

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240675

不同污秽影响下劣化瓷绝缘子发热规律与 红外特征分析

孙瑞筱¹ 胡玉耀¹ 蒋兴良² 咸日常¹ 陈雨³

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255000
2. 重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站 重庆 400044
3. 山东汇能电气有限公司 淄博 255000)

摘要 瓷绝缘子复杂多样的劣化形式及其表面污秽均会影响红外检测结果,从而造成对于劣化绝缘子的误判或漏判,给电力系统的安全稳定运行带来严重威胁。目前针对不同污秽作用下绝缘子串的发热特征及污秽对劣化绝缘子红外检测结果的影响少有研究。为此该文结合现场试验及有限元仿真研究了劣化位置、劣化阻值以及不同污秽对瓷绝缘子串发热规律及其红外成像的影响。研究表明:绝缘子串中任意一片绝缘子的温升随着其内阻的减小呈现先升高后降低的趋势。干燥污秽对劣化绝缘子发热的影响可忽略不计,而湿润污秽对发热的影响与劣化绝缘子在串中的位置有关,温度差值变化率最小仅有37.9%。在由表面固体污秽(A类污秽)和盐雾(B类污秽)构成的污秽中,雾水电导率对染污附盐密度具有附加作用,表面轻度污秽时其对绝缘子温升的影响大,重污秽时影响较小。在实际工程应用中,应选择绝缘子背风侧作为红外观测点,且不考虑相对湿度大于90%的情况。

关键词: A/B类污秽 劣化绝缘子 发热特征 红外成像 温升

中图分类号: TM216

0 引言

绝缘子是电力系统中不可或缺的电力设备之一,兼具电气绝缘与输电线路结构支撑的作用^[1-2]。瓷绝缘子凭借其良好的机械性能以及高介电强度等优势在输电线路中得到广泛应用^[3]。然而,长期服役的瓷绝缘子受电、热、机械应力以及环境因素的协同作用^[4],会出现裂缝、表面破损和电热击穿等现象,从而引起绝缘性能劣化,最终形成低值甚至零值绝缘子^[5]。在工频过电压或雷击过电压的作用下,劣化绝缘子串可能发生闪络,通过的短路电流会产生大量热量,使绝缘子的瓷件开裂、钢帽脱落,进而导致绝缘子断串或输电导线落地等事故,使电力系统的可靠运行面临严峻挑战^[6-7]。例如,2020年,山东电网2条220 kV输电线路因瓷绝缘子串中存

在零值绝缘子而导致线路在雷雨天气下发生断串故障;2021年,宁夏电网某220 kV耐张瓷绝缘子串因串中零/低值绝缘子片数过多而导致整串绝缘子发生击穿事故。因此,研究劣化绝缘子检测方法已成为国内外电力部门重点关注的技术难题。

相较于传统方法,红外成像法由于其不停运、不接触、抗电磁干扰等优点成为绝缘子缺陷及表面污秽检测的主流方法^[8-9]。根据标准GB/T 26218.1《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分:定义、信息和一般准则》^[10],A类污秽是指积聚在绝缘子表面且含有显著不溶成分的固体污染物,而B类污秽是几乎不含或完全不含不溶成分的液体电解质污秽,典型代表是沿海地区盐雾。文献^[11]利用红外热成像技术得到了能够有效表征A类污秽的特征量,实现了绝缘子污秽的分级及检测。文献^[12]通过分析不同污秽程度下绝缘子的红外图谱,获得了A类污秽对绝缘子吸湿特性、介电性能的影响。文献^[13]采用有限元软件对不同污秽条件下含零值绝缘子的绝缘子串的电场分布进行了仿真

国家自然科学基金(52477147)、山东省高等学校“青创团队计划”(2023KJ148)、山东省自然科学基金(ZR2023ME129)和湖南雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站开放课题(NORS-XFEES-23-04)资助项目。

收稿日期 2024-04-29 改稿日期 2024-07-14

分析,结果表明,随着表面A类污秽度的增大,绝缘子电压分布趋于均匀,零值绝缘子的负温升特征被削弱。文献[14]基于等值电路模型对劣化瓷绝缘子的温升现象进行了研究,结果表明,当绝缘子洁净或有干燥A类污秽时,可忽略表面电阻的发热,此时可将钢帽区域的温度作为特征量识别劣化绝缘子。目前,红外成像法虽已广泛应用于劣化绝缘子及其表面污秽的检测,但针对劣化绝缘子表面覆有污秽时对其发热特征的影响研究较少,而且同时考虑A、B类不同污秽作用对绝缘子发热特征以及劣化绝缘子红外检测的影响尚缺乏研究。

因此,本文以双伞瓷绝缘子为研究对象,基于红外成像法,通过现场试验得到的热像图研究污秽度、劣化阻值以及劣化片所在位置对劣化绝缘子红外检测的影响,获得不同污秽作用下劣化绝缘子的发热规律。结合热-电耦合仿真模型,分析了不同情况下瓷绝缘子串的温升曲线以及温度云图,验证了试验结果的有效性。本文研究成果可为不同污秽作用下劣化瓷绝缘子串的红外检测提供理论依据和技术支撑。

1 绝缘子发热原理

交流电路中瓷绝缘子的产热形式主要包括:电介质损耗发热 P_j 、内部穿透性电流发热 P_c 和沿面泄漏电流发热 P_w ,其损耗形式主要体现为绝缘子电阻与极间电容相互作用产生的有损极化。绝缘子发热等效电路如图1所示。发热功率计算式^[15]为

$$P_j = \frac{U_n^2}{R_j} = U_n^2 \omega C_0 \tan \delta \quad (1)$$

$$P_c = \frac{U_n^2}{R_c} \quad (2)$$

$$P_w = \frac{U_n^2}{R_w} \quad (3)$$

式中, U_n 为绝缘子串中第 n 片绝缘子的压降; C_0 为单片绝缘子的等效电容; $\tan \delta$ 为介质损耗角正切值,一般取 $\tan \delta=0.02$; ω 为角频率,在工频电压下

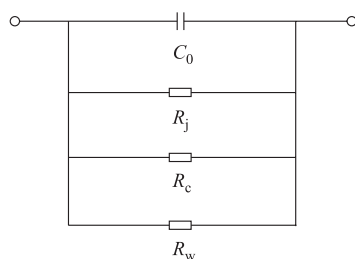


图1 绝缘子发热等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of the insulator heating

$\omega=100\pi \text{ rad/s}$; R_j 、 R_c 、 R_w 分别为绝缘子的极化电阻、内部电阻以及表面电阻。

三种发热引起的绝缘子温升表现形式有所区别。绝缘子劣化形式如图2所示。如果绝缘子表面没有被污染且在结构上不存在缺陷,绝缘子内部及表面流过的电流可忽略不计,此时温升主要取决于介质损耗发热 P_j ,具体表现为钢帽温升^[16];当绝缘子内部出现贯穿性缺陷或表面瓷件开裂时(见图2),裂纹以及水泥胶合剂处孔洞的存在会使得绝缘子整体机械强度下降,并且水分容易由此入侵,造成绝缘电阻降低,此时 P_c 增大且对发热起主要作用,同样表现为钢帽温升^[17];当绝缘子的表面污层受潮或受沿海地区盐雾影响时,其表面电阻会大幅度减小,此时表面电阻会影响绝缘子的发热形式,需要考虑 P_w 在绝缘子串中所产生的热量,具体表现形式主要为盘面发热,严重时也会同时作用在钢帽。可见表面污秽的存在会改变绝缘子串的发热特征^[18]。

