

低值瓷绝缘子红外检测温差阈值研究

陈楠¹, 陈高洋², 李鸿泽³, 陆倚鹏², 朱向前², 尹骏刚²

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300010;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:依据目前的带电设备红外诊断技术应用导则,正温升1 K是低值瓷绝缘子的判别条件。但根据实际运行情况,该温差阈值较大,易造成红外检测漏检率偏高,为此,对某省电科院瓷绝缘子红外检测数据进行归纳梳理与统计分析。首先对低值温差样本进行分布函数拟合,再利用对数似然值、KS准则及赤池信息准则(AIC)对模型进行拟合优度检验,继而提出了一种基于逆高斯分布的低值绝缘子温差数学模型,并利用极大似然估计法求出模型参数,最终得到了红外检测低值瓷绝缘子的精确温差阈值模型。研究表明,逆高斯分布能够很好地拟合低值温差数据,由此得出的温差阈值模型能够提高低值瓷绝缘子红外检测准确度,可以为低值瓷绝缘子检测温差阈值的合理优化设定提供重要参考依据。

关键词:低值瓷绝缘子;红外检测;温差阈值

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0102-05

0 引言

发电厂、变电所和输电线路的绝缘子串在运行过程中,长期经受机电负荷、日晒雨淋、风吹、污秽、雷击及冷热变化等因素影响,引起机械力、电动力和内部应力作用,瓷件可能发生开裂甚至击穿等故障^[1],对电网系统安全将构成严重威胁。当瓷绝缘子出现劣化后,绝缘阻值将减小,其分布电压和发热程度(或温升)随电阻减小而发生相应的变化^[2]。通常,根据劣化绝缘子绝缘电阻值的大小,把绝缘电阻值为10~300 MΩ的劣化绝缘子称为低值绝缘子。文献[3—4]介绍了绝缘子的发热机理并用红外热像处理技术检测绝缘子劣化情况。文献[5]指明了现有的红外检测准确率低的问题,并提出了相应的诊断方法及其预防措施。文献[6]分别从红外热像仪自身测温误差、环境因素、污秽程度和绝缘子位置等方面对红外检测绝缘子影响因素进行了讨论。文献[7]利用仿真得到了运行中正常绝缘子呈不对称的马鞍形分布,而低值绝缘子表现出正温升特性。文献[8]指出了不同湿度下低值瓷质绝缘子的发热特性。上述文献仅仅阐释了红外检测检测绝缘子的原理及检测优化措施,而对红外检测瓷质绝缘子温差阈值的研究相对较少。在DL/T664—2016^[9]中,规范了红外检测瓷质绝缘子的温差阈值为1 K。但是根据近几年国内外瓷绝缘子红外检测

研究实践,该1 K温差阈值范围较大,精度较低。若使用该值作为劣化判定条件,则会导致大多数劣化绝缘子漏检,给电网正常运行带来很大的隐患。

针对上述文献和导则在红外检测绝缘子温差阈值研究工作中存在的不足之处,利用逆高斯分布^[10—11]和伽玛分布^[12]分别对低值温差样本进行拟合建模,通过极大似然估计法^[13—15]对分布进行参数求解,得到关于低值绝缘子温差的逆高斯分布及伽玛分布数学模型,再用拟合优度检验得出逆高斯分布模型较伽玛分布模型拟合效果更好。根据漏检率、误检率和统计模型^[16]分析,得出了低值瓷绝缘子红外检测温差阈值。该阈值能明显地降低红外检测的漏检率,同时使误检率保持在合理范围内。

1 红外检测瓷质低值绝缘子温差数据分析

1.1 低值温差定义

低值温差作为低值绝缘子(不含位于首末两端及相邻两片都是低值的绝缘子)红外检测的判别依据,其定义为:

$$\Delta T_n = T_n - \frac{(T_{n-1} + T_{n+1})}{2} \quad (1)$$

即低值温差定义为该片低值绝缘子温度与相邻左右两片正常绝缘子温度平均值的差值。其中, n 为低值绝缘子在串中的位置(非首末两片)。

1.2 实验数据处理

以某变电站220 kV II线间隔5号构架小号侧B相绝缘子串为例。用红外热像仪对运行中的绝缘

收稿日期:2018-08-29;修回日期:2018-09-27

基金项目:湖南省工程技术研究中心项目(2018TP2015)

