

Temperature Characteristics Research of Silicon Rubber Insulator by Using Fiber Bragg Grating Temperature Sensors*

ZHUANG Jungang, YAN Sian, LIU Jiang, ZHANG Xu, ZHAO Zhengang, XIE Tao, LI Chuan*

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming City, China, 650051)

Abstract: When silicon rubber insulator operates in a harsh environment for a long time, it will cause and lead to heating phenomenon. In order to detect the working temperature of the silicon rubber insulator, the optical fiber Bragg gratings are installed respectively on the top, bottom and the umbrella group of silicon rubber insulator. Temperature characteristics experimental results show that, in the interaction of the voltage 15 kV, the temperature of silicon rubber insulator will be changed, which makes the center wavelength of the optical fiber Bragg gratings shift. The temperature of the three parts respectively rise 1.8 °C, 2.1 °C and 0.5 °C in pollution-free case, 2.3 °C, 2.7 °C and 0.7 °C in gel case, 3.5 °C, 4.1 °C and 0.9 °C in level II filthy case. The temperature of the destroyed umbrella group respectively rise 4.9 °C, 5.5 °C and 7.1 °C in three cases. Therefore, by using optical fiber Bragg grating temperature sensor to detect the change of silicon rubber insulator's temperature, combined with the research of temperature characteristic, can directly reflect the silicon rubber insulator's working situation.

Key words: temperature measurement; fiber Bragg grating (FBG); temperature sensor; silicon rubber insulator

EEACC: 7230

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.05.007

光纤 Bragg 光栅温度传感器在硅橡胶绝缘子温度特性研究中的应用*

庄君刚, 闫思安, 刘江, 张旭, 赵振刚, 李英娜, 谢涛, 李川*

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650051)

摘要: 当硅橡胶绝缘子长期工作在恶劣的环境中时, 会导致硅橡胶绝缘子产生发热现象。为了检测硅橡胶绝缘子的工作温度, 将光纤 Bragg 光栅分别粘贴于硅橡胶绝缘子的上、下两端和伞群部分。温度特性实验结果表明: 在 15 kV 电压作用下, 硅橡胶绝缘子温度发生变化, 从而使得光纤 Bragg 光栅中心波长产生相应的移位。金属棒上、下两端和伞群部分在无污染情况下温升分别为 1.8 °C、2.1 °C 和 0.5 °C; 在凝露情况下温升分别为 2.3 °C、2.7 °C 和 0.7 °C; 在 II 级污秽等级情况下温升分别为 3.5 °C、4.1 °C 和 0.9 °C; 破坏后的伞群部分在三种情况下的温升分别为 4.9 °C、5.5 °C 和 7.1 °C。光纤 Bragg 光栅温度传感器可有效的检测硅橡胶绝缘子的工作温度, 反映硅橡胶绝缘子的工作状态。

关键词: 温度测量; 光纤 Bragg 光栅; 温度传感器; 硅橡胶绝缘子

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)05-0627-05

硅橡胶绝缘子具有强度高、重量轻, 污闪电压高, 运行维护方便和不易破碎等优点, 得到了广泛应用。安装在输电线路上的硅橡胶绝缘子长期经受机电负荷、日晒雨淋、冷热变化的影响, 绝缘子表面污秽被湿润后, 形成导电层, 泄露电流增加, 泄露电流流过电介质时引起绝缘子的局部温升, 影响电力系统的安全运行, 甚至会造成严重的经济损失^[1-3]。

目前存在的绝缘子检测方法主要有有人工巡检

法、红外热成像法、声波测量法、电场法和光电子探测法和光纤光栅检测法, 其中大多是非接触型测量, 这就给检测的准确性带来了极大的问题。线路绝缘子因其安装位置的特殊性和分布区域的广泛性而成为绝缘子在线监测的难点之一。现在广泛应用于硅橡胶绝缘子故障检测的方法是红外热成像检测法, 它可以检测故障绝缘子局部放电所引起的发热, 采用手持式红外成像仪或点测仪进行人工非在线的非

