

在役瓷绝缘子串温度梯度分布相关性分析

胡丹晖¹, 周学明¹, 易福明², 陈 钊³, 陆倚鹏⁴, 朱向前⁴, 尹骏刚⁴

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南 长沙 410082;
3. 国网河南省电力公司驻马店供电公司, 河南 驻马店 467000; 4. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:在绝缘子现场红外检测中,零值绝缘子铁帽温差往往达不到相关标准所规定的阈值,易造成漏判。为进一步提高瓷绝缘子红外测零技术的准确率,提出一种结合铁帽温差阈值法和温度梯度相关系数法的双判据零值检测方法,并开展变电站内盘形悬式绝缘子红外检测对照试验。试验结果表明:在适宜的检测环境条件下,当铁帽温差阈值法检测结果出现模糊度时,通过研究温度梯度分布相关系数分散特性,可以进一步确认零值是否发生,减少零值漏检概率;在不适宜的检测环境条件下,温差阈值法检测结果的模糊度增加,温度梯度相关系数分散性增大,正常绝缘子串和含零值绝缘子串温度梯度相关系数区分度也随之下降。

关 键 词:瓷绝缘子;红外检测;温度梯度分布;相关系数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.021 中图分类号:TM85 文章编号:1673-9140(2021)02-0172-08

Correlation analysis of temperature gradients distribution of porcelain insulator strings in service

HU Danhui¹, ZHOU Xueming¹, YI Fuming², CHEN Zhao³,
LU Yipeng⁴, ZHU Xiangqian⁴, YIN Jungang⁴

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. Hunan HDHL Electric & Information Technology Co., Ltd., Changsha 410285, China; 3. Zhumadian Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhumadian 467000, China; 4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In the process of porcelain insulator infrared detection, the missing judgment may happen due to the temperature difference of a zero value insulator failing to reach the threshold specified by the relevant standards. In order to improve the accuracy of the infrared detection, this article proposes a new method combining the iron cap temperature difference threshold method and the temperature gradient correlation coefficient method. Infrared detection field experiment of disc suspension insulators in substation is conducted. The test results show that under the suitable environment conditions, the zero value insulator can be confirmed by studying the dispersion characteristics of temperature gradient distribution correlation coefficients, while the result of difference threshold method for iron cap temperature is unstable. Thus, the missing judgment probability can be decreased. By contrast, under the unsuitable environment conditions, the dispersion of the temperature gradient correlation coefficient increases with the increase of the

收稿日期:2019-09-29;修回日期:2019-12-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技指南项目(52153219000F)

通信作者:尹骏刚(1978-),男,博士,副研究员,主要从事电力系统及其自动化研究;E-mail:yinjungang126@126.com

ambiguity for the temperature difference threshold method. Reduction occurs on the discrimination degree of the temperature gradient correlation coefficient between the normal insulator string and the zero value insulator string.

Key words: porcelain insulator; infrared detection; temperature gradients distribution; correlation coefficient

瓷绝缘子是一种重要的电气绝缘设备,在各电压等级输电线路、变电站中应用十分广泛。在长期运行过程中,绝缘子串受到强机电负荷、酸雨、大风、覆冰、紫外线、污秽、温湿度剧变等多种复杂因素影响,易出现低零值等劣化故障,导致其绝缘性能逐渐下降^[1-2]。低零值绝缘子的存在,将可能导致局放、闪络甚至炸裂、掉串等现象,对电网安全稳定运行构成巨大威胁^[3]。例如,近年来在江西、安徽、甘肃、广西等地,曾相继发生绝缘子严重劣化事件^[4-6]。因此,对于在役瓷绝缘子的劣化检测正引起越来越多的关注。

目前,瓷绝缘子低零值检测方法主要分为两类。一类是电量检测法^[7];主要包括火花间隙法、绝缘电阻法、电压分布法、泄露电流法等。使用这些方法检测时,人工操作难度大,风险高,效率低且易造成误检和漏检。另一类是非电量检测法:主要包括红外热像法、紫外成像法、超声波法等。其中,红外热像法是最常用的非接触式带电检测方法。其原理是根据劣化绝缘子铁帽与相邻正常绝缘子铁帽相比呈现不同温升特征来进行判别(铁帽温差阈值法)。在现场运维检修过程中,目前普遍以电力行业标准 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》中规定的铁帽处正负 1K 温差分别作为低、零值绝缘子红外检测的判别依据^[8]。由于受到温度、湿度、风速、气压、光照度、污秽等多种环境因素的影响,低零值绝缘子的温升规律和红外特征往往呈现出一定的动态性和复杂性^[9]。所以,红外测温需要在适宜的环境条件下进行,即在一定程度上受到检测窗口的约束。对于在现场所获取的绝缘子测温数据,若依据单一的铁帽温差指标进行低零值判别,将存在一定的误检和漏检概率。为进一步提高绝缘子红外零值诊断的准确率,该文提出一种绝缘子串温差梯度分布相关性分析方法,将铁帽温差值与温差梯度相关系数相结合进行综合研判。