子串进行拍摄,将得到的红外图像进行预处理^[17],去除大气背景和杂质得到图1。再利用软件提取该串绝缘子每一片铁帽的平均温度,即得到每一片绝缘子铁帽的温度 T_1, T_2, \dots, T_{14} (默认从导线侧开始按1,2,⋯,14顺序编号)。

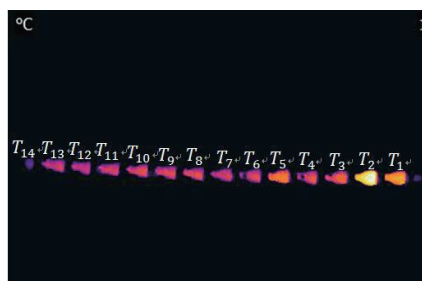


图1 预处理红外图像

Fig.1 Preprocessed infrared image

以上述做法为例,分别对该侧A、C相绝缘子红外图像进行温度提取,得到如图2所示A、B、C相绝缘子串铁帽温度情况。根据绝缘子串铁帽温升特性及三相温度曲线对比可知,B相中第2片,第5片为低值绝缘子。根据式(1),可得到B相第2片及第5片的低值温差。

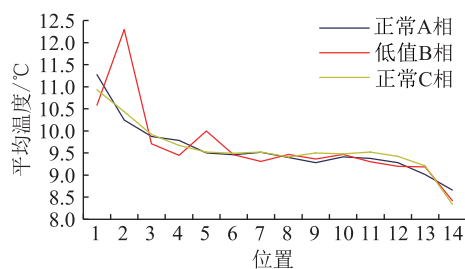


图2 A、B、C相温度曲线

Fig.2 A,B,C phase temperature curve

将该串绝缘子进行停电更换,利用绝缘电阻测试仪测量其绝缘电阻值。表1为红外检测和绝缘电阻值对应关系。把绝缘电阻值在10~300 MΩ之间且与红外检测结果相同的绝缘子作为实验样本。

1.3 温差阈值对比

在某省若干变电站瓷绝缘子现场红外检测中,共计发现低值绝缘子(不含位于首末两端及相邻两片均为低值的绝缘子)76片。后利用停电检修机会对上述76片绝缘子进行了绝缘电阻法测试验证,表2列出了部分低值温差及其相应的绝缘电阻值。

根据式(1)将计算得到的76个低值温差作为样本,可以得到上述低值温差样本的散点分布图(见图3)。图中低值温差大于1 K的样本只有18个,若以文献[9]中的1 K温差作为温差阈值,则其余58个低值绝缘子将会被漏检,其漏检率高达76.3%。

表1 绝缘电阻测试结果

Table 1 Insulation resistance test result

绝缘子位置编号	红外带电检测结果	实测电阻/MΩ
1	正常	14 300
2	低值绝缘子	195
3	正常	8 600
4	正常	6 030
5	低值绝缘子	73
6	正常	27 500
7	正常	15 400
8	正常	15 800
9	正常	23 000
10	正常	17 210
11	正常	19 470
12	正常	24 600
13	正常	21 900
14	正常	72 600

表2 绝缘电阻与低值温差

Table 2 Insulation resistance and low temperature difference

序号	红外检测结果	实测电阻/MΩ	低值温差/K
1	低值绝缘子	20.7	0.458 3
2	低值绝缘子	83	0.518 6
3	低值绝缘子	26	0.317 1
4	低值绝缘子	46.6	0.21
5	低值绝缘子	182	1.303 5
6	低值绝缘子	24.9	0.192 8
7	低值绝缘子	13.7	0.217 2
8	低值绝缘子	32	0.279 8
9	低值绝缘子	147.7	0.675 4
10	低值绝缘子	22.3	0.400 2

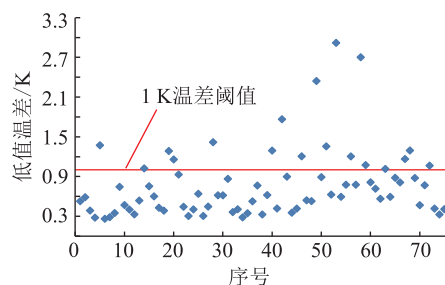


图3 低值温差样本散点分布

Fig.3 Low-value temperature difference samples

2 数据样本拟合及检验

2.1 逆高斯分布的定义及极大似然估计

逆高斯分布的概率密度函数为:

$$f(x | \mu, \lambda) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp \left[-\frac{\lambda}{2\mu^2 x} (x - \mu)^2 \right] \quad (2)$$

