

基于红外热像的低零值绝缘子检测技术研究

何良¹, 刘书弟², 张禹³, 何宇航¹, 周电波¹, 姚晓¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 华北电力大学, 北京 102206;
3. 上海海能信息科技有限公司, 上海 201315)

摘要: 分析了绝缘子串电压分布及发热功率, 归纳了低零值绝缘子红外热像图谱特征, 采用红外热像技术进行绝缘子带电检测, 现场检测结果表明, 红外热像技术可通过遥测绝缘子串温度特征来判断绝缘子绝缘性能。该方法能有效发现低零值绝缘子, 具有工作效率高、安全等优点。

关键词: 绝缘子; 红外热像; 低零值; 温度特征

中图分类号: TM80 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2018)02-0072-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.017

Research on Low and Zero Resistance Insulators Detection Technique Based on Infrared Thermal Imaging

He Liang¹, Liu Shudi², Zhang Yu³, He Yuhang¹, Zhou Dianbo¹, Yao Xiao¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. Hinner Technology Company, Shanghai 201315, China)

Abstract: The voltage distribution and heating power of insulator string are analyzed, the spectral characteristics of infrared thermal imaging for low and zero resistance insulators are summarized, and the infrared thermal imaging technique is proposed to detect low and zero resistance insulators. Test results show that it can judge the insulation property of insulators by measuring the temperature characteristics of insulator string, which can effectively detect low and zero resistance insulators with high work efficiency and safety.

Key words: insulator; infrared thermal imaging; low and zero resistance; temperature characteristic

0 引言

瓷质绝缘子是变电站的重要绝缘部件,其质量主要体现在机械性能和电气性能两个方面。由于瓷质绝缘子在运行过程中因长期经受强电磁场、机械应力、冷热变化、湿度等作用,可能出现绝缘性能劣化,如绝缘电阻降低、瓷件开裂等。特别在变电站内,绝缘子劣化直接影响电网安全稳定运行^[1]。若绝缘子串中存在低零值绝缘子,导致有效绝缘距离变短增加绝缘子串的闪络概率,严重时出现绝缘子串掉串及导线落地等事故^[2]。

目前低零值绝缘子检测方法主要有:绝缘电阻法、工频耐压法、电压分布法、超声波法、紫外成像法

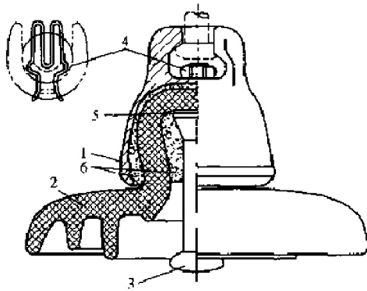
等^[3-7]。前两种方法精度较高,但只能停电试验,具有检测工作量大、成本高等缺点。电压分布法则是将测得的绝缘子串分布电压与标准分布电压进行比较来判断是否存在低零值绝缘子,需要登高作业,具有安全隐患大、劳动强度高不足。后两种方法可在带电情况下进行检测,但易受干扰,检测精度低。

绝缘子绝缘性能劣化将导致绝缘子串电压分布异常,进而影响绝缘子发热功率,可能会引起相应部位的温度变化。红外检测是在绝缘子串工作状态下,通过高精度的红外测温仪检测绝缘子串的红外热像图谱,可进行远距离带电检测,具有安全、高效、准确率高等优点^[8-11]。近年来,随着红外热像仪性能如温度分辨率和空间分辨率等不断提高,该方法已得到了较为广泛的应用。

下面对瓷质绝缘子串的电压分布和发热功率进行了理论分析,归纳总结了典型低零值绝缘子的红外热像特征及判据,并结合现场检测验证了基于红外热像的低零值绝缘子检测技术的有效性。

1 绝缘子串电压分布特征

瓷质绝缘子由铁帽、钢脚和瓷件等组成,如图1所示^[12]。由于绝缘子的金具部分(铁帽、钢脚)与接地横担及带电的高压电极间存在杂散电容,使得绝缘子串的电压分布畸变,绝缘子串越长,畸变越明显,电压分布越不均匀。



