

考虑环境相对湿度和污秽度的零值绝缘子红外检测方法

陶玉宁, 方春华

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:零值绝缘子红外检测方法因精准、高效、安全等优点得以广泛应用,但其测量结果易受环境相对湿度和污秽度影响。为此,文中首先建立污秽绝缘子串电-热-流场耦合模型,分析零值绝缘子位置、环境相对湿度和污秽度对绝缘子串温度分布的影响;然后提出一种基于相邻温升差的零值绝缘子红外检测方法,并进行试验验证。结果表明:零值的存在会使绝缘子串连续性马鞍型温度分布遭到破坏;绝缘子离回转中心轴越远,温升越小,反之越大,最大温升出现在铁脚与下表面连接处;随着环境相对湿度和污秽度的增加,绝缘子串的整体温升逐渐增加,零值绝缘子与正常绝缘子温升差逐渐变大。试验结果证明了所提方法用于现场零值绝缘子检测的可行性和有效性。

关键词:零值绝缘子;相对湿度;温度分布;污秽度;多物理场;红外检测

中图分类号:TM755

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)01-0141-08

0 引言

瓷质绝缘子因其良好的绝缘和机械性能、相对较低的成本等优势,被广泛用于电网建设运行^[1-2]。但在实际运行中,瓷质绝缘子多处于室外环境,长期经受机电负荷、大气污染、冷热变化等作用,绝缘性能和机械性能会下降^[3-4]。绝缘子的劣化与其内部结构有关,瓷件、水泥胶合剂、钢帽和铁脚所用材料不同,导热和膨胀系数也不同,且各部分连接处难免存在空气隙。绝缘子在外界因素的长期无规律作用下,内部微孔逐渐渗透,扩展成小裂纹直至开裂;在强电场的作用下,劣化绝缘子内部极易产生电击穿,使其成为零值绝缘子^[5-6]。绝缘子串发生闪络后,流过绝缘子内的短路电流将会产生较大热量,使绝缘子的瓷件炸裂、钢帽裂开,进而导致绝缘子断串或输电导线落地等严重事故^[7-8]。为避免零值绝缘子引起的此类事故发生,在巡检工作中及时有效地检测和判断绝缘子状态,并有计划地对其进行处理显得尤为重要。

与传统检测方法相比,红外检测具有远距离、非接触、可带电检测等优点^[9-13]。文献[14]通过红外热像仪采集图像,对图像进行去噪分割等预处理,并采用模式识别的方式对零值绝缘子进行检测,但该方法受环境因素影响,准确率较低。文献[15]提出基于概率神经网络的红外热像零值绝缘子检测方法,但在相对湿度较大时误判率较高。文献[16]利用基于卷积神经网络的劣化绝缘子识别模型检测零值绝缘子,但适合该方法的环境条件尚

不清晰。目前,各种红外零值绝缘子检测方法均有其局限性。为了将红外技术更好地用于现场零值绝缘子检测,提出适用范围精确且快捷简便的检测方法尤为重要。

文中建立污秽绝缘子串电-热-流场耦合模型,通过多物理场耦合分析不同零值绝缘子位置、环境相对湿度和污秽度时的绝缘子串温度分布差异和规律,提出一种基于相邻温升差的零值绝缘子红外检测方法,并通过红外检测试验验证所提方法。该方法可为电力部门利用红外技术进行绝缘子巡检提供科学依据,对减少工作量、降低事故概率具有重要意义。

1 含零值绝缘子串的仿真模型及参数

为模拟输电线路绝缘子串的真实工况,文中建立绝缘子串电场、热场和流场耦合模型进行耦合分析。仿真对象为110 kV线路所用标准瓷质悬式绝缘子,由钢帽、铁脚、具有较强绝缘性能的瓷件和粘合连接各组成部分的水泥胶合剂组成,其二维轴对称模型简化后如图1所示,相关材料属性如表1所示。

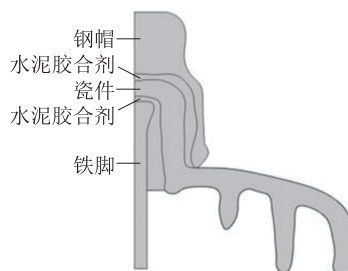


图1 绝缘子二维轴对称截面

Fig.1 2-D axisymmetric section of insulators

表 1 各部分材料属性
Table 1 Material properties of each part

介质材料	相对介电常数	电导率/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	恒压热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
瓷件	4.7	2×10^{-11}	35	730	3 965
水泥胶合剂	8	1.7×10^{-9}	5	800	3 600
钢帽、铁脚	10^{10}	1.2×10^{11}	80.2	449	7 860
空气	1	10^{-8}			