式中: $0 < x < +\infty; \mu > 0; \lambda > 0$ 。

假设 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是符合逆高斯分布的 n 个样本, 其似然函数为:

$$L(x | \mu, \lambda) = \prod_{i=1}^n \left\{ \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x_i^3}} \exp \left[-\frac{\lambda}{2\mu^2 x_i} (x_i - \mu)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

其对数似然函数为:

$$\ln L(x | \mu, \lambda) = \frac{n}{2} \ln \lambda - \frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{3}{2} \sum_{i=1}^n \ln X_i - \sum_{i=1}^n \frac{\lambda X_i}{2} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{X_i} \right)^2 \quad (4)$$

求解方程得到关于参数 (μ, λ) 的极大似然估计:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \\ \hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{X_i} - \frac{1}{\bar{X}} \right)} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 低值温差样本拟合

根据样本散点图的分布规律, 利用逆高斯分布对样本进行拟合, 用 Matlab 对参数进行极大似然估计, 计算结果为: $\mu = 0.763\ 347$, $\lambda = 2.094\ 46$ 。参照上述过程, 用伽玛分布继续对其进行拟合。可分别得到关于这两种分布拟合的概率密度函数和累积分布函数, 如图 4、图 5 所示。

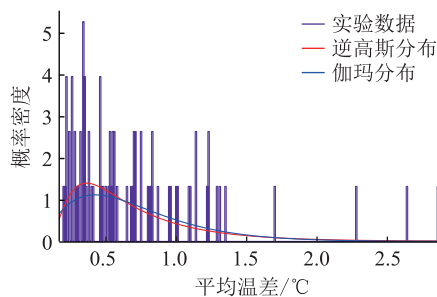


图 4 拟合概率密度函数

Fig.4 Fitting probability density function graph

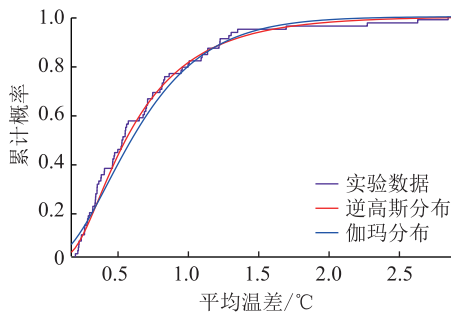


图 5 拟合累积概率分布

Fig.5 Fitting cumulative probability distribution

2.3 数学模型的拟合优度检验

将上述过程得到的两个低值温差数学模型, 分别利用 KS (Kolmogorov-Smirnov) 准则检验, 对数似然值及赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 对模型进行拟合优度检验。

(1) KS 检验。检验可以进行双侧检验, 检验样本是否符合指定分布。其原假设 H_0 : 样本符合指定分布。若计算返回值 $h = 0$, 则表示接受 H_0 , 否则拒绝 H_0 假设。构造统计量:

$$K_{KS} = \max [|F_n(x) - G(x)|] \quad (6)$$

式中: $F_n(x)$ 为样本得到的频率分布函数; $G(x)$ 为指定的分布函数。

(2) 对数似然值。对数似然值是通过使对数似然函数达到最大值时所得到的, 因此, 对数似然值的绝对值越小, 则表示其拟合程度越好。

(3) AIC 准则。AIC 准则是由日本学者在熵的概念基础上创立和发展的, 可以作为衡量统计模型拟合优良性的一种标准。其计算公式为:

$$A = -2 \frac{L}{n} + 2 \frac{k}{n} \quad (7)$$

式中: A 为 AIC 准则值; k 为参数的数量; n 为样本容量; L 为对数似然值。AIC 准则鼓励数据拟合的优良性, 但应尽量避免出现过度拟合的情况。因此, A 值越小, 表示其拟合程度越好。

运用公式(4)、式(6)和式(7)分别对逆高斯分布和伽玛分布进行拟合优度检验, 其结果如表 3 所示。可知, 逆高斯分布能够更好的拟合低值温差样本。

表 3 拟合优度检验对比结果

Table 3 Comparison of fitness test results

检验变量	逆高斯分布	伽玛分布	结果分析
KS 检验返回值 h	0	0	样本符合分布
对数似然值 L	-29.581 2	-35.491	逆高斯分布拟合程度更好
AIC 准则值 A	0.831 1	0.986 6	逆高斯分布拟合程度更好

3 阈值分析

3.1 正常绝缘子温差

根据式(1), 将低值绝缘子对应位置的正常绝缘子进行温差取值, 定义如下:

(1) 若 A 相第 n 片为低值劣化, 则选取该侧对应正常 B、C 相第 n 片正常绝缘子温差值的平均值作为正常温差样本;

(2) 若 A、B 相第 n 片均为低值劣化, 则选取该

侧对应正常 C 相第 n 片正常绝缘子的温差值作为正常温差样本;

(3) A、B、C 三相相同位置同时为低值劣化的情况未出现,暂不对其进行研究。

因此,可得到如图 6 所示的 76 个低值温差样本及其对应的 76 个正常温差样本值散点分布图。

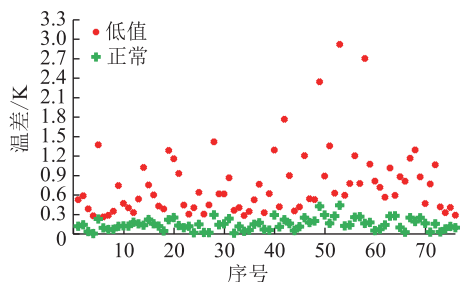


图 6 温差分布

Fig.6 Temperature differences distribution graph

3.2 漏检率和误检率分析

定义漏检率、误检率分别为:

(1) 漏检率:低于温差阈值的低值温差样本数量与低值温差样本总量之比;

(2) 误检率:高于温差阈值的正常温差样本数量与正常温差样本总量之比。

据此,可绘制漏检率、误检率曲线进行温差阈值分析。如图 7 所示,随着温差阈值递增变化,低于温差阈值的低值绝缘子将会漏检,高于温差阈值的正常绝缘子将会误检。若以 1 K 作为阈值,虽然误检率为零,但漏检率高。漏检率与误检率两条曲线存在一个交点,所对应的温差阈值约为 0.3 K;由概率密度函数的定义计算出低值温差大于 0.3 K 的概率为 91.75%。因此,在文中所建立的较小样本统计模型条件下,选取 0.3 K 作为温差阈值是较合理的。

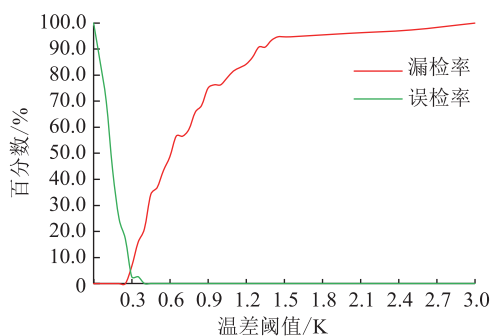


图 7 温差阈值分析

Fig.7 Temperature threshold analysis graph

4 结语

将某省电科院红外检测劣化绝缘子数据进行统计分析,提出了一种基于逆高斯分布的低值温差

模型,得出以下结论:

(1) 低值瓷绝缘子样本数据表明 DL/T664—2016 中的 1 K 温差阈值偏大,漏检率偏高;

(2) 逆高斯分布能够很好地拟合低值温差的数据特征,并通过理论检验验证了该模型的可行性;

(3) 利用得到的低值温差模型,可为不同地区低值瓷绝缘子红外检测的温差阈值选定提供重要参考,显著降低红外检测漏检率。

文中的研究尚存一些不足之处。首先,首末端及相邻两片都是低值绝缘子出现的情况较少,因此尚未对其进行研究。此外,由于低值温差样本获取难度很大,目前得到的低值温差样本量有限。在今后的工作中,应当采集更多的样本,对温差阈值进行更深入的统计分析,使数学模型更加精确实用。

参考文献:

- [1] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热像特征[J]. 电网技术, 1997(10):44-46.
HU Shizheng. Heating mechanism and thermal image characteristics of degraded insulators [J]. Power System Technology, 1997(10): 44-46.
- [2] 程养春,李成榕,陈勉,等. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 电网技术,2005,29(5):57-60.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, CHEN Mian, et al. Research on heating mechanism of composite insulator of high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 57-60.
- [3] 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. Study on the infrared zone detection of high voltage porcelain insulators [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3705-3712.
- [4] 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 in low-zero insulator detection [J]. Electric porcelain arrester, 2013(2): 40-44.
- [5] 胡淋波,李唐兵,姚建刚,等. 一起劣化悬式瓷质高压绝缘子红外检测案例分析[J]. 红外技术,2016,38(7):622-626.
HU Linbo, LI Tangbing, YAO Jiangan, et al. Analysis of an infrared detection case of degraded ceramic voltage insulator [J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 622-626.
- [6] 夏德分,李唐兵,姚建刚,等. 红外热像检测零值绝缘子影响因素的研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
XIA Defen, LI Tangbing, YAO Jiangan, et al. Research on influencing factors of infrared thermal image detection zero insulator[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [7] 李唐兵,周求宽,王鹏,等. 基于红外热像的绝缘子诊断方法研究与应用[J]. 江西电力,2016,40(4):43-46.
LI Tangbing, ZHOU Qiukuan, WANG Peng, et al. Research