1 - 铁帽; 2 - 瓷件; 3 - 钢脚; 4 - 锁紧销; 5 - 弹性衬垫;
6 - 水泥胶合剂; 7 - 圆柱销; 8 - 压口销或驼背销

图1 悬式瓷绝缘子结构

如图2所示^[9], C_E 为绝缘子与接地横担间的杂散电容,其值约为 $4 \sim 5 \text{ pF}^{[2]}$; C_L 为绝缘子与高压电极间的杂散电容,其值约为 $0.5 \sim 1 \text{ pF}^{[2]}$ 。可以看出 C_E 的影响比 C_L 大一些,绝缘子串中的电压分布发生畸变,靠近高压电极侧的绝缘子承担的电压降比较大,靠近接地横担的绝缘子承担的电压降较小,因此整串绝缘子的电压分布呈不对称马鞍形。

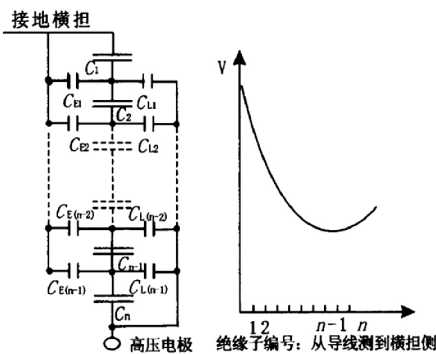


图2 绝缘子串等效电路和电压分布

2 绝缘子发热功率分析

瓷质绝缘子等效电路模型如图3所示,图中 C_0

为绝缘子极间电容,一般为 $40 \sim 60 \text{ pF}^{[10]}$,工频电压下其容抗值约为 $53.1 \sim 79.6 \text{ M}\Omega$; R_j 为极化电阻,一般为 $2.5 \sim 4.3 \text{ G}\Omega$; R_v 和 R_s 分别为体积电阻和表面电阻,一般情况下两者均远远大于 R_j 。绝缘子的等效电阻 R_{eq} 和发热功率 P_k 分别为

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_v}} \quad (1)$$

$$P_k = \frac{U_k^2 R_{eq}}{X_D^2 + R_{eq}^2} \quad (2)$$

$$X_D = \frac{n-1}{nwC_0} \quad (3)$$

式中: U_k 为第 k 片绝缘子的分布电压, V ; X_D 为等效容抗, Ω ; n 为绝缘子串片数; w 为电压角频率, rad 。

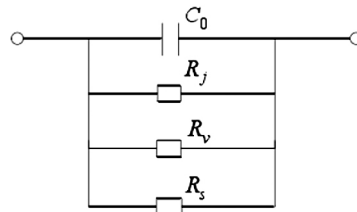


图3 绝缘子等效电路

当绝缘子绝缘性能良好时,其发热主要由介质极化引起,正比于分布电压的平方和介质损耗因素 $\tan\delta$:

$$P_k = U_k^2 w C_0 \tan\delta \quad (4)$$

式中 $\tan\delta$ 为介质损耗因数。 $\tan\delta$ 值很小,约为 $0.015 \sim 0.025^{[10]}$,可以看出正常绝缘子发热功率很小。绝缘子串的红外热象分布为不对称马鞍形,相邻绝缘子间的温差很小。

当绝缘子性能劣化,绝缘电阻降低时,泄露电流主要从绝缘子内部流过,其发热功率为

$$P_k = U_k I_g \quad (5)$$

式中 I_g 为贯穿绝缘子泄露电流, A 。

对公式(2)求导可知,当绝缘子的等效电阻 R_{eq} 与等效容抗 X_D 相等时,绝缘子的发热功率最大。即当绝缘子绝缘电阻逐渐减小到等效容抗值时,发热功率逐渐增加;当绝缘电阻继续减小时,发热功率逐渐减小;当绝缘电阻进一步减小到几乎为0时,即劣化为零值绝缘子时,发热功率几乎为0。可以看出,当绝缘电阻值降至某个区段时,发热功率与正常绝缘子相似,为红外检测盲区。