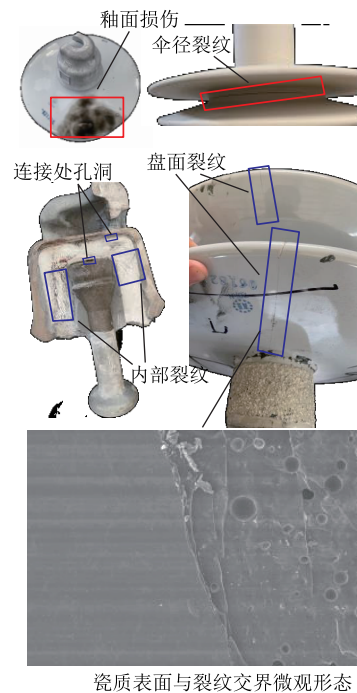


图2 绝缘子劣化形式

Fig.2 Deterioration forms of insulators

基于红外辐射理论,当待测物体的温度发生变化时,其产生的热辐射可以传递能量,导致热成像图中的辐射温度也随之变化^[19]。红外成像法的原理是提取污秽绝缘子表面的温度场信息,通过编程进行可视化处理,在这个过程中由于污秽覆在绝缘子表面会影响其发热功率,从而影响红外成像法检测劣化绝缘子^[20]。因此,有必要分析污秽对瓷绝缘子串的发热特征及红外成像的影响。

2 试验步骤及方法

为分析不同污秽对劣化绝缘子红外检测的影响，依据标准 GB/T 4585—2004《交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》^[21]，搭建试验平台模拟 110 kV 线路绝缘子运行状况，通过改变污秽度、劣化绝缘子阻值、劣化绝缘子在串中的位置以分析绝缘子串的红外成像规律。

试验变压器参数为 150 kV/150 kV·A，双伞瓷绝缘子试品型号为 XWP₂-160，劣化阻值选择 2.2~291 MΩ（绝缘电阻由 Fluke 1555 10 kV 测试仪测量）。红外热成像仪型号为 FLIR T660，其热灵敏度小于 20 mK。试验设备接线示意图如图 3 所示。

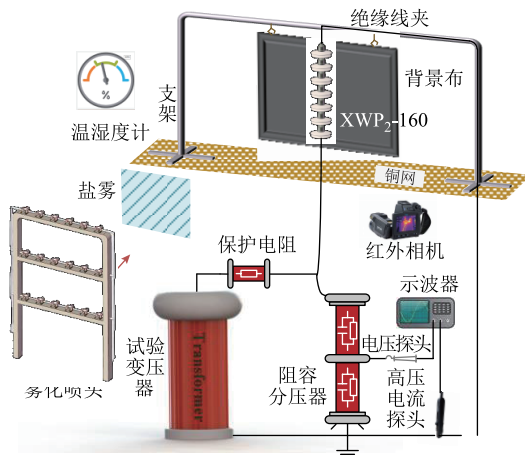


图 3 试验设备接线示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment wiring

试验开始前首先采用磷酸三钠清洗绝缘子试品以去除表面污秽，然后用去离子水对其二次冲洗，待晾干后进行人工涂污^[22-23]。依据标准 GB/T 4585—2004《交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》^[21]和 GB/T 16434—1996《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》^[24]，采用氯化钠（NaCl）和高岭土模拟 A 类污秽，其典型值见表 1；配置含氯化钠的导电性溶液模拟 B 类污秽，电导率分别为 0.6、2.2、4.1 S/m。绝缘子表面 A 类污秽采用定量涂层法，用毛刷将配置好的污液均匀涂抹在绝缘子表面；为模拟 B 类污秽，将配

表 1 A 类污秽典型值

Tab.1 Typical values for category A contamination

污秽等级	盐密/(mg/cm ²)	灰密/(mg/cm ²)
I	0.03	1
II	0.10	1
III	0.20	1

置好的溶液通过高压喷嘴以雾状形式向瓷绝缘子串喷射，形成盐雾^[25]。

为便于分析，将串中绝缘子从高压侧至接地侧依次编号为 1~7，通过试验变压器均匀升压至试验电压 65 kV，然后采用恒压方式耐压 60 min。待绝缘子热稳定后，通过热像仪获取红外图谱，拍摄距离为 6 m。环境参数为标准气压，风速为 0~0.2 m/s。具体试验方案如下：

1) 为研究劣化绝缘子阻值与位置对其发热的影响，在不涂污条件下选择不同劣化阻值的绝缘子分别置于 1、4、7 号位置开展试验。

2) 为研究污秽度对其发热的影响，将整串绝缘子表面污秽度设置为变量，固定 1 号位置为低值绝缘子。

3) 为研究污秽度对红外成像识别零/低值绝缘子的影响，分别调整污秽度以及零/低值绝缘子在串中的位置，观察红外成像图谱。

4) 为模拟在运绝缘子串不均匀染污的情况，固定 1 号位置为低值绝缘子，研究沿绝缘子串湿污不均匀、迎背风侧湿污不均匀、上下表面湿污不均匀三种情况对红外成像的影响。

在耐压时间相同的情况下，为消除环境温度的影响，引入温度变化率描述绝缘子相对环境温度的温升，其定义为^[26]

$$T = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \quad (4)$$

式中， T_1 为绝缘子钢帽区域平均温度； T_0 为环境温度。

3 劣化绝缘子串发热特征及红外检测影响因素分析

3.1 劣化阻值及位置对发热和红外检测的影响

选取 1 号绝缘子的阻值分别为 1.2、49、124 MΩ，恒压 60 min 后的红外热像图及温升曲线如图 4 所示。由图 4 可以得到：

1) 当绝缘子阻值由正常绝缘子的 300~3 000 MΩ 下降至 124 MΩ 时，劣化绝缘子片温升略高于正常绝缘子，如图 4 中①所示；当劣化绝缘子阻值继续降低至正常绝缘子等效容抗大小（48~52 MΩ）时，钢帽温度变化率达到 0.093，发热功率达到最大值，如图 4 中②所示；当阻值持续减小时，劣化片承担较低的电压，导致发热功率下降，最终低于正常绝缘子的发热，如图 4 中③所示。

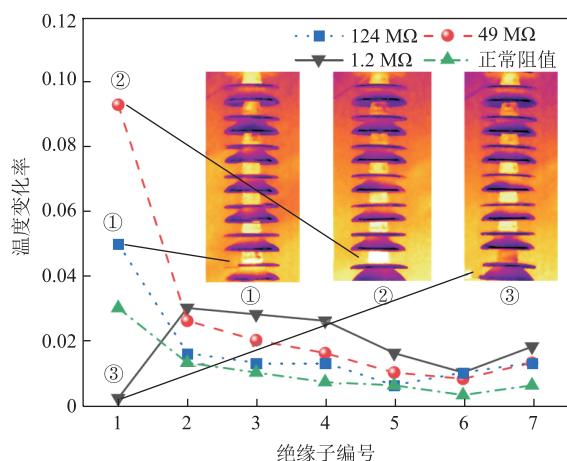


图4 劣化阻值对绝缘子串温升的影响

Fig.4 Influence of deterioration resistance on temperature rise of insulator strings

2) 随着1号绝缘子阻值的降低,钢帽温度先升高后降低。上述试验现象可以解释如下:由单片绝缘子发热等效电路图1所示,单片绝缘子发热功率受电阻与电容以及承担电压的共同影响。随着电阻变化,其功率发生非线性变化,当绝缘子劣化程度轻微,即阻值接近正常值时,其承担的电压降落不明显,发热功率受容抗影响大,导致钢帽温度升高;当绝缘子劣化程度严重,即阻值进一步降低时,电压降落明显,发热功率受电阻影响大,导致钢帽出现负温升。