- and application of insulator diagnostic method based on infrared thermography[J]. *Jiangxi Electric Power*, 2016, 40(4): 43-46.
- [8] 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 Yuping, et al. Heating characteristics of low-value porcelain insulators under different humidity conditions [J]. *High Voltage Technology*, 2018, 44(6): 1741-1749.
- [9] 带电设备红外诊断技术应用导则:DL/T664—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment; DL/T664—2008 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [10] FOLKS J L, CHHIKARA R S. The inverse gaussian distribution and its statistical application [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1978, 40(3): 263-289.
- [11] 刘强强. 逆高斯分布参数的线性贝叶斯估计[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- LIU Qiangqiang. Linear bayesian estimation of inverse gaussian distribution parameters [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [12] NORMAN L J, SAMUELI K. Distribution in statistics; continuous univariate distribution-1 [M]. New York: Wiley & Son, 1970: 166-172.
- [13] 金光炎. 极大似然法估计伽玛分布参数的注记[J]. *水资源研究*, 2008(2): 14-20.
- JIN Guangyan. A maximum likelihood method for estimating the gamma distribution parameters [J]. *Water Resources Research*, 2008 (2): 14-20.
- [14] 赵军圣,庄光明,王增桂. 极大似然估计方介绍[J]. *长春理工大学学报*, 2010(6): 53-54.
- ZHAO Junsheng, ZHUANG Guangming, WANG Zenggui. Introduction to the maximum likelihood estimation method [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2010(6): 53-54.
- [15] 金秀岩. 逆高斯分布参数的估计[J]. *长春师范学院学报*, 2006, 25(4): 25-26.
- JIN Xiuyan. Estimation of inverse gaussian distribution parameters [J]. *Journal of Changchun Teachers College*, 2006, 25(4): 25-26.
- [16] 茆诗松,程依明,濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- MAO Shisong, CHENG Yiming, PU Xiaolong. Probability theory and mathematical statistics tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 302-349.
- [17] MIZUNO Y, NAITO K, SUZUKI Y, et al. Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulator strings[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2002, 6(1): 100-104.

作者简介:



陈楠

陈楠(1981),男,硕士,工程师,从事高压技术和高压开关方面研究工作(E-mail: nan.chen@tj.sgcc.com.cn);

陈高洋(1994),男,硕士在读,研究方向为高压外绝缘技术;

李鸿泽(1968),男,硕士,高级工程师,从事输电线路运维技术研究及管理工作。

Temperature difference threshold of infrared detection of low value porcelain insulators

CHEN Nan¹, CHEN Gaoyang², LI Hongze³, LU Yipeng², ZHU Xiangqian², YIN Jungang²

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: According to the current technical specifications for infrared diagnostic technology for live equipment, positive temperature rise of 1 K is a criterion for low-value porcelain insulators. However, the 1 K temperature difference threshold is loose in many real cases, which may cause a high miss rate as to the infrared detection. This paper summarizes and statistically analyzes the infrared detection data of porcelain insulators in a provincial electric power research institute. Firstly, the distribution function of low-value temperature difference samples is fitted, and then the log-likelihood, Kolmogorov-Smirnov and AIC criteria are used to test the goodness of fit of the model, and then a low-value insulator temperature difference mathematics based on inverse Gaussian distribution is proposed. The model is used to obtain the model parameters by using the maximum likelihood estimation method, and the error analysis is carried out. Finally, the accurate temperature difference threshold model of the infrared detection low value porcelain insulator is obtained. The research shows that the inverse Gaussian distribution can well fit the low-value temperature difference data, and the resulting temperature difference threshold model can improve the infrared detection accuracy of low-value porcelain insulators, and can be used to reasonably optimize the temperature difference threshold for low-value porcelain insulators.

Keywords: low-value porcelain insulator; infrared detection; temperature difference threshold

(编辑 钱悦)