3 低零值绝缘子红外热像特征及判据

正常绝缘子串电压分布呈不对称马鞍形,靠近

高压电极的绝缘子分布电压较高,中间绝缘子的电压则相对较低,而靠近接地横担的绝缘子分布电压又有所回升^[8]。绝缘子的发热功率正比于分布电压的平方,绝缘子串的红外热像分布亦呈不对称马鞍形,相邻绝缘子间温差较小。

当绝缘子劣化为低零值绝缘子时,其发热功率随绝缘电阻值呈非线性变化。随着绝缘电阻逐渐较小,其发热功率先增大后减小。低值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏大,红外热像特征表现为钢帽温度偏高,零值绝缘子的红外热象特征表现为钢帽温度偏低。通过分析整串绝缘子串的温度分布,比较相邻绝缘子间的温差,可以有效判别低零值绝缘子。

DL/T 664 - 2016《带电设备红外诊断应用规范》中指出正常绝缘子串的温度分布同电压分布规律,即呈现不对称马鞍形,相邻绝缘子温差很小;低值绝缘子以铁帽为发热中心的热像图,其比正常绝缘子温度高,温差超过1 K;零值绝缘子发热温度比正常绝缘子要低,热像特征与绝缘子相比呈暗色调,温差超过1 K^[12]。

DL/T 626 - 2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》中指出运行瓷、玻璃同串绝缘子在规定的检测、检查次数中,其劣化片数累计达到规定值必须立即整串更换^[13]。

因此,通过分析绝缘子串的红外热像图谱,可以快速有效判断出低零值绝缘子,不同类型的绝缘子如标准型和防污型均可通过此种方法进行判断。需要指出的是,由于表面积污引起的发热主要表现为瓷面温度偏高,与低零值绝缘子热像分布存在本质上的区别,能较好地地区分开来。

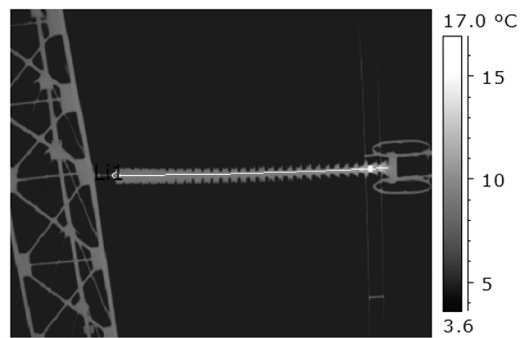
4 低零值绝缘子红外检测案例

4.1 案例1

2017年2月,检测人员在某500 kV变电站开展站内悬式瓷质绝缘子红外检测。通过对悬式绝缘子串热场分布的分析,发现某220 kV绝缘子串温度明显异常,如图4所示。

可以看出靠近高压导线侧第二片绝缘子钢帽温度明显偏高,近20℃,而相邻绝缘子温度近11℃,温差达9 K,根据DL/T 664 - 2016《带电设备红外诊断应用规范》,靠近高压导线侧第二片绝缘子为典型的低值绝缘子;根据DL/T 626 - 2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》,该串绝缘子中劣化绝缘子片

数较少,可不进行整串绝缘子更换。



(a) 红外热像图谱



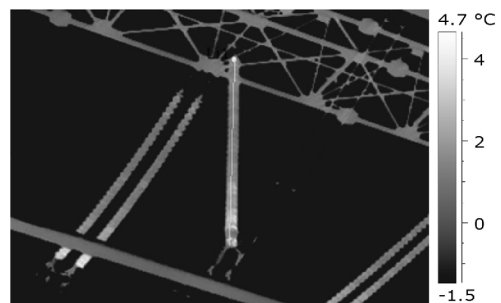
■ Li1 光标: -最小: 7.3 最大: 20.1

(b) 线温分布图

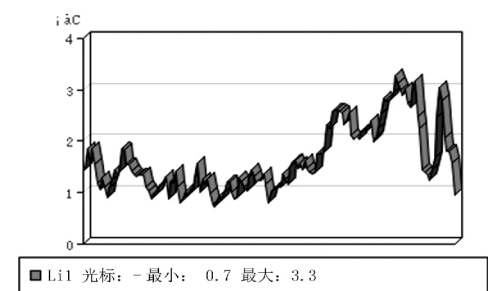
图4 绝缘子串红外热像结果(案例1)