分别将49 MΩ的低值绝缘子以及1.2 MΩ的零值绝缘子置于串中1、4、7号位置,恒压60 min后的温升曲线如图5所示。

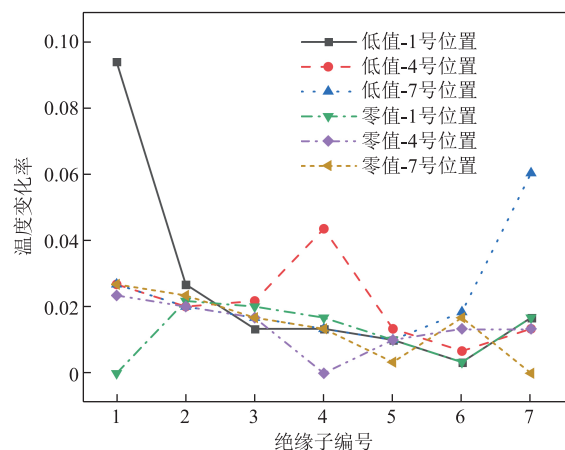


图5 劣化位置对绝缘子串温升的影响

Fig.5 Influence of deterioration location on temperature rise of insulator strings

由图5可知:

1) 当低值绝缘子位于高压端(1号位置)时,其钢帽温度变化率为0.093;当相同的劣化片位于7号和4号位置时,其温度变化率分别为0.06和0.043,

即低值绝缘子位于绝缘子串两端时的温升要高于其位于中间部位时。这是由于绝缘子串电压分布呈马鞍状,当劣化片位于两端时其承担的电压显著降低,导致温度变化明显。

2) 当绝缘子串中高压端和接地端分别出现零值绝缘子时,其温差绝对值要大于中压端。因此,当劣化绝缘子位于高压/接地端时更易被检测到。

3) 绝缘子串中某片绝缘子出现劣化时,其附近正常绝缘子的温升均有所升高,其影响范围以劣化片为中心向两边逐渐减小,同样地,该现象在高压端最为明显。这是因为劣化绝缘子阻值降低后承担的电压小,相邻绝缘子承担的电压会有所升高,导致温度上升。

3.2 不同污秽对发热和红外检测的影响

3.2.1 污秽干燥时对发热的影响

固定1号位置为低值绝缘子,当绝缘子表面覆有干燥污秽时的温升曲线如图6所示。由图6可知,干燥污秽对劣化绝缘子串温升的影响很小,可忽略不计。这是由于当绝缘子表面污秽干燥时,污秽几乎不导电,表面污秽电阻仍较大,因此绝缘子的温升仍以介质损耗和劣化发热为主,盘面温度基本不变。由图1可知,表面电阻 R_w 越大时,会有更大的电流流经劣化电阻 R_c ,导致劣化片发热更明显。因此,干燥污秽的存在会使得劣化片更易于被红外热成像技术识别。

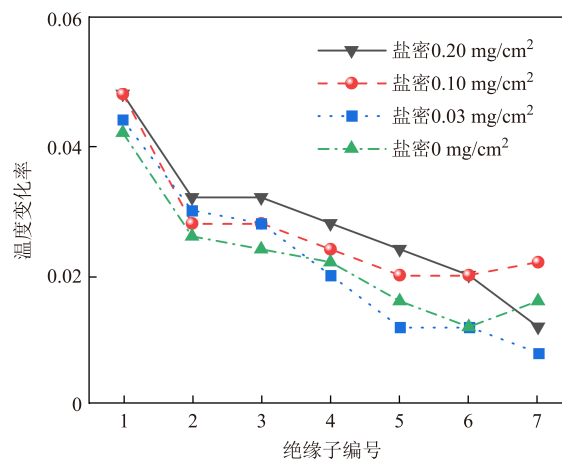


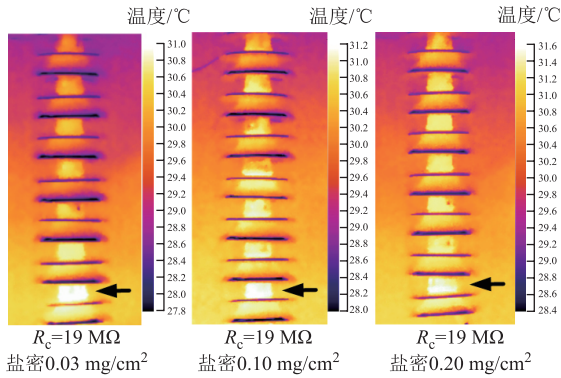
图6 干燥污秽对绝缘子串温升的影响

Fig.6 Influence of dry pollution on temperature rise of insulator strings

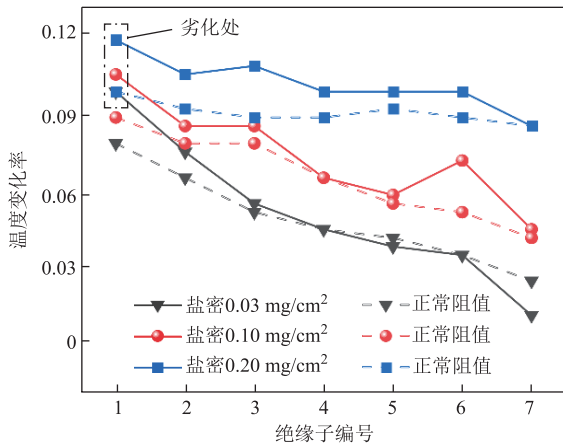
3.2.2 A类污秽对发热的影响(B类污秽固定)

保持雾水电导率(B类污秽)为0.6 S/m不变,改变绝缘子表面染污程度(A类污秽),当1号位置为低值绝缘子时,绝缘子串红外热像图及温升曲线随A类污秽的变化如图7所示。为了与劣化绝缘子发热

进行对比,在图 7b 中同时给出了无劣化绝缘子串的温升曲线。



(a) 低值绝缘子红外热像图



(b) 正常及低值绝缘子温升曲线

图 7 A 类污秽对绝缘子串温升的影响

Fig.7 Influence of category A contamination on temperature rise of insulator strings

由图 7 可知:

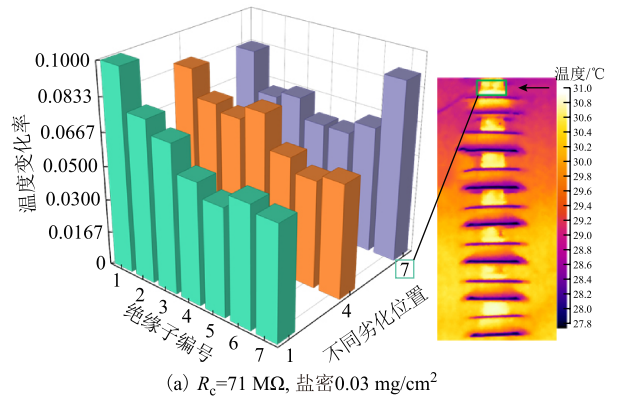
1) 随着污秽程度的增大,1 号低值绝缘子与相邻 2 号绝缘子温度变化率的差值分别为 0.025、0.021 和 0.014,而无劣化情况下这一差值分别为 0.014、0.010 和 0.007,可见低值处钢帽温度变化率高于无劣化情况,且当串中存在低值绝缘子时,附近正常绝缘子的温升均有所升高,可见污秽和阻值作为关联因素共同影响绝缘子温升。因此本文后续内容仅研究劣化覆污绝缘子温升情况,不再设置无劣化绝缘子进行对照。

2) 绝缘子钢帽整体温度随 A 类污秽度的增大呈上升趋势,但各片绝缘子之间的温差有所下降,即绝缘子串温度呈马鞍形分布的趋势减弱。如图 7a 所示,当绝缘子表面湿污情况较轻时,串中各片温度变化率范围为 0.014~0.107,此时最高温度变化率与最低温度变化率的差值变化率为 664.2%;而在湿污严重状态下,温度变化率范围为 0.087~0.12,