相关系数是研究变量之间线性相关程度的统计量^[10],可用于描述 2 个事件的相随共现或者相随共

变的情况。相关系数越大,表示变量之间相关程度越高;相关系数越小,则表示变量之间的相关程度越低。相关系数取值范围为 $[-1, 1]$ ^[11];若相关系数为 0,表示两者不相关。相关系数分析方法广泛应用于理学、工程学、经济学、统计学、医学^[12]等多学科领域。

该文针对国内某 500 kV 变电站内若干盘形悬式瓷绝缘子串的多次重复测温数据,在铁帽温差阈值法的基础上,首次将相关系数分析方法引入零值诊断流程,形成综合判别方法,为持续提高绝缘子红外测零准确度提供了一条新的路径。

1 理论基础

绝缘子的发热功率主要由三部分组成^[13]:①绝缘介质在极化效应下引起的介质损耗发热功率;②绝缘子表面污秽导致的泄露电流引起的发热功率;③绝缘子内部传导电流产生的发热功率。其表达式分别为

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

$$P_w = U_n^2 / R_w \quad (2)$$

$$P_1 = U_n^2 / R_1 \quad (3)$$

式(1)~(3)中 U_n 为第 n 片绝缘子分布电压值; ω 为角频率; C_0 为绝缘子的极间电容; δ 为绝缘子介质损耗角; R_j 为介质损耗等效电阻; R_w 为表面电阻; R_1 为内部劣化电阻。因此,单片绝缘子的绝缘电阻可等效为 R_j 、 R_w 和 R_1 三者的并联形式,发热模型等效为极间电容与绝缘电阻的并联形式,如图 1 所示。

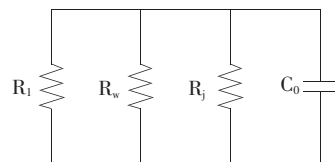


图 1 单片绝缘子发热模型

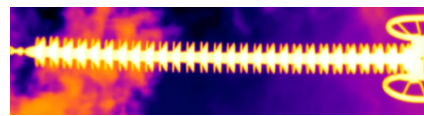
Figure 1 Heating model of single insulator

绝缘子串电压分布由单片极间电容(30~50 pF)、对地电容(4~5 pF)、对导线电容(0.5~1 pF)及绝缘电阻所形成的阻容网络决定。正常情况下串电压分布呈现不规则的马鞍形。若有低、零值绝缘子片存在,则该片分布电压发生突变,电压值降低,且分别呈现正、负温升的红外特征^[14]。环境湿度较低时,正常绝缘子串的温度分布主要取决于分布电容,其表面电阻可视为无穷大。当绝缘子表面积污且环境湿度较大时,绝缘子表面电阻的减小使绝缘子电压分布呈现阻容性分布,绝缘子表面泄漏电流发热功率增加,引起绝缘子串温度分布变化^[15]。此外,环境温度和风速也是引起绝缘子串温度分布变化的重要因素。因此,瓷绝缘子红外测温需要在适宜的环境条件下进行^[16];并且红外检测判据的确定需要经过深入的理论研究和大量的现场试验。

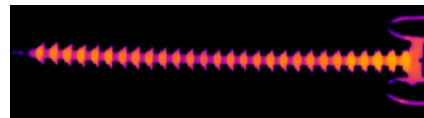
2 现场试验及红外图谱分析

选择南方某地某 500 kV 变电站作为驻点监测试验点。该地属亚热带季风气候区,四季分明,光照充足,空气湿润,雨量充沛。年平均气温为 15.9~17.0℃,年平均相对湿度为 76%~81%,年降水量超 1 300 mm,年日照时数为 1 471.2 h。以站内 500 kV 侧 51 串盘形悬式瓷绝缘子(每串含 28 片)作为研究对象,利用 FLIR T 640 红外热像仪在不同时间点进行多次红外测温。驻点监测试验之前,已经采用火花间隙法对 51 串绝缘子进行了带电检测。共发现零值绝缘子 3 片,分布在 3 串中。