零值绝缘子建模时,将钢帽及铁脚间的瓷件与胶合剂设为金属导体材料,以模拟贯穿性缺陷,其他部分与正常绝缘子相同。仿真基于 COMSOL 软件,在无限远开区域电场仿真边界条件设置中采用人工截断边界法,截断区域选用圆柱形,截断半径为 2 m,高度为 20 m,将截断边界设为零电位。在设置边界条件时,将空气设置为压缩性流体,外壁设置为无滑移壁,模型的初始温度值和环境温度值均设定为 20 ℃。当仿真计算时,高压端绝缘子铁脚处施加 63.5 kV 电压,低压端绝缘子钢帽处施加 0 kV 电压,进行 50 Hz 的频域分析。

文中将各污秽状态下绝缘子表面污秽层的相对介电常数设置为 81^[17]。根据文献[18],污秽层饱和湿润时吸附的 10~20 ml 水会均匀覆盖在绝缘子表面,因此将污秽层厚度设置为 0.1 mm,污秽层在饱和湿润时的电导率 γ_s 为^[19]:

$$\gamma_s = 230\rho_{\text{ESDD}}\rho_{\text{NSDD}}^{0.575} \quad (1)$$

式中: ρ_{ESDD} 为盐密; ρ_{NSDD} 为灰密,文中不同污秽度下的灰密值均设置为 1 mg/cm²。实验采用人工污秽法,污秽可溶盐采用 NaCl。对于设置不同污秽度和湿度的污秽层电导率,需要考虑污秽层中盐分在不同环境湿度下的溶解率和溶解量。当污秽层未饱和湿润时,其电导率可通过文献[20]获得。相关污秽等级材料属性如表 2 所示。

表 2 污秽参数
Table 2 Contamination parameters

盐密/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	污秽量/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$			
	湿度 70%	湿度 75%	湿度 80%	湿度 100%
0.05	0.16	0.64	1.28	11.50
0.10	0.32	1.27	2.56	23.00
0.20	0.64	2.56	5.11	46.00

2 仿真结果及分析

在进行污秽含零值绝缘子串的电-热-流多物理场耦合仿真时,将电场中与电压和电流密度分布直接相关的电磁能量作为对流散热计算的热源,获得

污秽含零值绝缘子串的热特征。

2.1 零值绝缘子位置对热场的影响

对污秽绝缘子串中的绝缘子片位置进行编号,由高压端至接地端依次编为 1~7 号。选择典型零值绝缘子 2、4、7 号位置,即高压、中间和低压接地位置,分别进行温度分布仿真计算。

当污秽含 NaCl 且盐密为 0.05 mg/cm²,环境相对湿度为 80%时,绝缘子串的温度分布如图 2 所示。零值的存在会改变绝缘子串原有无零值时连续性马鞍型的温度分布。

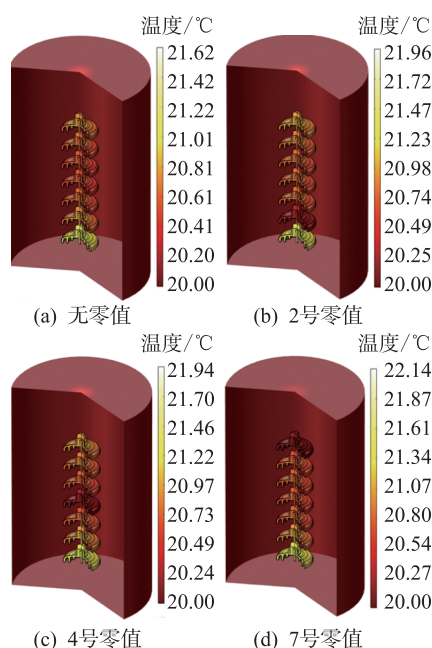


图 2 湿污时绝缘子串的温度分布

Fig.2 Temperature distribution of insulator string during wet contamination

绝缘子串钢帽处、铁脚与下表面连接处的温升如图 3 所示。由图 3(b)可知,2 号为零值绝缘子时与相邻 1 号和 3 号绝缘子的温升差分别为 1.68 ℃ 和 0.72 ℃,而 2 号为正常绝缘子时与相邻绝缘子的温升差分别为 0.6 ℃ 和 0.19 ℃;4 号为零值绝缘子时与相邻 3 号和 5 号绝缘子的温升差分别为 0.87 ℃ 和 0.74 ℃,而 4 号为正常绝缘子时与相邻绝缘子的温升差分别为 0.09 ℃ 和 0 ℃;7 号为零值绝缘子时与相邻 6 号绝缘子的温升差为 0.96 ℃,而 7 号为正常绝缘子时与相邻绝缘子的温升差为 0.15 ℃。零值绝缘子与相邻位置绝缘子温升差最大的是零值处于高压端,其次是低压接地端,最小的是处于中间位置。因此,相同环境条件下高压端零值相对较易检测,其次是低压接地端,最后是中间位置。