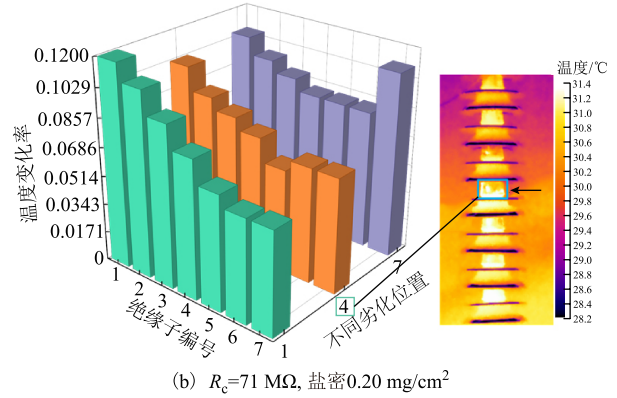
温度差值变化率仅有 37.9%。

3) 造成各片绝缘子钢帽温差随 A 类污秽度增大而减小的原因在于绝缘子表面污秽层会在湿润环境下溶解,导致污层电导率升高,致使表面电阻降低。在这个过程中绝缘子电压将由原本的阻容性分布向阻性分布转变,即电压分布趋于均匀,使得绝缘子钢帽之间的温差减小。此外,随着表面泄漏电流增大,瓷面温度相较于无污秽情况也有所上升。

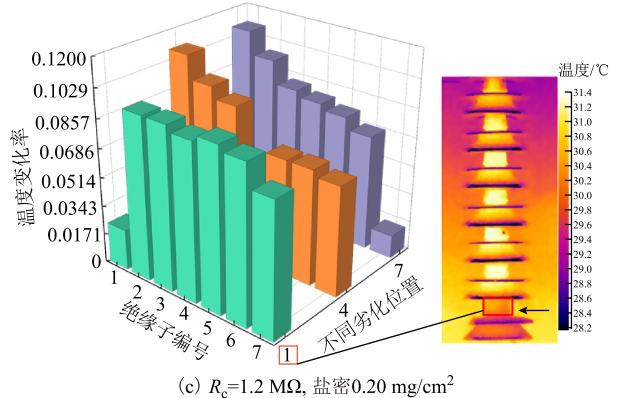
改变串中劣化片的位置,将 71 MΩ 低值绝缘子以及 1.2 MΩ 零值绝缘子分别置于 1、4、7 号位置,得到不同污秽度下红外热像图及温升曲线如图 8 所示。



(a) $R_c=71\text{ M}\Omega$, 盐密 0.03 mg/cm^2



(b) $R_c=71\text{ M}\Omega$, 盐密 0.20 mg/cm^2



(c) $R_c=1.2\text{ M}\Omega$, 盐密 0.20 mg/cm^2

图 8 污秽对不同劣化位置绝缘子的发热影响

Fig.8 Influence of dirt on insulator heating at different degradation locations

由图8可知:

1) 对比图5, 污秽条件下改变绝缘子劣化位置带来的温度变化率的改变略小于无污秽的情况, 随着污秽程度增大, 对温度变化率的影响程度逐渐减小。如图8a、图8b所示, 当劣化片分别位于1、4、7号位置时, 计算相邻片平均温度变化率的差值百分数, 并将其定义为温差变化率。在轻污秽时, 劣化片与相邻片的温差变化率分别为1.9%、0.6%、3.5%; 重污秽时, 该变化率分别为0.9%、0.5%、1.2%。因此, 污秽会改变劣化绝缘子的温升特征, 使得红外技术容易漏检劣化绝缘子。

2) 由图8a红外热像图可见, 在污秽程度较轻的条件下, 劣化片钢帽发热较为明显, 劣化处温度变化率明显上升, 且劣化片发热集中于钢帽与盘面结合处, 在双伞伞径处也有明显发热。考虑固体传热理论, 劣化片泄漏电流产生的热量总是由内向外传递, 因此热量会从绝缘子钢脚向伞径以及钢帽下端部分传递, 导致在热像图中局部发亮, 可以此作为轻污秽情况下劣化绝缘子的诊断依据。

3) 由图8b红外热像图可以看出, 在绝缘子表面湿润的情况下, 绝缘子串整体发热较均匀, 3、4片钢帽整体发热较明显, 依据红外图像和温度变化率曲线难以准确地判断出劣化片位置, 但劣化片发热仍然集中在钢帽下部。

4) 由图8c红外热像图可见, 对零值绝缘子而言, 在绝缘子串中基本相当于短路, 几乎不承担电压, 发热不明显, 污秽不会影响红外成像结果。但对低值绝缘子而言, 尚承担一定的电压, 由串联电路定理可知, 串联电阻越小, 发热功率越小。因此, 在湿润污秽条件下表面电阻的减小使得劣化片的发热功率下降, 易造成红外成像法对劣化绝缘子的误判或漏判。

3.2.3 B类污秽对发热的影响 (A类污秽固定)

保持7号位置劣化绝缘子阻值为71 MΩ恒定, 当绝缘子表面覆有轻度污秽 (盐密为0.03 mg/cm²) 和严重污秽 (盐密为0.20 mg/cm²) 时, 通过改变雾水电导率分析B类污秽对绝缘子发热的影响, 结果如图9所示。

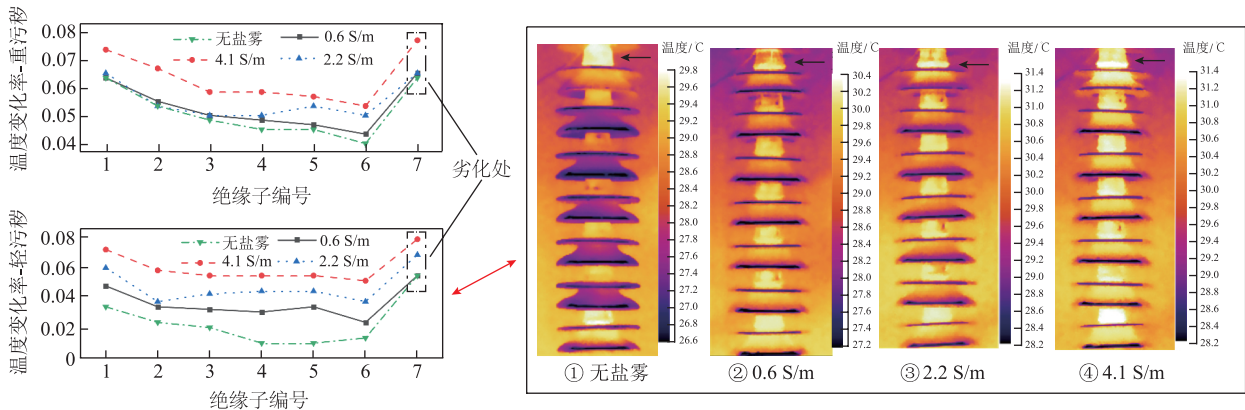


图9 不同污秽下雾水电导率对绝缘子串温升的影响

Fig.9 Influence of fog water conductivity on temperature rise of insulator strings for different ESDD

由图9可以得到:

1) 当绝缘子表面存在轻度污秽 (A类) 时, 雾水电导率 (B类) 对绝缘子温升有明显的影响, 即绝缘子温升随着雾水电导率的增加而升高。以无盐雾下的温升作为基准, 在0.6、2.2、4.1 S/m三种雾水电导率下, 与基准温升的差值平均变化率分别为54.9%、101.2%、153.9%。与轻度污秽相比, 重污秽时雾水电导率对绝缘子温升的影响较小, 此时对应的平均差值变化率分别为3.9%、8.1%、23.8%, 即高盐雾环境下绝缘子温升存在饱和现象。

2) 在盐雾环境下污秽绝缘子湿润的过程中, 雾水电导率的增加不仅会加速绝缘子表面污秽达到饱和和湿润状态, 而且盐分的析出使得表面导电离子增

多, 电导率增大, 即雾水电导率对染污盐密具有附加作用, 从而影响绝缘子的温升。

3) 对含有劣化片的绝缘子串而言, 雾水电导率的增加与绝缘子表面湿污程度的增加对温升的影响具有等效性, 均是增加了污层中的导电离子, 降低了绝缘子表面电阻, 从而影响劣化片的发热情况。因此, 在盐雾环境中对绝缘子进行红外诊断时, 需结合现场盐雾浓度分析其对热成像结果的影响。