对于所拍摄的绝缘子串红外图谱,可先通过背景消除、图像去噪及增强等算法进行预处理。例如,某正常绝缘子串、含零值绝缘子串的原图及预处理后红外图谱分别如图 2、3 所示。图 2(b)中绝缘子铁帽亮度分布较均匀,无明显突变,温度变化符合渐变规律;图 3(b)中左起第 2 片绝缘子亮度明显暗于周围 2 片,温差发生突变,可初步判定为零值。但是该方法完全依赖肉眼,存在较大的主观性,容易造成误判和漏判。因此,需要从红外图谱中提取铁帽温度数据,利用信息处理算法进行进一步的特征分析与识别。



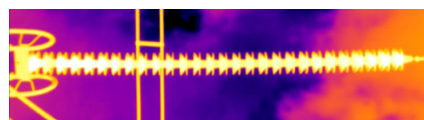
(a)正常绝缘子串原始红外图谱



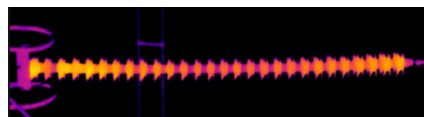
(b)经过预处理的正常绝缘子串红外图谱

图 2 正常绝缘子串红外图谱

Figure 2 Infrared diagram of normal insulator string



(a)含零值绝缘子串原始红外图谱



(b)经过预处理的含零值绝缘子串红外图谱

图 3 含零值绝缘子串红外图谱(左起第 2 片为零值)

Figure 3 Infrared diagram of zero-valued insulator string

3 相关系数分析

3.1 温度梯度相关系数法

该文提出一种将铁帽温差阈值法与温度梯度相关系数法相结合的方法进行红外零值诊断,具体流程如下。

1)通过红外图谱预处理,提取每串绝缘子每片绝缘子铁帽温度,即对铁帽区域内各点温度数据求取算数平均值,形成温度分布曲线。

2)计算串中第 n 片绝缘子(非末片,自导线侧开始计数)温度梯度值,形成所有待测绝缘子串温度梯度分布矩阵。温度(℃)梯度计算公式为

$$|\nabla T_n| = \beta \cdot \frac{T_{n+1} - T_n}{T_n + 273.15} \quad (4)$$

式中 β 为比例因子,这里取值为 1 000,通过温度分布矩阵,可以反映整串绝缘子中相邻铁帽温度的变化率。

3)通过求算数平均,得到待测绝缘子串温度梯

度分布平均值曲线。

4) 计算每串绝缘子温度梯度分布曲线和平均值曲线的相关系数^[17-18], 并通过散点图进行展示, 计算公式分别为

$$r = \frac{S_{\text{cov}}(X, Y)}{\sqrt{D[X]D[Y]}} \quad (5)$$

$$r' = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

其中, $S_{\text{cov}}(X, Y)$ 为变量 X 与变量 Y 的协方差, $D[X]$ 为 X 的方差, $D[Y]$ 为 Y 的方差。

5) 结合铁帽温差阈值法进行综合判断, 即先按照 DL/T 664—2016 标准筛查所有绝缘子串, 判断是否出现温差绝对值大于 1 K 的低零值绝缘子。对于非末片绝缘子片温差绝对值较大 (0.3~1 K) 的绝缘子串, 按步骤 4 计算相关系数。若相关系数整体分散性不大, 形成强相关系数簇和弱相关系数簇, 且两簇之间最小距离 (Δ_{min}) 不小于 0.4, 则判别该串存在劣化。此外, 对于末片绝缘子可结合三相对比和历史数据对比等方法进行判别。

3.2 数据分析

该次试验针对相同的 51 串绝缘子, 在 2 个时间段实施红外拍摄。第 1 次从 14:00 开始, 第 2 次从 18:00 开始, 拍摄时间间隔 4 h。在间隔期间变电站下了一场阵雨, 雨后空气湿度大幅增加, 温度明显降低。具体环境参数如表 1 所示。