根据牛顿冷却定律,相邻绝缘子产生的热量必然向几乎无温升的零值绝缘子传递,因此在热稳定时零值绝缘子有较小温升,温升大小与所在位置有

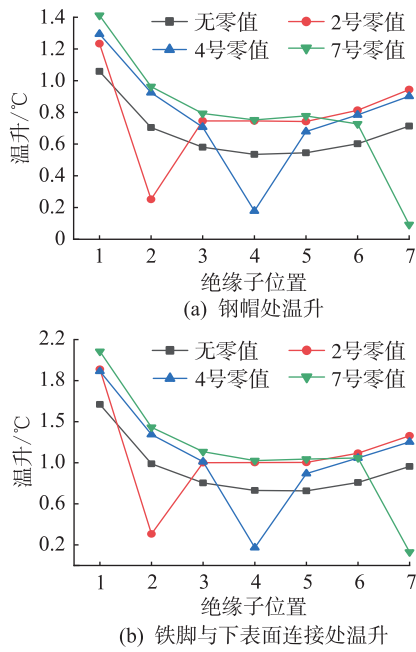


图3 湿污时绝缘子串钢帽和铁脚的温升

Fig.3 Temperature rise of steel cap and iron foot of insulator strings during wet contamination

关。图3中,零值绝缘子在2号位置时,钢帽以及铁脚与下表面连接处温升分别为0.24℃和0.28℃;在4号位置时,温升分别为0.17℃和0.18℃;在7号位置时,温升分别为0.10℃和0.13℃。

2.2 环境相对湿度对热场的影响

在相同污秽条件(污秽含NaCl,盐密为0.10 mg/cm²)且2号位置为零值绝缘子的情况下,环境相对湿度逐渐增加,其污秽绝缘子串的等温线分布见图4,绝缘子串钢帽处和铁脚与下表面连接处的温升见图5。

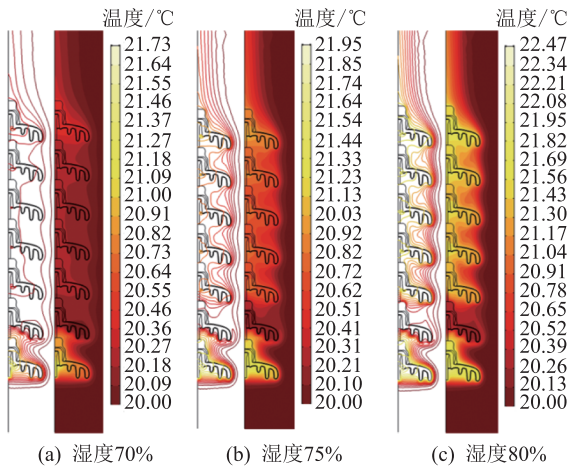


图4 不同环境相对湿度下绝缘子串的等温线分布

Fig.4 Isothermal distribution of insulator strings under different environmental relative humidity

图5中,1号和3号绝缘子与2号零值绝缘子钢帽处的温升差,在相对湿度70%时分别为0.76℃

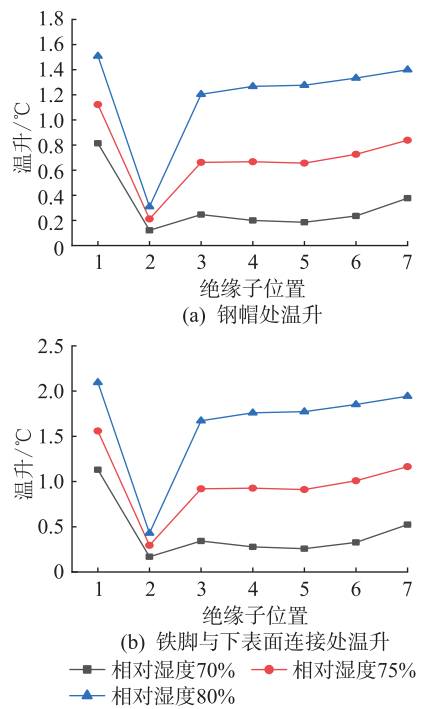


图5 环境相对湿度逐渐增加时绝缘子串钢帽和铁脚的温升

Fig.5 Temperature rise of steel cap and iron foot of insulator strings when environmental relative humidity increases gradually