此外, 盐雾严重的情况下现场湿度较大, 使得绝缘子不断地与环境进行热交换, 造成红外图像边缘模糊。相对湿度对红外特征的影响如图10所示。由图10可知, 适度的湿度有利于绝缘子劣化特征的体现; 湿度过大时, 绝缘子表面可能出现凝露现象,

水珠的形成会使得绝缘子温升出现无序变化，绝缘子红外特征不再清晰。因此，在进行红外分析时，将不考虑相对湿度大于 90% 的情况。

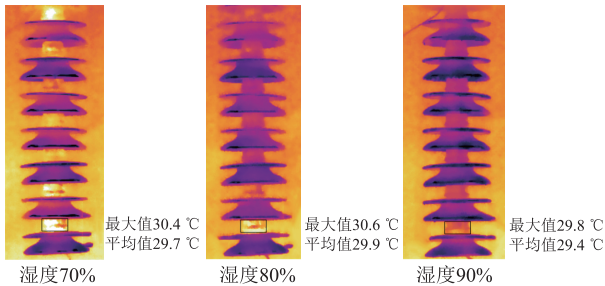


图 10 相对湿度对红外特征的影响

Fig.10 Influence of relative humidity on infrared features

3.3 不均匀污秽对红外检测的影响

受风速、电场力、重力等因素的协同作用，污秽在绝缘子表面并非均匀分布。对双伞型绝缘子而言，绝缘子上表面的积污量显著大于下表面的积污量，且表面积污主要集中在迎风侧伞径以及背风侧涡流形成处。此外，受气候季节的影响，绝缘子首末两端的污秽沉积量比中间部位的污秽量要高^[27]。

据此，为模拟不均匀污秽情况，选择 1 号和 7 号绝缘子上表面以及迎背风侧污秽易积聚处的染污盐密为 0.10 mg/cm²，其余位置的染污盐密为 0.03 mg/cm²，对比均匀涂污整串盐密为 0.10 mg/cm²，温度变化率及红外热像图如图 11 所示。

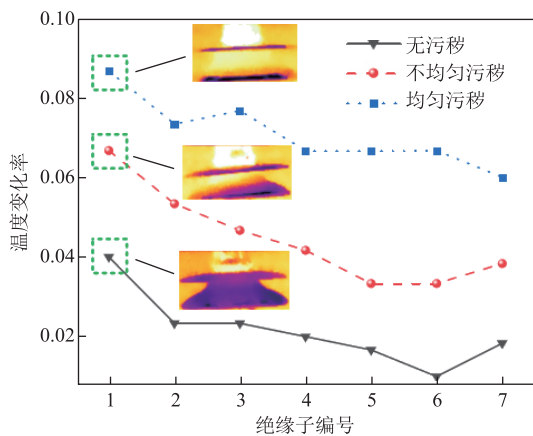


图 11 污秽分布对绝缘子串温升的影响

Fig.11 Influence of pollution distribution on temperature rise of insulator strings

由图 11 可知：

1) 相对于均匀污秽，污秽不均匀分布时绝缘子钢帽温度变化趋势与无污秽情况相似。这是因为表面污秽不均匀导致污秽量减小，因此湿润条件下电阻下降趋势减小，进而影响绝缘子温升。

2) 由于背风侧伞径处污秽量较迎风侧小，若串

中存在劣化绝缘子，依据 3.2.2 节提到的劣化片伞径局部发热现象，选择背风侧作为红外观测位置可更清晰地诊断出串中的劣化绝缘子。此外，由于首末两端伞裙表面污秽较为严重，绝缘子盘面发热更为明显，温升有可能高于劣化绝缘子，导致红外成像法会将其误判为劣化绝缘子，在实际工程应用中，尤其值得注意。

4 仿真分析

4.1 模型建立及验证

为验证上述试验结果，进一步分析污秽对劣化绝缘子发热的影响规律，通过有限元仿真软件建立绝缘子热-电场耦合模型，以此分析计算介质损耗传导电流发热及热传导协同作用下绝缘子串的温度分布。根据 XWP₂-160 盘型悬式瓷绝缘子的尺寸，构建等比例的绝缘子串仿真模型，如图 12 所示。

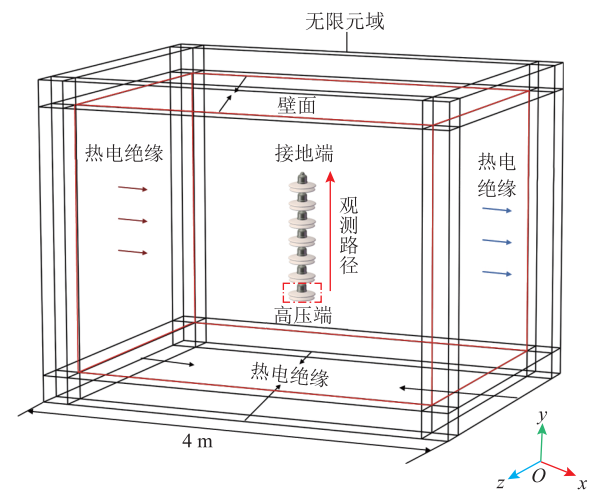
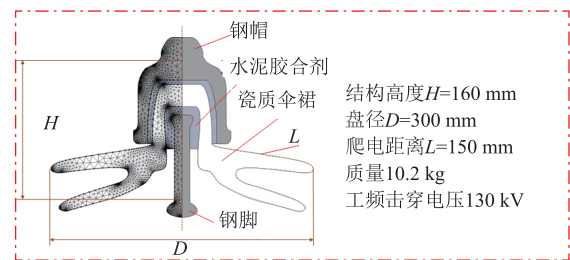


图 12 绝缘子串仿真模型

Fig.12 Insulator simulation model

在计算域中设置外边界条件为热电绝缘，在 1 号绝缘子钢脚处施加 63.5 kV 交流电压，设置 7 号绝缘子钢帽处接地，选择电磁热多物理场接口进行 50 Hz 频域计算，相关材料参数见表 2。在仿真计算中，通过改变钢帽与钢脚间瓷件以及水泥胶合剂的电导率来模拟零/低值绝缘子。将绝缘子表面设置为污秽水膜表征表面染污情况^[28]，根据饱和湿润时的

吸水量将污层厚度设置为 1 mm。根据 3.2.3 节分析可知，B 类污秽对劣化绝缘子串温升的影响可以等效为表面固体污秽（A 类污秽），因此，本文仿真计算只改变表面等值盐密（Equivalent Salt Deposit Density, ESDD）。等值盐密、等值灰密与表面水膜电导率的关系为^[29]

$$\sigma = 230\rho_{\text{ESDD}}\rho_{\text{NSDD}}^{0.575} \quad (5)$$

式中， ρ_{ESDD} 为等值盐密， mg/cm^2 ； ρ_{NSDD} 为等值灰密， mg/cm^2 ； σ 为水膜电导率， $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

表 2 材料参数

Tab.2 Material parameters

参数	数值		
	钢脚、钢帽	水泥胶合剂	瓷件
相对介电常数	10^{10}	8	6.5
电导率/ $(\mu\text{S}/\text{cm})$	1.2×10^{11}	1.7×10^{-9}	2×10^{-11}
导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	80.2	5	1.9
密度/ (kg/m^3)	7 860	3 600	2 300
比定压热容/ $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	449	800	825

为验证仿真模型的正确性，取零值绝缘子位于绝缘子串中 1 号位置的情况，设置表面污秽 $\rho_{\text{ESDD}} = 0.20 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、温度为试验环境温度 28°C ，恒压 60 min 后模型仿真结果与试验结果对比如图 13 所示。由图 13 可知，模型仿真结果与试验结果具有较好的一致性，两者之间最大误差低于 0.7%，验证了仿真模型的有效性。