表 1 现场试验环境参数

Table 1 Environmental parameters of field test

时刻	温度/℃	湿度/%	风速/(m/s)
雨前 14:00	30.2	73	0.5
雨后 18:00	23.3	95	2.3

1) 雨前数据分析。

依据 DL/T 664—2016 标准, 此时的温度、湿度、风速等环境条件适合于绝缘子红外检测。根据所获取温度数据, 按照式 (4) 计算每串绝缘子的 27 个温度梯度值, 形成 51 串绝缘子的 51×27 温度梯度分布矩阵, 并计算相应的相关系数, 如表 2 所示。

表 2 雨前温度梯度矩阵及相关系数

Table 2 Temperature gradients matrix and correlation coefficients before rain

序号	雨前温度梯度矩阵与相关系数 (绝缘子片自导线侧开始计数)				相关系数
	$n=1$	$n=2$...	$n=27$	
1	-0.137	0.062	...	4.270	0.974
2	-0.346	-0.189	...	3.722	0.991
...
51	-0.169	-0.485	...	1.407	0.913
平均值	-0.402	-0.076	...	2.920	—

48 串正常绝缘子温度分布曲线如图 4(a) 所示, 各条曲线均呈现不对称马鞍形特征。由于均压环的作用, 绝缘子串电压分布较均匀, 温度分布曲线较平滑, 高压端绝缘子温度稍高于中间段。由图 4(b) 可知, 48 串正常绝缘子温度梯度分布也相应地较平滑。而在图 4(c) 中, 有 3 串绝缘子 (第 5 串、第 21 串、第 32 串) 温度梯度曲线出现了较大突变。其中, 根据火花间隙法检测结果可知, 第 5 串第 8 片、第 21 串第 2 片、第 32 串第 8 片的温度为零值 (均从导线侧开始计数)。但是从图 5 所示中可以读出, 此 3 片与各自相邻片的温差分别约为 -0.5、-0.7、-0.4 °C, 若依据 DL/T 664—2016 标准所规定的负 1 K 零值判据, 将造成漏判。此时, 应采用相关系数法进行综合分析。

51 个相关系数所对应的散点如图 6 所示, 3 个空心点分别对应于含零值绝缘子串的相关系数, 48 个实心点对应其余的正常绝缘子串。空心点所示相关系数值均不大于 0.4, 相关性较弱; 而实心点所示相关系数值均在 0.9~1 之间, 分散性很小, 体现出强相关性。空心点簇和实心点簇的间距约 0.5, 因此, 可将含零值绝缘子串和正常绝缘子串进行明显区分。

2) 雨后数据分析。

此时的环境湿度偏高, 风速偏大, 依据 DL/T 664—2016 标准不适宜开展绝缘子红外检测。类似的, 通过计算可得到雨后温度梯度矩阵和相应的相关系数, 如表 3 所示。从图 7 所示中可以读出, 此 3 片与各自相邻片的温差分别为 -0.3、-0.3、-0.2 °C, 温差特征较之前明显下降。