项目来源: 云南省科技计划项目(2007F181M)

收稿日期: 2012-12-10 修改日期: 2013-05-06

接触式测量,其温度检测在时间上不连续,不利于数据保存和分析,且容易受到环境温度的影响^[4]。自1989年首次报道将光纤 Bragg 光栅用作传感以来,光纤光栅传感器的研究受到了广泛的重视,并取得了持续和快速的发展。光纤 Bragg 光栅传感器是利用 Bragg 波长对温度、应力的敏感特性而制成的一种新型的光纤传感器,是一种波长调制型光纤传感器。因此,具有抗干扰能力强、便于形成各种形式的光纤传感网络等优点。目前,Bragg 光栅传感器正从实验室走向实际工程应用^[5]。

本文利用光纤 Bragg 光栅温度传感器检测硅橡胶绝缘子温度特性的实验,将光纤 Bragg 光栅利用环氧树脂粘帖于硅橡胶绝缘子的常见发热部位,在无污、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下^[6]进行温度检测。

1 硅橡胶绝缘子温度特性实验原理

实验工频电压是通过控制台控制变压器和感应调压器将 220 V 交流电压转换为平滑稳定的工频 15 kV 电压,并将感应调压器高电压端和低电压端分别连接试验品两端^[7],参见图 1。

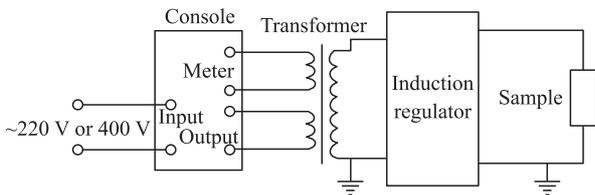


图1 工频电压实验原理

将光纤 Bragg 光栅温度传感器用于硅橡胶绝缘子温度特性实验,其光纤 Bragg 光栅部分利用环氧树脂分别粘帖于硅橡胶绝缘子金属棒上、下端和伞裙下表面,传感器设置位置,参见图 2。当硅橡胶绝缘子温度发生变化时,该点处的光纤 Bragg 光栅中心波长随之变化,由于光纤的热膨胀效应和光纤的热光效应,引起反射峰值波长的变化^[8],

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中 n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率^[9]。

对式(1)进行温度 T 求导可得,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2\left(\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T}\Lambda + \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}n_{\text{eff}}\right) \quad (2)$$

由(1)、(2),可以得到

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \times \Delta T = S_T \times \Delta T \quad (3)$$

式(3)中, S_T 为传感器的温度系数(单位: $^{\circ}\text{C}^{-1}$), $\Delta\lambda_B$ 为波长的变化, α 为光纤的热膨胀系数。当温度发生变化时,光纤 Bragg 光栅的中心波长移位与

光纤的热膨胀系数和热光系数有关,所以光纤光栅温度传感器 Bragg 波长的移位与温度的变化成线性关系。

则温度变化:

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot S_T} \quad (4)$$

式中,温度敏感系数为 $S_T = 6.0 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, λ_B (单位: nm) 为光纤 Bragg 光栅的中心波长, $\Delta\lambda_B$ (单位: nm) 为光纤 Bragg 光栅的波长变化量。

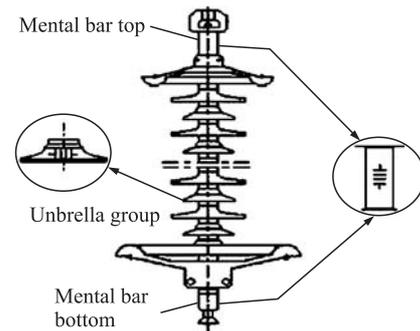


图2 光纤 Bragg 光栅粘帖位置示意图

实验开始前,将光纤 Bragg 光栅温度传感器与被测硅橡胶绝缘子连接好,并且将连接好的硅橡胶绝缘子固定在支架上,使其悬空,硅橡胶绝缘子上端接高压端,下端接地^[10],传感器与光纤光栅解调仪连接,解调仪需要与被测硅橡胶绝缘子间有栏杆相隔,保持安全距离,参见图 3。