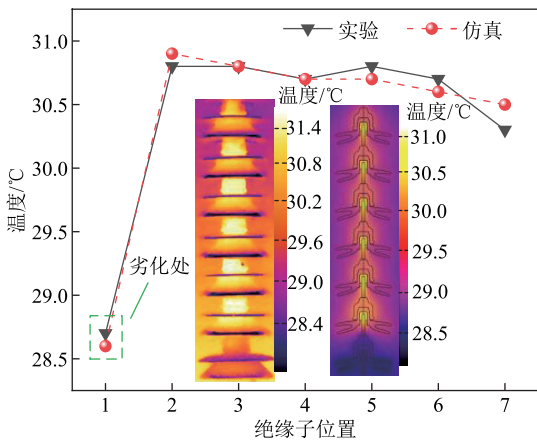


图 13 仿真模型验证

Fig.13 Simulation model validation

4.2 单片绝缘子温升分析

通过改变材料的电导率模拟七种劣化程度的绝缘子，劣化程度由重到轻排序为 I ~ VII，设置初始环境温度为 20°C 。单片绝缘子温升曲线如图 14 所示，温度分布云图如图 15 所示。

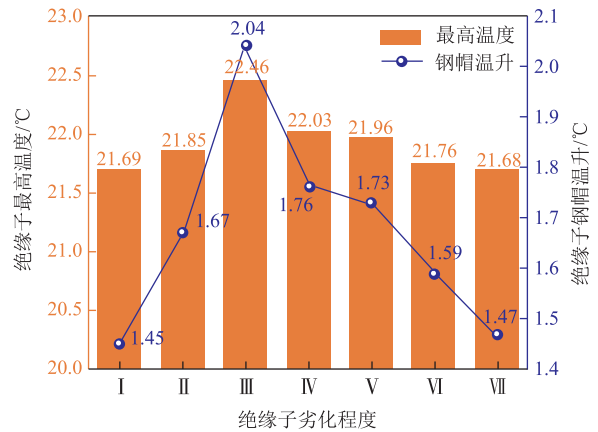


图 14 单片绝缘子温升曲线

Fig.14 Temperature rise of single insulator

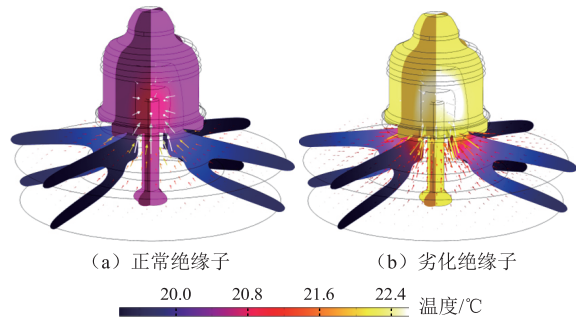


图 15 绝缘子温度分布云图

Fig.15 Temperature distribution cloud diagram of single insulator

分析图 14、图 15 可得如下结论：

1) 绝缘子的温度变化并非随着劣化程度变高而呈线性增长，其最高温度呈现先上升后下降的趋势。且随着劣化程度的改变，温升增长速率也发生变化，在温升最高点时增长速率达到最大。由电路理论可知，当劣化绝缘子等效阻抗与等效容抗相等时，发热功率最大，这与图 4 观测到的试验现象一致。

2) 从绝缘子温度分布云图可以看出，无论是劣化绝缘子还是正常绝缘子，其发热均集中于钢脚上端，热量以此为中心向周边传递，由于瓷件热阻较大，在表面无污秽情况下伞裙温度基本与环境温度一致。对于劣化绝缘子而言，其阻值大大降低，内部贯穿性电流发热导致钢帽温升明显，钢帽的温升趋势与绝缘子内部最大温升趋势基本一致，因此选择钢帽温度作为判断劣化绝缘子的标准具有科学性。

4.3 污秽对绝缘子串温升的影响

固定 2 号绝缘子为零值绝缘子，当其盘面涂有湿润污秽时，随污秽度的改变其温度分布云图与温度曲线如图 16 所示。由图 16 可知：

1) 随着绝缘子污秽程度的增加, 串中各处温升增大, 盘面温升较为明显。当污秽程度较轻时, 1 号正常绝缘子与 2 号零值绝缘子的钢帽温升差为 1.26℃, 而在中、重度污秽情况下差值分别增长到 2.43℃ 和 3.23℃, 可见零值绝缘子与相邻片的温升差逐渐增大。

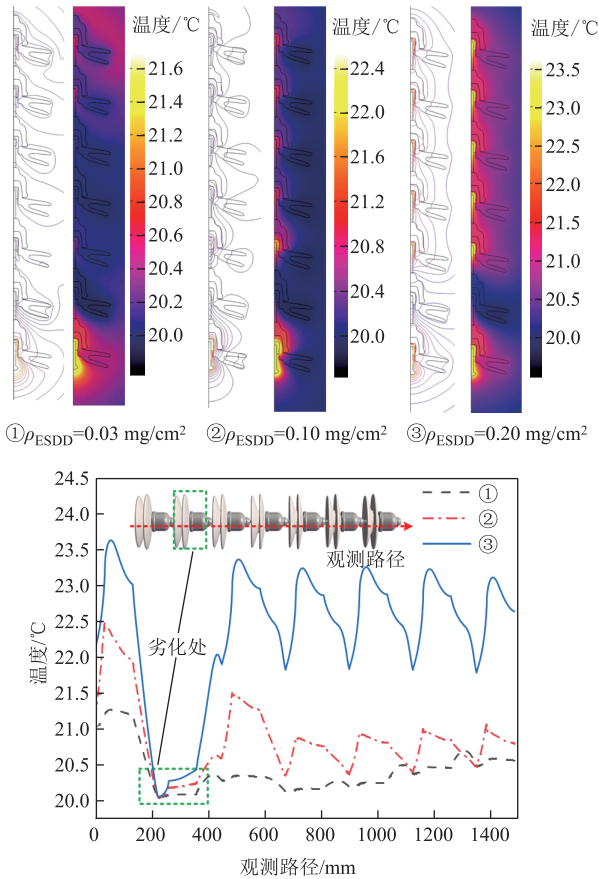


图 16 不同污秽下绝缘子发热情况

Fig.16 Heat generation of insulator strings under different pollution levels

2) 由于零值绝缘子在串中基本相当于短路, 因此会使得相邻绝缘子分担更高的电压, 对相邻绝缘子片的温升具有抬高作用, 这点在轻度污秽以及中度污秽的情况时均有所体现。但在表面污秽程度较重的情况下, 绝缘子电压分布中阻性成分的影响逐渐占据主导地位, 且随着盐密的增加, 绝缘子串电压分布更均匀, 因此绝缘子表面温度分布逐渐趋于均匀, 零值绝缘子的相邻温度抬高作用以及绝缘子串原本的马鞍状分布特征被削弱, 这与图 5 试验所得结论一致。