雨后相关系数散点分布如图 8 所示。与雨前散

点分布明显不同,此时实心点簇分布变得比较杂乱,分散性较大,其相关系数值的变化范围大幅增加(0.4~0.8);空心点簇和实心点簇的间距约为0.2,

含零值绝缘子串和正常绝缘子串区分度较雨前大幅下降。此结果从另外一个角度再次验证了绝缘子红外检测需要在适宜的条件下进行。

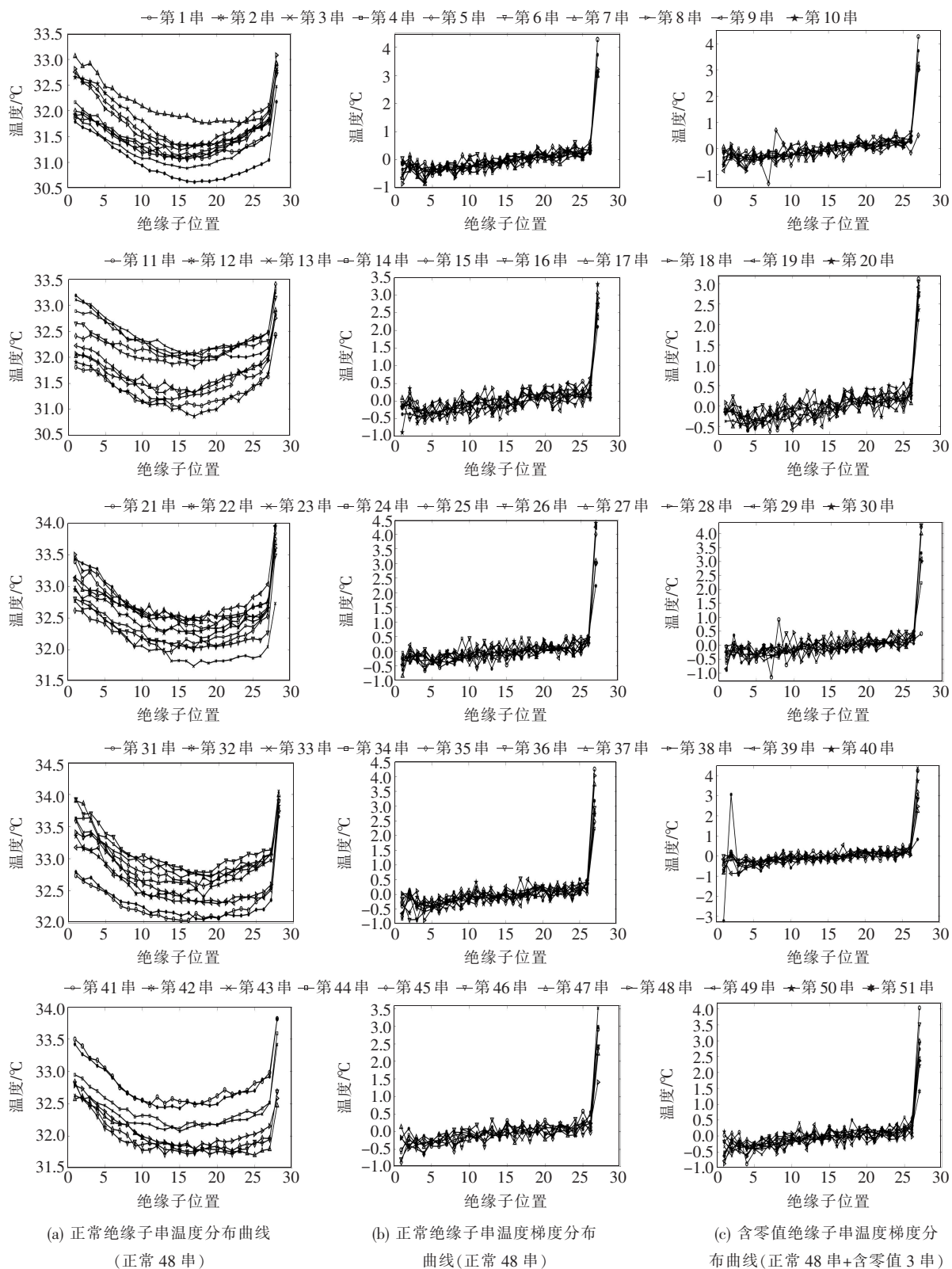


图 4 雨前温度及梯度分布曲线

Figure 4 Line chart of temperature and gradients before rain

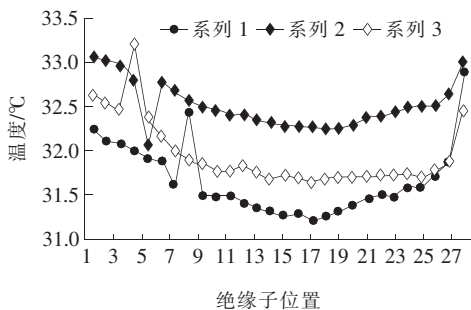


图 5 雨前含劣化绝缘子串温度分布曲线

Figure 5 Temperature distribution diagram of zero-valued insulator strings before rain