和0.13℃,相对湿度75%时分别为1.00℃和0.50℃,相对湿度80%时分别为1.33℃和1.00℃;1号和3号绝缘子与2号零值绝缘子铁脚与下表面连接处的温升差,在相对湿度70%时分别为1.55℃和0.27℃,相对湿度75%时分别为1.68℃和0.72℃,相对湿度80%时分别为2.08℃和1.32℃。结合图4、图5可得,随着环境相对湿度的增加,绝缘子串的整体温升逐渐增加,串中正常绝缘子的温升变化较明显,在热量传递的影响下零值绝缘子也出现较小温升,零值绝缘子与相邻位置绝缘子的温升差随湿度增加而逐渐增大,而相邻正常绝缘子的温升差依然较小且整体呈现马鞍型分布规律。

2.3 污秽度对热场的影响

在环境相对湿度为80%且7号位置为零值绝缘子的情况下,绝缘子表面污秽度分别为0.05 mg/cm²,0.10 mg/cm²,0.20 mg/cm²,绝缘子串等温线分布如图6所示。绝缘子表面污秽度增加后,绝缘子串中各处温升增大,零值绝缘子与相邻位置绝缘子的温升差也逐渐增大。

通过测取绝缘子串钢帽处和铁脚与下表面连接处的温升差可知,当污秽度分别为0.05 mg/cm²,0.10 mg/cm²,0.20 mg/cm²时,零值绝缘子与相邻6号绝缘子在钢帽处的温升差分别为0.63℃,

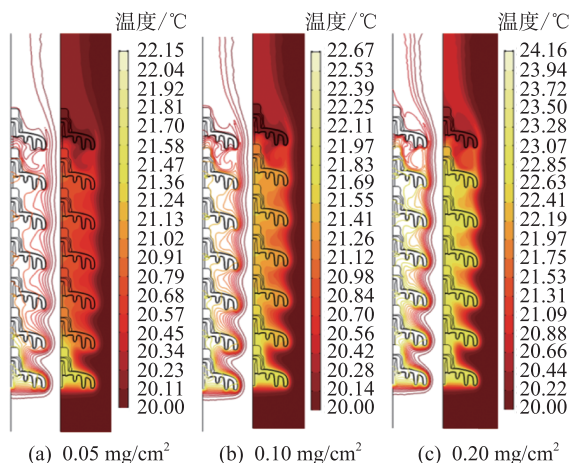


图6 不同污秽度下绝缘子串的等温线分布

Fig.6 Isothermal distribution of insulator strings with different contamination degrees

0.92 °C, 1.11 °C, 在铁脚与下表面连接处的温升差分别为 1.5 °C, 2.08 °C, 2.93 °C。

3 零值绝缘子红外检测方法

通过不同情况下绝缘子串的温度分布差异和规律,提出基于相邻温升差的零值绝缘子红外检测方法。

3.1 检测点的选取

由仿真结果可知,绝缘子串中每片绝缘子的温度分布随着绝缘子上各个位置与回转中心轴的距离改变而改变。因此,若要基于相邻绝缘子温升差进行红外检测,应选取各绝缘子的相同位置进行检测,检测点宜选取污秽绝缘子最大温升位置,如图7所示。



图7 绝缘子串红外检测点

Fig.7 Infrared insulator string detection point

3.2 检测流程

对绝缘子串进行红外检测以识别串中零值绝缘子,以绝缘子串温度分布规律为依据,使用高精度红外热像仪,进行基于相邻温升差的零值绝缘子红外检测,检测流程如图8所示。

3.3 检测条件

由仿真结果分析可知,零值绝缘子处于高压端

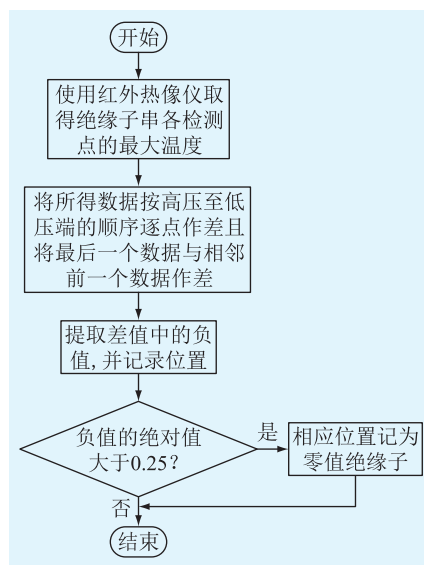


图8 绝缘子串红外检测流程

Fig.8 Flow chart of infrared insulator string detection

时最易检测,其次是处于低压接地端时,最后是处于中间位置。随着环境相对湿度、污秽度的逐渐增加,绝缘子串中相邻正常绝缘子间的温升差逐渐缩小,正常绝缘子与零值绝缘子间的温升差逐渐增大,有利于红外检测。当环境相对湿度在70%左右时,绝缘子表面污秽物中盐分才开始吸湿潮解,影响绝缘子表面电导率,并逐渐显现零值绝缘子与正常绝缘子的温升差;而干燥污秽的情况下绝缘子串整体温升不明显,难以进行红外检测。同时根据DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》标准要求,检测环境相对湿度不宜大于85%。因此根据文中的红外检测方法,提出检测条件、可检测位置和检测式,分别如表3、式(2)所示。