在轻度污秽情况下, 改变零值绝缘子在串中的位置, 所得绝缘子发热云图及温度曲线如图 17 所示。

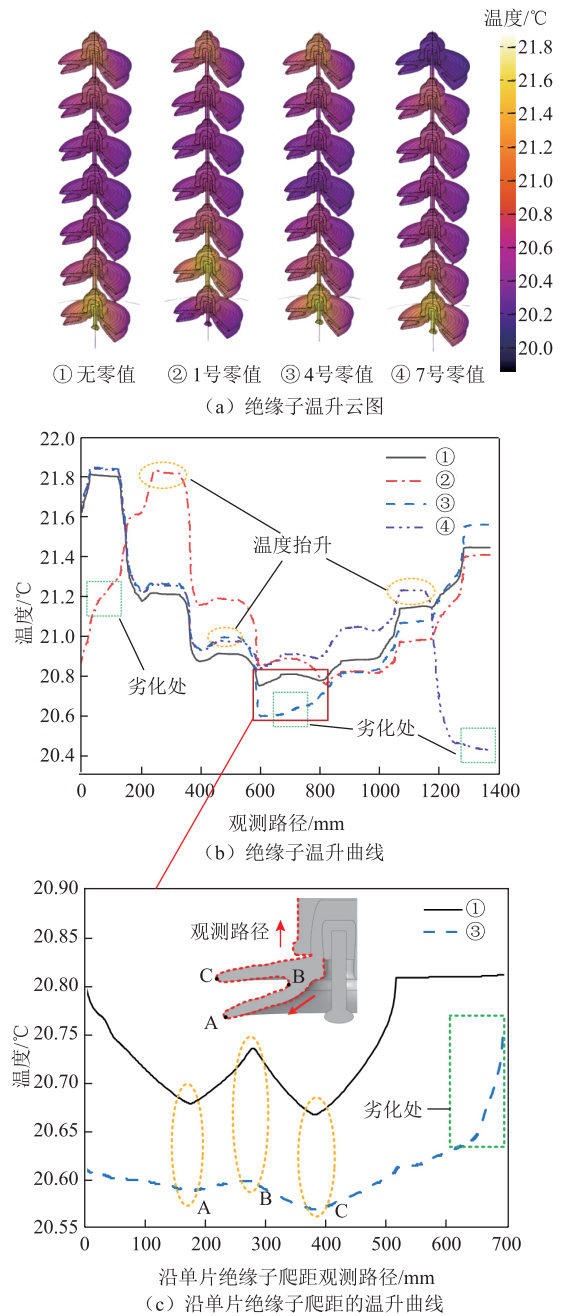


图 17 零值绝缘子发热情况

Fig.17 Heat generation of zero-value insulator

由图 17 可知:

1) 当零值绝缘子位于高压端时, 其与相邻绝缘子的温度差值最大, 而当零值绝缘子位于串中部时, 钢帽温升差值最小, 即表现出的负温升特性最不明显。由固体传热理论可知, 热量由高温区域向低温区域传递, 由于 2 号绝缘子具有较高的温度, 因此 2 号绝缘子钢脚产生的热量会向 1 号绝缘子传递, 导致 1 号位置零值绝缘子钢帽温度仍高于 4 号位置零值绝缘子。劣化绝缘子盘面温度低于相邻绝缘子, 在温度曲线中出现局部低点, 劣化片对相邻绝缘子

温度的抬升作用较明显。

2) 沿单片绝缘子爬距(图17c中A→B→C)提取温度,对比图17①与图17③可知,温度曲线中劣化绝缘子平均盘面温度低于正常绝缘子,且沿绝缘子中心轴线向外辐射热量的特征被削弱,盘面温度曲线中畸变点不明显。相较于正常绝缘子钢帽温度基本不变的情况,劣化绝缘子钢帽温度变化率增大,因此在红外成像过程中可借助上述特征对零值绝缘子进行识别。

5 结论

本文结合现场试验和有限元仿真研究了劣化位置、劣化阻值以及A/B类污秽等因素对劣化绝缘子串发热和红外检测的影响,得到结论如下:

1) 串中绝缘子温升总是随着绝缘子内阻减小呈现先升高后降低的趋势,同样阻值的劣化片位于高压端时其最大温升及温升增长速率均高于劣化片分别位于中压端和接地端的情况,其温度变化率分别为0.093、0.043和0.06。

2) 干燥污秽对劣化绝缘子发热的影响可忽略不计。固定B类污秽条件下,表面A类湿润污秽对发热的影响与劣化片在串中位置有关,随绝缘子表面湿污程度增大,各片温度趋于一致。与轻污秽相比,重污秽时的温度差值变化率仅有37.9%。

3) 雾水电导率(B类污秽)对染污盐密具有附加作用,通过增加导电离子数进一步影响绝缘子的温升。在不同污秽条件下,表面A类污秽低时雾水电导率对发热的影响要大于重染污条件,盐雾环境下绝缘子温升存在饱和现象。

4) 适度增大湿度有利于体现绝缘子劣化特征,而过大的湿度会导致其表面温度无序变化,影响红外成像结果,因此检测过程中不考虑相对湿度大于90%的情况。背风侧伞径处污秽量小,选择背风侧作为红外观测位置可更清晰地诊断出绝缘子串中的劣化绝缘子。

参考文献

[1] 赵云鹏,胡玉耀,蒋兴良,等. 绝缘子不均匀积污成因及其对交流闪络特性的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 186-195.
Zhao Yunpeng, Hu Yuyao, Jiang Xingliang, et al. Causes of uneven pollution accumulation on the insulator and its influence on AC flashover characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement

and Instrumentation, 2023, 37(12): 186-195.

- [2] 秦锋,王旭桐,陈伟,等. 强电磁脉冲下线路绝缘子闪络特性试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3640-3650.
Qin Feng, Wang Xutong, Chen Wei, et al. Experimental study on flashover characteristics of line insulator under strong electromagnetic pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3640-3650.
- [3] 李群,高嵩,杨生哲,等. 国产特高压大吨位悬式瓷绝缘子机电性能提升与工艺优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5304-5315.
Li Qun, Gao Song, Yang Shengzhe, et al. Mechanical and electrical performance improvement and process optimization of domestic UHV large tonnage suspension porcelain insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5304-5315.
- [4] Wang Shenghui, Jiang Tingyue, Li Wei, et al. Infrared and UV imaging characteristics of insulator strings containing a zero-value insulator based on experiment and multi-physics simulation[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(3): 374-382.
- [5] 项文阔. 红外检测技术在变电所设备故障检测中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
Xiang Wenkuo. Application of infrared detection technology in fault detection of substation equipment [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [6] 胡雨婷,王黎明,尹芳辉. 碳纤维复合芯导线应用于特高压大跨越线路的脱冰工况仿真[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1967-1974.
Hu Yuting, Wang Liming, Yin Fanghui. Simulation of ice-shedding of UHV long span transmission line with carbon fiber composite conductor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1967-1974.
- [7] 周学明,尹骏刚,胡丹晖,等. 超—特高压长串瓷绝缘子温度分布曲线拼接方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 199-205.
Zhou Xueming, Yin Jungang, Hu Danhui, et al. Temperature distribution curve splicing method for EHV-UHV long string porcelain insulators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,