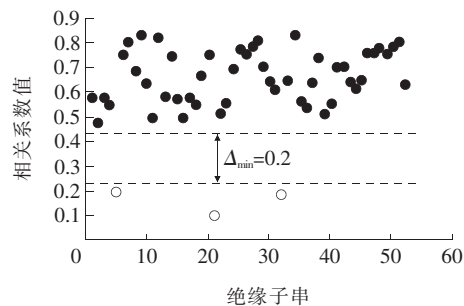


图 8 雨后相关系数散点分布

Figure 8 Spot diagram of correlation coefficients after rain

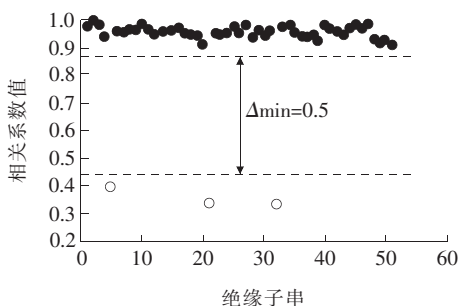


图 6 雨前相关系数散点分布

Figure 6 Spot diagram of correlation coefficients before rain

表 3 雨后温度梯度矩阵及相关系数

Table 3 Temperature gradients matrix and correlation coefficients after rain

序号	雨后温度梯度矩阵与相关系数 (绝缘子片自导线侧开始计数)				相关系数
	$n=1$	$n=2$...	$n=27$	
1	0.101	-0.473	...	-0.615	0.584
2	-0.062	-0.473	...	-0.664	0.486
...
51	-0.581	0.918	...	-1.661	0.760
平均值	-0.096	0.099	...	-0.909	-

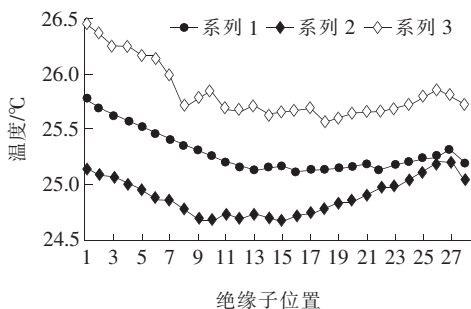


图 7 雨后含劣化绝缘子串温度分布曲线

Figure 7 Temperature distribution diagram of zero-valued insulator strings

上述 2 组对照试验说明,在适宜的检测环境条件下,零值绝缘子温差阈值法的结果与标准阈值存在一定偏差(存在一定模糊度),此时可将温度梯度相关系数结合起来进行综合研判,提高绝缘子串红外检测准确率。在不适宜的检测环境条件下,温差阈值法的结果与标准阈值存在较大偏差,温度梯度相关系数法的区分度也随之下降。

4 结语

1)该文针对某变电站内 51 串盘形悬式瓷绝缘子进行了 2 组红外成像对照试验,统计分析了温度梯度分布相关性,提出了一种铁帽温差阈值法和温度梯度相关系数法相结合的零值绝缘子判别方法;

2)绝缘子红外检测需要在适宜的环境条件下进行。此时,正常绝缘子串和含零值绝缘子串温度梯度相关系数存在较明显区分度,可联合温差阈值法进行零值综合判别,从而解决单一温差阈值法的模糊度问题;

3)在不适宜的检测环境条件下,绝缘子温度特征变得不明显,温差阈值法结果的模糊度增加。此时,正常绝缘子串和含零值绝缘子串温度梯度相关系数区分度下降。

后续工作中应开展大量的绝缘子红外对照试验,积累足够的温度数据,深入探究温度梯度相关系数法的适用性,并结合人工智能方法进行零值判别,探索一条提高绝缘子串测零准确率的新路径。

参考文献:

- [1] 李智琦, 罗日成, 吴东, 等. 500 kV 变电站绝缘子串均压环结构优化分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):171-176.
LI Zhiqi, LUO Richeng, WU Dong, et al. Optimization analysis of grading ring structure for insulator string in a 500 kV substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):171-176.
- [2] 宋刚, 沈国辉, 包玉南, 等. 耐张串对 UHV 导线弧垂影响的现场实测和理论分析[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 142-149.
SONG Gang, SHEN Guohui, BAO Yunan, et al. Full-scale testing and theoretical analysis of influence of tension insulator strings on the sag of UHV conductors [J]. Electric Power, 2021, 54(1):142-149.
- [3] 韩俊, 谢珍建, 黄河, 等. 基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(1):63-68+117.
HAN Jun, XIE Zhenjian, HUANG He, et al. Unit mesh reliability planning for distribution network based on outage cost calculation and cost analysis[J]. Smart Power, 2020, 48(1):63-68+117.
- [4] 夏令志, 程登峰, 秦金飞, 等. 一起 220 kV 架空输电线路双伞型瓷绝缘子炸裂故障分析[J]. 电气技术, 2017(9): 72-74+80.
XIA Lingzhi, CHENG Dengfeng, QIN Jinfei, et al. The analysis on a burst fault of double umbrella type porcelain insulators on a 220 kV overhead transmission line [J]. Electrical Engineering, 2017(9):72-74+80.
- [5] 卢奇, 周学明, 张斌, 等. 高压输电线路瓷质绝缘子炸裂分析及对策[J]. 湖北电力, 2019, 43(6):22-27.
LU Qi, ZHOU Xueming, ZHANG Bin, et al. Analysis and countermeasures of porcelain insulator burst for high-voltage transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2019, 43(6):22-27.
- [6] 王平, 李抗, 耿江海, 等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 93-98.
WANG Ping, LI Kang, GENG Jianghai, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 93-98.
- [7] 颜肃, 张玮亚, 李宏仲, 等. 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19):94-99.
YAN Su, ZHANG Weiya, LI Hongzhong, et al. Research on fast fault diagnosis method of transmission line based on artificial intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19):94-99.
- [8] 杨玲, 陈颖平, 黄继盛, 等. 环氧绝缘材料电气及机械性能对电痕特性的影响[J]. 高压电器, 2020, 56(10):98-103.
YANG Ling, CHEN Yingping, HUANG Jisheng, et al. Influence of electrical and mechanical properties of epoxy insulating materials on electrical tracking characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):98-103.
- [9] 高亚栋, 冯亚东, 金国胜, 等. 基于相对温差法的智能组合开关电器故障检测方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10):97-102.
GAO Yadong, FENG Yadong, JIN Guosheng, et al. A new fault detection method of the intelligent combination switching apparatus based on relative temperature difference method[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10):97-102.
- [10] 肖勇, 赵云, 涂治东, 等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11):37-43.
XIAO Yong, ZHAO Yun, TU Zhidong, et al. Topology checking method for low voltage distribution network based on improved Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 37-43.
- [11] 杨晓萍, 廉伟健, 李孟杰, 等. 基于 Pignistic 概率函数和相关系数的证据组合方法[J]. 通信学报, 2019, 40(3): 73-79.
YANG Xiaoping, LIAN Weijian, LI Mengjie, et al. Evidence combination method based on Pignistic function transformation and correlation coefficient[J]. Journal

- on Communications,2019,40(3):73-79.
- [12] 贾超,袁涵,杨晟,等.基于秩相关系数的区间数型水质评价模型及其应用[J].水力发电,2019,45(12):7-11+30.
- JIA Chao, YUAN Han, YANG Sheng, et al. Interval number water quality evaluation model based on spearman rank correlation coefficient and its application[J]. Water Power,2019,45(12):7-11+30.
- [13] 黄军凯,曾华荣,杨佳鹏,等.红外热像技术在低零值绝缘子检测中的应用[J].电瓷避雷器,2013(2):40-44.
- HUANG Junkai, ZENG Huarong, YANG Jiapeng, et al. Application of infrared thermal imaging technology to detection of low and zero resistance insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2013(2):40-44.
- [14] 姚建刚,付鹏,李唐兵,等.基于红外图像的绝缘子串自动提取和状态识别[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(2):74-80.
- YAO Jiangang, FU Peng, LI Tangbing, et al. Algorithm research of automatically extracting the area of insulator from infrared image and state identification [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015,42(2):74-80.
- [15] 姚建刚,关石磊,陆佳政,等.相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J].电网技术,2012,36(2):170-175.
- YAO Jiangang, GUAN Shilei, LU Jiazheng, et al. Identification of zero resistance in insulators by combining relative temperature distribution characteristics with artificial neural network[J]. Power System Technology,2012,36(2):170-175.
- [16] 蒋兴良,夏强峰.污秽对红外成像法检测劣化绝缘子的影响[J].高电压技术,2010,36(7):1619-1624.
- JIANG Xingliang, XIA Qiangfeng. Influence of contamination to infrared imaging method detecting deterioration insulators [J]. High Voltage Engineering, 2010,36(7):1619-1624.
- [17] 柳文阳,谢宏,王云志,等.基于 MINITAB 相关分析模型的非标数控刀片磨削工艺优化[J].硬质合金,2017,34(3):197-201.
- LIU Wenyang, XIE Hong, WANG Yunzhi, et al. Grinding process optimization of non-standard inserts based on MINITAB correlation analysis model[J]. Cemented Carbide,2017,34(3):197-201.
- [18] 乔舰.组内相关系数的理论基础及建模应用[J].统计与信息论坛,2016,31(11):44-48.
- QIAO Jian. Theoretical basis and modeling application of intraclass correlation coefficient[J]. Statistics & Information Forum,2016,31(11):44-48.