表3 红外检测条件及可检测位置

Table 3 Infrared detection conditions and detectable locations

盐密/ (mg·cm ⁻²)	可检测位置			
	湿度 70%	湿度 75%	湿度 80%	湿度 85%
0.01	无	高压端 第一片	高、低压端 第一片	全部
0.03	高压端 第一片	全部	全部	全部
0.05	高、低压端 第一片	全部	全部	全部
0.10	全部	全部	全部	全部
0.20	全部	全部	全部	全部

$$K = \begin{cases} 3.19 \times 2^{(R_H-70)/5} \rho_{ESDD}^{0.575} \rho_{NSDD}^{0.575} & 70 \leq R_H < 75 \\ 12.77 \times 2^{(R_H-75)/5} \rho_{ESDD}^{0.575} \rho_{NSDD}^{0.575} & 75 \leq R_H \leq 85 \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_H 为环境相对湿度; K 为检测系数。当 $K \geq 0.32$ 时,按照检测流程对绝缘子串全部位置进行零值检测;当 $0.32 > K \geq 0.16$ 时,能检测绝缘子串高压端第一片和低压接地端第一片是否为零值绝缘子;当 $0.16 > K \geq 0.09$ 时,仅能检测绝缘子串高压端第一片是否为零值绝缘子;当 $K < 0.09$ 时,无法对绝缘子串中任何位置进行零值检测。

4 零值绝缘子红外检测试验

4.1 试验方法、装置与试品

按照 IEC 60507—1991《交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》标准进行试验,试验原理见图9。调压器额定输入电压为 220 V,输出电压为 0~250 V,额定容量为 15 kV·A;电源由 10 kV·A/100 kV 的工频试验交流变压器提供,高压侧导线通过环氧套管引入人工雾室;将试品悬挂在 2 000 mm × 1 300 mm × 1 300 mm 的人工雾室中,由超声雾化发生器产生蒸汽来改变装置内的湿度,并用温湿度计进行监测。加压时采用均匀升压的方式快速升压至试验电压,再采用恒压方式持续加压 1 h,使用分压比为 3 000:1 的电容分压器监测电压,同时用高精度红外热像仪拍摄绝缘子串温度分布。

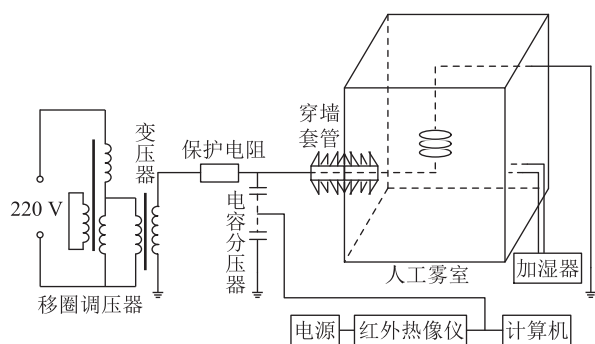


图9 试验原理

Fig.9 Schematic diagram of test principle

试验中零值和正常阻值绝缘子均为实际运行线路取下的自然零值和正常阻值标准瓷质悬式绝缘子。使用绝缘电阻测试仪按照 DL/T 474.1—2018《现场绝缘试验实施导则》对试验绝缘子进行电阻值测量并做相应记录。经测量所用自然零值绝缘子的电阻实测为 0.2 M Ω ,正常绝缘子绝缘电阻值为 100 G Ω ,符合绝缘电阻值等级划分(小于 5 M Ω 时为零值绝缘子)的相关要求。试验绝缘子实物图及基本参数如图 10 和表 4 所示。

绝缘子采用 IEC 60507—1991 中的固体层法进行人工涂污。试验所选的盐密分别为 0.03 mg/cm², 0.05 mg/cm², 0.10 mg/cm², 0.20 mg/cm², 灰密为 1 mg/cm²。



图 10 试验绝缘子

Fig.10 Test insulator

表 4 试验绝缘子基本参数

Table 4 Basic parameters of test insulator

参数	数值	参数	数值
结构高度/mm	146	上表面积/cm ²	1 066
盘径/mm	255	下表面积/cm ²	1 002
爬电距离/mm	400		

4.2 试验结果

4.2.1 不同环境相对湿度时的试验结果

表 5 为在相同污秽度(盐密 0.10 mg/cm²)含零值绝缘子的条件下,环境相对湿度分别为 70%,80% 时的铁脚与下表面连接位置的温升差。

表 5 不同相对湿度时铁脚与下表面连接位置的温升差

Table 5 Temperature rise difference between iron foot and lower surface at different relative humidity