4.2 案例2

2017年3月,检测人员在某500 kV变电站开展站内悬式绝缘子红外检测。通过对悬式绝缘子串热场分布的分析,发现某500 kV绝缘子串温度明显异常,如图5所示。



(a) 红外热像图谱



■ Li1 光标: -最小: 0.7 最大: 3.3

(b) 线温分布图

图5 绝缘子串红外热像结果(案例2)

可以看出靠近高压导线侧第二片、第三片绝缘子温度明显偏低,低于相邻绝缘子近2 K,热像特征呈暗色调,根据DL/T 664-2016《带电设备红外诊断应用规范》,靠近高压侧第二片、第三片绝缘子为典型的零值绝缘子;根据DL/T 626-2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》,该串绝缘子中劣化绝缘子片数较少,可不进行整串绝缘子更换。

5 结论

1) 正常绝缘子的发热功率正比于分布电压的平方,绝缘子串的红外热像分布呈不对称的马鞍形,相邻绝缘子间温差很小。

2) 低值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏大,其热像特征表现为钢帽温度偏高,呈亮色调;零值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏小,其热像特征表现为钢帽温度偏低,呈暗色调。

3) 现场检测结果表明,红外热像技术具有较好的可行性,能有效检测出低零值绝缘子。

参考文献

[1] 张文亮,吴维宁,吴光亚,等. 我国绝缘子的发展现状与应用前景[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 10-12.

[2] 谢冰. 基于红外测温的劣质绝缘子在线检测技术研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(4): 116-119.

[3] 王剑飞,邵兵,陶军. 基于红外测温法的故障绝缘子在线检测技术研究[J]. 电工技术, 2015(4): 29-31. [4] 祝嘉奇. 基于红外热像的劣化绝缘子诊断技术研究

[D]. 南昌:南昌大学, 2014.

[5] 陈勇,郭俊峰,鄢小均. 基于红外测温的零值和污秽绝缘子快速检测试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 191-194.

[6] 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, 2011.

[7] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 44-46.

[8] 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): 171-175.

[9] 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.

[10] 陈金法. 绝缘子红外热像检测及诊断技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

[11] 伍也凡. 基于红外检测方法的劣化绝缘子便携式带电检测系统研发[D]. 长沙:湖南大学, 2015.

[12] 周兆禹. 盘形悬式绝缘子的结构分析与优化[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2012.

[13] 国家能源局. 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664-2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2017.

[14] 国家能源局. 劣化盘形悬式绝缘子检测规程: DL/T 626-2015[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.

作者简介:

何良(1987),工程师、硕士研究生,研究方向为输变电设备状态检测。

(收稿日期:2018-01-11)

(上接第37页)

[4] 黄子璇,席黎明,樊梦旭,等. 高压输电线下有建筑物时工频电场计算中模拟电荷设置方法的改进[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 788-793.

[5] Thomas A, Baginski. Hazard of Low-frequency Electro-magnetic Coupling of Overhead Power Transmission Lines to Electroexplosive Devices[J]. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility, 1989, 31(4): 393-395.

[6] 王泽忠,金玉生,卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京:清华

大学出版社, 2010: 46-48.

[7] Lee B Y, Myung S H, Min S W. An Effective Modeling Method to Analyze Electric Field Around Transmission Lines and Substation Using a Generalized Finite Line Charge[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143-1149.

作者简介:

刘守豹(1983),博士、工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。

(收稿日期:2017-11-05)

(上接第40页)

[9] 维捷斯拉夫·本达,约翰·戈沃,邓肯A·格兰特. 功率半导体器件——理论及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

[10] Taylor P. D. 著,庞银锁译. 晶闸管的设计与制造[M]. 北京:中国铁道出版社, 1992.

[11] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.

作者简介:

董汉彬(1987),硕士、工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期:2018-01-08)