- 37(3): 199-205.
- [8] 张血琴, 周志鹏, 郭裕钧, 等. 不同材质绝缘子污秽等级高光谱检测方法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1946-1955.
- Zhang Xueqin, Zhou Zhipeng, Guo Yujun, et al. Detection method of contamination grades of insulators with different materials based on hyperspectral technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1946-1955.
- [9] 邱刚, 陈杰, 张迺龙, 等. 基于YOLOv3和HSV颜色空间的绝缘子低/零值故障诊断研究[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 148-153.
- Qiu Gang, Chen Jie, Zhang Nailong, et al. Research of low/zero defect diagnosis of porcelain insulator based on YOLOv3 and HSV color space image processing technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 148-153.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定: GB/T 26218—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [11] 金立军, 张达, 段绍辉, 等. 基于红外与紫外图像信息融合的绝缘子污秽状态识别[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 309-318.
- Jin Lijun, Zhang Da, Duan Shaohui, et al. Recognition of contamination grades of insulators based on IR and UV image information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 309-318.
- [12] 曹雯, 李振涛, 申巍, 等. 输电线路中污秽复合绝缘子异常发热研究[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6): 60-68.
- Cao Wen, Li Zhentao, Shen Wei, et al. Study on abnormal heating of polluted composite insulators in transmission lines[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6): 60-68.
- [13] 王欣. 污秽对绝缘子串电压分布影响的仿真与实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Wang Xin. Simulation and experimental research on the influence of contamination on voltage distribution of insulator strings[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [14] 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-EPSC, 2019, 31(3): 89-95.
- [15] 彭子健, 张也, 付强, 等. 高压瓷绝缘子红外热像检测盲区研究[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3705-3712.
- Peng Zijian, Zhang Ye, Fu Qiang, et al. A study of non-detection areas in infrared thermal images of HV insulators[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3705-3712.
- [16] 张也, 彭子健, 付强, 等. 环境湿度对瓷质绝缘子串电压分布及红外热像检测的影响分析[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1342-1349.
- Zhang Ye, Peng Zijian, Fu Qiang, et al. Analysis of environment humidity influence on voltage distribution and infrared thermal image detection of porcelain insulator strings[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1342-1349.
- [17] 程洋, 夏令志, 牛雷, 等. 500 kV 双联耐张瓷绝缘子串的串间放电现象[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 231-237.
- Cheng Yang, Xia Lingzhi, Niu Lei, et al. Research on discharge phenomenon of a 500 kV double tension porcelain insulator string[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 231-237.
- [18] 童杰, 肖智根, 高强, 等. 基于红外技术的输电线路瓷绝缘子检测研究[J]. 先进材料研究, 2014, 1046: 200-204.
- Tong Jie, Xiao Zhigen, Gao Qiang, et al. Research on detection of transmission line porcelain insulator based on infrared technology[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1046: 200-204.
- [19] 余欧然. 基于高光谱与红外图像信息融合的绝缘子污秽程度检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- Yu Ouran. Detection of insulator contamination based on information fusion of hyperspectral and infrared images[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [20] 郭晨鋈, 涂彦昕, 刘立帅, 等. 复合支柱绝缘子界面热波模型及其界面缺陷无损检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7160-7169.
- Guo Chenjun, Tu Yanxin, Liu Lishuai, et al. Interfacial thermal wave model of composite post insulator and its nondestructive detection method on interfacial defects[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,

- 41(20): 7160-7169.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验: GB/T 4585—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [22] 蒋兴良, 王茂政, 袁一钧, 等. 不均匀积污绝缘子雷电冲击闪络特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6461-6470, 6552.
Jiang Xingliang, Wang Maozheng, Yuan Yijun, et al. Lightning impulse flashover performance of non-uniform pollution insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6461-6470, 6552.
- [23] 张东东, 罗威, 黄宵宁, 等. 染污绝缘子放电空间电场时频特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2873-2886.
Zhang Dongdong, Luo Wei, Huang Xiaoning, et al. Time and frequency domain characteristics of spatial electric field during the discharge of polluted insulator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2873-2886.
- [24] 国家技术监督局. 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准: GB/T 16434—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [25] 刘琴, 李瑶琴, 谢梁, 等. 盐雾环境下清洁和染污绝缘子交流耐压特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2828-2834.
Liu Qin, Li Yaoqin, Xie Liang, et al. AC withstand characteristics of clean and polluted insulators in salt-fog[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2828-2834.
- [26] 裴少通, 马子儒, 刘云鹏, 等. 500 kV 输电线路劣化瓷绝缘子非线性发热特性的红外分析[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 33-40.
Pei Shaotong, Ma Ziru, Liu Yunpeng, et al. Infrared analysis of nonlinear heating characteristics of deteriorated porcelain insulator of 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 33-40.
- [27] 王欣. 污雾环境下双伞瓷绝缘子积污特性模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
Wang Xin. Simulation study on sewage characteristics of porcelain double umbrella insulators in sewage environment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [28] 张东东, 张志劲, 蒋兴良, 等. XP-160 绝缘子直流快速积污过程仿真及分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 791-798.
Zhang Dongdong, Zhang Zhijin, Jiang Xingliang, et al. Simulation study on fast DC contamination process of XP-160 insulator and its analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 791-798.
- [29] 刘云鹏, 张凯元, 付炜平, 等. 不同湿度下低值瓷质绝缘子的发热特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1741-1749.
Liu Yunpeng, Zhang Kaiyuan, Fu Weiping, et al. Heating characteristics of deteriorated porcelain insulator under different humidities[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1741-1749.

作者简介

孙瑞筱 男, 2000年生, 硕士研究生, 研究方向为极端环境下输电线路外绝缘状态评估。

E-mail: sunwangruixiao@163.com

胡玉耀 男, 1989年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为极端环境下输电线路外绝缘状态评估。

E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn (通信作者)

Analysis of Temperature Rise and Infrared Feature of Faulty Porcelain Insulators under Different Contamination Effects

Sun Ruixiao¹ Hu Yuyao¹ Jiang Xingliang² Xian Richang¹ Chen Yu³

(1. College of Electric and Electronic Engineering Shandong University of Technology

Zibo 255000 China

2. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station

Chongqing University Chongqing 400044 China

3. Shandong Huineng Electric Co. Ltd Zibo 255000 China)

Abstract During the long operational time, porcelain insulators are subjected to a synergistic effect of the electrical, thermal, mechanical stresses, and environmental factors, which causes insulation degradation and lead

to low and zero resistance insulators. Compared to traditional methods, infrared imaging has been widely used in the detection of deteriorated insulators and surface contamination because of its advantages of non-stop operation, non-contact and anti-electromagnetic interference. However, there is limited research on the impact of contamination on the heating characteristics of degraded insulators. Moreover, there is a lack of research on the effects of different types of contamination (category A and category B) on the heating characteristics of the insulators and the infrared detection of degraded insulators. In response to the above issues, the effects of contamination level, deterioration resistance and the location of deteriorated unit on infrared detection of the insulators were investigated through field tests and simulation analysis, obtaining the heating patterns of deteriorated insulators under different pollution conditions.

Firstly, the relationship between temperature rise, deterioration and surface contamination was explored through a heating model of porcelain insulator. Secondly, a test platform was built to simulate the operating conditions of 110 kV insulators, and the infrared imaging patterns of insulator strings were analyzed by changing the level of contamination resistance of deteriorated insulator, and the position of degraded insulators in the string. Finally, a thermal-electric coupling model of the insulator was established using finite element method to analyze and calculate the temperature distribution of insulator strings under the combined effects of dielectric loss, conduction current and heat conduction. This model is then used to validate the experimental results.

The results show that the temperature rise of the insulator in the string initially increases and then decreases with the decrease in its resistance. The maximum temperature rise and temperature growth rate of degraded piece with the same resistance value located at the high-voltage end are higher than those of degraded piece located at the medium-voltage end and the ground end, with temperature change rates of 0.093, 0.04 and 0.06, respectively. The overall temperature of steel cap increases with the increase in category A contamination. When the surface wet contamination is relatively light, the temperature variation rate range of each piece in the string is 0.014~0.107, while under severe wet contamination, it ranges from 0.087 to 0.12. The conductivity of fog water (category B contamination) has a significant impact on the temperature rise of the insulator, which increases with the increment of fog water conductivity. Taking the temperature rise under no salt fog condition as the benchmark, the overall average temperature change rates under fog water conductivities of 0.6, 2.2 and 4.1 S/m are 54.9%, 101.2% and 153.9%, respectively.

The following conclusions can be drawn from the test results and simulation analysis: (1) The impact of dry contamination on the heating of deteriorated insulator is negligible. Under conditions of fixed category B contamination, the effect of category A wet contamination on heating is related to the position of deteriorated piece in the string. Furthermore, as the degree of wet contamination increases, the temperature of each piece tends to be consistent. (2) Fog water conductivity (category B contamination) has an additional effect on salt deposit density, which further affects the temperature rise of the insulator by increasing the number of conductive ions. There is a saturation phenomenon in insulator temperature rise in salt fog environments. (3) The excessive humidity can cause disordered temperature changes on the insulator surface, therefore, humidity greater than 90% is not considered during the detection. The leeward side, with small amount of contamination, is selected as the infrared observation position to more clearly diagnose deteriorated insulator in the string.

Keywords: Category A/B contamination, faulty insulator, heating characteristics, infrared imaging, temperature rise

(编辑 李冰)