零值位置	相对湿度/%	1号位置 温升差/℃	2号位置 温升差/℃	3号位置 温升差/℃
1号	70		0.9	0.9
	80		1.4	1.3
2号	70	0.9		0.7
	80	1.3		1.0
3号	70	0.8	0.4	
	80	1.7	0.8	

不同环境相对湿度和零值绝缘子在绝缘子串中处于不同位置时,高压侧正常绝缘子与零值绝缘子的温升差均不小于低压侧绝缘子与零值绝缘子的温升差。零值绝缘子的温度较低,与正常绝缘子温升差较大,这种温升差随着相对湿度的增加而逐渐变大。

4.2.2 不同污秽度时的试验结果

表 6 为在相同环境相对湿度(80%),且 1 号位置为零值绝缘子的条件下,污秽度不同时各绝缘子与零值绝缘子在铁脚与下表面连接位置的温升差。

正常绝缘子与零值绝缘子温升差随污秽度增加而增大,虽有个别数据无明显增大,但整体来看依然呈现增大趋势,与仿真结果相同。

表6 不同污秽度时铁脚与下表面连接位置的温升差

Table 6 Temperature rise difference between connecting position of iron foot and lower surface with different degree of filth $^{\circ}\text{C}$

污秽度/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	2号位置温升差	3号位置温升差
0.03	1.3	1.1
0.05	1.3	1.2
0.10	1.4	1.3
0.20	1.5	1.3

4.3 检测方法的验证

将不同位置零值、不同环境湿度和不同污秽度下的部分试验结果使用文中检测方法进行验证。将1号与2号绝缘子温升差、2号与3号绝缘子温升差、3号与2号绝缘子温升差分别定义为 T_{12} , T_{23} , T_{32} , 表达式为:

$$\begin{cases} T_{12} = T_1 - T_2 \\ T_{23} = T_2 - T_3 \\ T_{32} = T_3 - T_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_1, T_2, T_3 分别为1、2、3号绝缘子的温度。

(1) 盐密 $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 70%, 1号绝缘子零值时红外检测结果如图 11 所示, T_1, T_2, T_3 分别为 $17.9 \text{ }^{\circ}\text{C}, 18.7 \text{ }^{\circ}\text{C}, 18.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用文中所提方法对 T_{12}, T_{23}, T_{32} 进行计算, 此时, 可检测出零值绝缘子处于 1 号位置, 同时使用式(2)对相应情况下的检测系数进行计算, 其值为 0.10, 在 0.09~0.16 之间, 因此可对高压端第一片进行检测, 判断是否为零值。

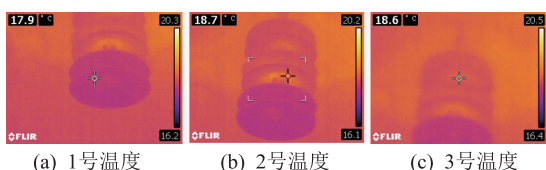


图 11 1号绝缘子零值时的试验数据 (盐密 $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 70%)

Fig.11 Test results of zero value of No.1 insulator (salt density $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, relative humidity 70%)

(2) 盐密 $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 70%, 2号绝缘子零值时检测结果如图 12 所示, T_1, T_2, T_3 分别为 $18.4 \text{ }^{\circ}\text{C}, 17.8 \text{ }^{\circ}\text{C}, 18.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 并对 T_{12}, T_{23}, T_{32} 进行运算。通过使用红外检测方法, 不能检测出处于 2 号位置的零值绝缘子, 同时使用式(2)对相应情况下的检测系数进行计算, 其值为 0.10, 在 0.09~0.16 之间, 不能对除高压端第一片外的其他位置绝缘子进行零值检测, 因此未能检测出处于 2 号位置的零值绝缘子。

(3) 盐密 $0.10 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 80%, 2号零值绝缘子零值时检测结果如图 13 所示, T_1, T_2, T_3 分

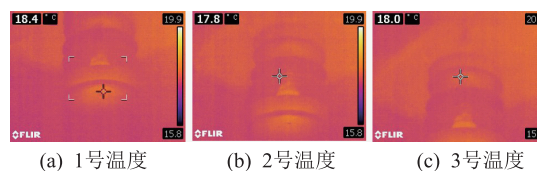


图 12 2号绝缘子零值时的试验数据 (盐密 $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 70%)

Fig.12 Test results of zero value of No.2 insulator (salt density $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$, relative humidity 70%)

别为 $20.4 \text{ }^{\circ}\text{C}, 19.1 \text{ }^{\circ}\text{C}, 20.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用文中所提方法对 T_{12}, T_{23}, T_{32} 进行运算, 可检测出零值绝缘子处于 2 号位置, 同时使用式(2)对相应情况下的检测系数进行计算, 其值大于 0.32, 因此可对全部位置绝缘子进行零值检测。

