可有效避免电力设备因各种过电压的冲击而损坏, 进而引发大面积停电事故。因此, 避雷器的带电测试尤为重要。本文提出的红外成像是一种新型的红外测温技术, 可快速定位避雷器因绝缘、接触问题造成的热故障, 大大提高了避雷器热故障检测的准确性及安全性, 及时将故障消灭在萌芽状态。

针对避雷器常见的受潮发热故障, 结合实际工作中遇到的案例, 分析了红外成像在避雷器热故障中的适用性。此外, 本文提出几点诊断技巧与预防措施, 对电气试验人员及时掌握氧化锌避雷器的实际运行状况具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 刘凡, 曾宏, 许安, 等. 氧化锌避雷器阻性电流三相同时测量技术[J]. 中国电机工程学报, 2009(29): 73-78.
LIU Fan, ZENG Hong, XU An, et al. Three phase simultaneous measurement technique for resistive current of zinc oxide arrester[J]. China Journal of Electrical Engineering, 2009(29): 73-78
- [2] 高峰, 郭洁, 徐欣, 等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2629-2633.
GAO Feng, GUO Jie, XU Xin, et al. Relationship between damp and resistive current of AC MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 35(11): 2629-2633.
- [3] 张国光. 电气设备带电检测技术及故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 陈润颖, 毛学锋. 变电设备故障诊断及分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

- [5] 彭江, 程序, 刘明, 等. 电网设备带电检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [6] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[S].
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 92-95.
CHEN Baoyi. Application of infrared diagnostic technology in high voltage circuit breaker internal heat fault[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 92-95.
- [10] 陈坤汉, 李顺尧. 一起220 kV线路避雷器泄漏电流超标的原因分析[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 111-114.
CHEN Hankun, LI Shun Yao. Analysis of over-standard leakage current of lightning arresters on a 220 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 111-114.

作者简介



孟祥海

孟祥海, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力设备高压试验工作。

(收稿日期: 2018-09-11) **EA**