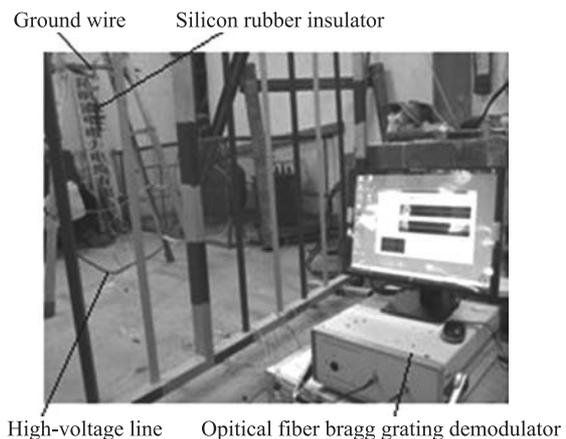


图3 温度特性实验连接实物图

2 硅橡胶绝缘子测温装置温度标定试验

实验采用恒温槽对绝缘子封装的光纤 Bragg 光栅测量温度装置进行标定。实验系统由恒温槽,光纤光栅传感网络分析仪,温度计,光纤 Bragg 光栅温度传感器等组成,原理图见图 4。按照标定温度传感器的相关规定,对 3 支传感器(记作 #1、#2、#3)分别做两次从 20 $^{\circ}\text{C}$ ~ 90 $^{\circ}\text{C}$ 的升温试验,温度每升高

10 ℃记录一次波长移位值。

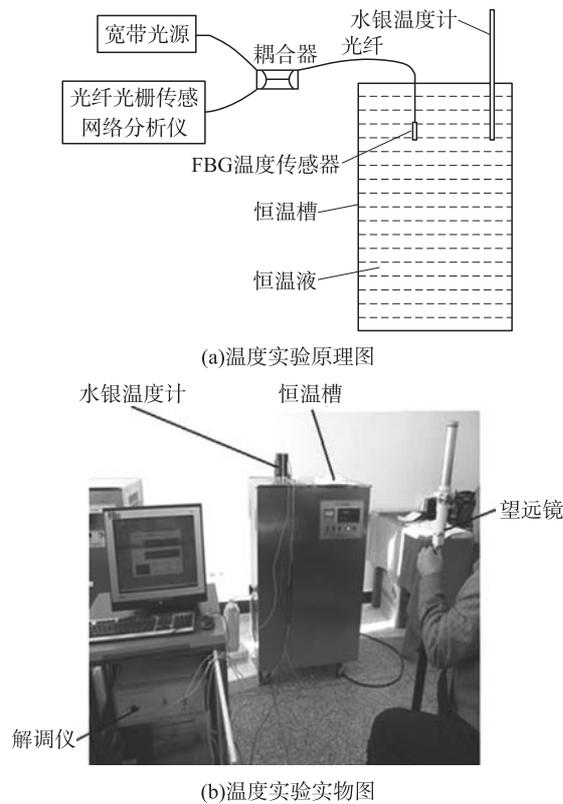


图4 温度标定实验

对3支传感器进行2次温度标定实验,根据记录的波长,可以得到两次实验波长的算术平均值,计算线性度的拟合曲线选用最小二乘法获得,算术平均值与温度的拟合曲线见图5。

传感器#1、#2、#2 波长移位量的算术平均值与温度的拟合曲线分别为:加载方程 $y = 0.01x + 1539.8$ 、加载方程 $y = 0.0106x + 1540.2$ 和加载方程 $y = 0.0103x + 1539.9$ 。根据非线性误差的计算公式可知,本文研制的3支传感器温度标定实验中的非线性误差分别为5.7%、3.5%和2.7%。