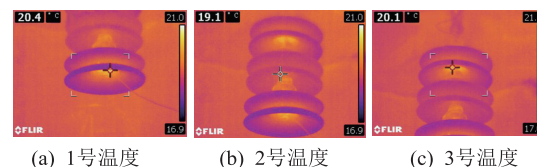


图 13 2号绝缘子零值时的试验数据 (盐密 $0.10 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 相对湿度 80%)

Fig.13 Test results of zero value of No.2 insulator (salt density $0.10 \text{ mg}/\text{cm}^2$, relative humidity 80%)

结合试验数据对零值绝缘子红外检测方法进行了验证, 检测结果准确。

5 结论

文中建立污秽绝缘子串电-热-流场耦合模型, 研究零值绝缘子在串中不同位置、不同环境相对湿度和不同污秽度等多因素影响下, 绝缘子串温度分布的差异和规律, 提出相应零值绝缘子红外检测方法, 并加以验证, 结论如下:

(1) 绝缘子串中零值绝缘子与相邻正常绝缘子的温升差较大, 绝缘子串在零值位置温升骤降, 零值的存在会使绝缘子串在原有无零值时的连续性马鞍型的温度分布遭到改变。

(2) 绝缘子上不同位置的温升与回转中心轴距有关, 离回转中心轴越远, 则温升越小, 反之越大, 最大温升出现在铁脚与下表面连接处。

(3) 随着环境相对湿度和污秽度的增加, 绝缘子串的整体温升逐渐增加, 零值绝缘子与正常绝缘子温升差逐渐变大, 但相邻正常绝缘子间的温升差依然较小, 均不大于 $0.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 环境相对湿度在 70% 左右时, 零值绝缘子与正常绝缘子的温升差才逐渐显现, 干燥污秽的情况下绝缘子串整体温升不明显, 难以进行红外检测。

参考文献:

- [1] 王教青,张福,杨跃光,等. 运行 15 年直流线路瓷绝缘子试验及性能分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):223-228.
WANG Xiaoqing,ZHANG Fu,YANG Yueguang,et al. Test and performance analysis of porcelain insulator on DC transmission line running for 15 years[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5):223-228.
- [2] 邱志斌,阮江军,黄道春,等. 输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(4):1259-1267.
QIU Zhibin,RUAN Jiangjun,HUANG Daochun,et al. Study on aging modes and test of transmission line porcelain suspension insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(4):1259-1267.
- [3] 邓鹤鸣,李勇杰,王建,等. 同塔多回线路绝缘子机械性能试验及试验过程的电气性能评估[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2017,36(3):74-79.
DENG Heming,LI Yongjie,WANG Jian,et al. Mechanical experiment of insulators in multiple-circuit transmission lines and the evaluation of electrical performance in the experiment process[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2017,36(3):74-79.
- [4] 孙庆峰,华正轩,梅简,等. 高压支柱瓷绝缘子异常发热原因分析及预防措施[J]. 电瓷避雷器,2020(3):232-236.
SUN Qingfeng,HUA Zhengxuan,MEI Jian,et al. Analysis on the abnormal heating of high voltage post insulator with ceramic material and preventive measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3):232-236.
- [5] 苑利,赵锐,谭孝元,等. 基于红外成像技术的零值绝缘子检测[J]. 高压电器,2018,54(2):97-102.
YUAN Li,ZHAO Rui,TAN Xiaoyuan,et al. Zero insulator detection based on the infrared imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(2):97-102.
- [6] 王万昆,周学明,胡丹晖,等. 220 kV 悬式瓷绝缘子零值原因研究[J]. 湖北电力,2019,43(5):27-32.
WANG Wankun,ZHOU Xueming,HU Danhui,et al. Research on zero-value cause of 220 kV suspension porcelain insulator [J]. Hubei Electric Power, 2019,43(5):27-32.
- [7] 郑维刚,唐红,朱义东,等. 220 kV 低零值绝缘子红外检测技术应用研究[J]. 东北电力技术,2019,40(11):10-12.
ZHENG Weigang,TANG Hong,ZHU Yidong,et al. Research on infrared detection technology application for 220 kV low-value zero-value insulator[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019,40(11):10-12.
- [8] 李岩,彭玉金,时海刚,等. 绝缘子运行性能分析与选型研究[J]. 国网技术学院学报,2018,21(1):5-8,15.
LI Yan,PENG Yujin,SHI Haigang,et al. Study on performance analysis and type selection of electrical insulators[J]. Journal of State Grid Technology College, 2018,21(1):5-8,15.
- [9] 程洋,夏令志,李志飞,等. 基于红外成像法的零值瓷绝缘子检测[J]. 绝缘材料,2019,52(3):74-79.
CHENG Yang,XIA Lingzhi,LI Zhifei,et al. Detection of faulty porcelain insulator based on infrared imaging method[J]. Insulating Materials, 2019,52(3):74-79.
- [10] 刘晓伟,王力农,王军华,等. 交流输电线路劣化瓷质绝缘子自动检测技术研究[J]. 电测与仪表,2016,53(11):110-115.
LIU Xiaowei,WANG Linong,WANG Junhua,et al. Research on automatic detection technology for faulty porcelain insulators on AC transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016,53(11):110-115.
- [11] 万亚玲,李娜,李唐兵,等. 应用盘面特征识别红外检测盲区的零值绝缘子[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(3):89-95.
WAN Yaling,LI Na,LI Tangbing,et al. Identification of zero-value insulators in infrared detection blind zone using disk characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019,31(3):89-95.
- [12] 付炜平,王伟,董俊虎,等. 利用红外热像技术检测劣化绝缘子的适用性分析研究[J]. 高压电器,2018,54(2):110-114,120.
FU Weiping,WANG Wei,DONG Junhu,et al. Study on the applicability of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(2):110-114,120.
- [13] 王欣,李凯迪,陈凡辉,等. 污秽对红外成像法测零值绝缘子影响的有限元分析[J]. 绝缘材料,2019,52(1):84-90.
WANG Xin,LI Kaidi,CHEN Fanhui,et al. Finite element analysis on influence of pollution on detecting faulty insulators by infrared imaging method[J]. Insulating Materials, 2019,52(1):84-90.
- [14] MIZUNO Y,NAITO K,SUZUKI Y,et al. Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulator strings [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999,6(1):100-104.
- [15] 夏德分. 红外热像检测零值绝缘子影响因素研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
XIA Defen. Research on influence factors of zero-resistance insulator detection based on infrared thermal image[D]. Changsha:Hunan University, 2012.
- [16] 彭子健. 基于红外热像的瓷绝缘子劣化识别技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
PENG Zijian. Research on the technology of faulty insulator identification based on infrared thermal images[D]. Changsha:Hunan University, 2018.
- [17] 蒋兴良,夏强峰,胡琴,等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):118-124.
JIANG Xingliang,XIA Qiangfeng,HU Qin,et al. Influence of deteriorated insulator on the electric field distribution of overhang string [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(16):118-124.

- [18] 周志成,赵晨龙,高嵩,等. 绝缘子自然污秽下受潮及导电特性分析[J]. 高电压技术,2014,40(12):3680-3687.
ZHOU Zhicheng,ZHAO Chenlong,GAO Song, et al. Analysis on wetting and conductive properties of natural polluted insulators[J]. High Voltage Engineering,2014,40(12):3680-3687.
- [19] 苑吉河. 输电线路绝缘子(串)交流污闪特性及放电过程的研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
YUAN Jihe. Study on AC pollution flashover performance and discharge process of transmission line insulators[D]. Chongqing:Chongqing University,2008.
- [20] 杨晓. 高压绝缘子污秽物的吸湿性能[J]. 电瓷避雷器,1990(6):28-31.

YANG Xiao. Hygroscopic properties of high-voltage insulators [J]. Insulators and Surge Arresters,1990(6):28-31.

作者简介:



陶玉宁

陶玉宁(1995),男,硕士在读,研究方向为电力设备状态在线监测(E-mail:taoyuning12@163.com);

方春华(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力设备状态在线监测。

Infrared detection method of zero value insulator considering relative humidity and pollution degree

TAO Yuning, FANG Chunhua

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Zero-value insulator infrared detection method is widely used with the characteristics of precision, efficiency and safety, but its measurement results are easily affected by the relative humidity and pollution degree of the environment. The coupling model of electric-thermal-flow field of polluted insulator string is established, and the influence of zero value insulator position, environmental relative humidity and pollution degree on the temperature distribution of insulator string is analyzed. Then, an infrared detection method of zero value insulator based on adjacent temperature rise difference is proposed and verified by experiments. The results show that the continuous saddle temperature distribution of insulator string can be destroyed because of zero value. The farther the insulator is from the rotating center shaft, the lower the temperature rise is, and vice versa. The maximum temperature rise appears at the connection between the iron foot and the lower surface. With the increase of environmental relative humidity and pollution degree, the overall temperature rise of insulator string gradually increases, and the temperature rise difference between zero value insulator and normal insulator gradually increases. The experimental results show that it is feasible and effective for the zero-value insulator detection in field with this method.

Keywords: zero value insulator; relative humidity; temperature distribution; pollution degree; multiphysics; infrared detection

(编辑 陆海霞)