3 硅橡胶绝缘子温度特性实验

硅橡胶绝缘子常见发热部位为绝缘子的金属棒上、下两端以及伞群部分,利用光纤 Bragg 光栅温度传感器对硅橡胶绝缘子金属棒上、下两端和破坏前后的伞裙部分进行无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温度检测实验。实验工频电压为15 kV,时间为180 min^[11]。当电压升至15 kV后,每30 min进行一次记录,记录的数据分为破坏前后的伞裙部分和金属棒上、下两端三部分。实验进行的环境温度为5 ℃,相对湿度为30%^[12]。

无污染情况为硅橡胶绝缘子在理想工作环境下,绝缘子表面不含任何杂质,实验过程中不含任何

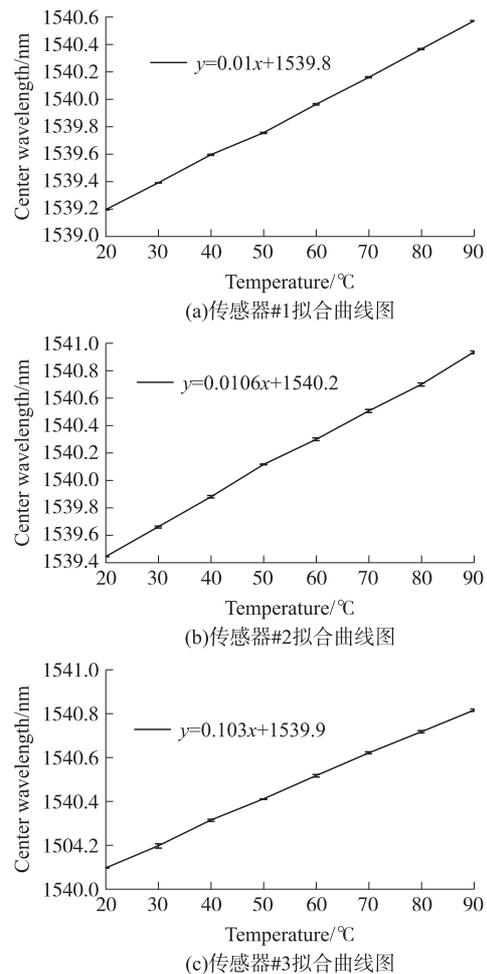


图5 传感器#1、#2、#3 拟合曲线图

附加条件。

凝露情况下硅橡胶绝缘子温度特性实验要求在实验开始前确保绝缘子封装表面有一层薄薄的水膜^[13],参见图6。

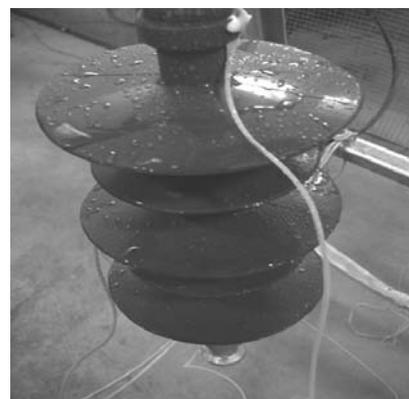


图6 凝露情况

Ⅱ级污秽等级情况为大气中等污染地区,包括盐碱地区、炉烟污秽地区,且离海岸2~10 km地区,在污闪季节中潮湿多雾(含毛毛雨)但雨量较少,其盐密为0.05~0.10 mg/cm²。因此,Ⅱ级污秽等级情况下硅橡胶绝缘子温度特性实验要求实验污秽使

用的是40 g高岭土与附盐密度为 0.07 mg/cm^3 的盐水组混合,达到Ⅱ级污秽等级,并用软的细毛刷把污秽均匀地涂在绝缘子表面^[14],参见图7。



图7 Ⅱ级污秽等级情况

为模拟硅橡胶绝缘子的自然劣化状态,人为地破坏硅橡胶绝缘子的伞裙表面^[15],参见图8。



图8 破坏实物图

根据图3给出的实验原理,获得了硅橡胶绝缘子金属棒上、下两端分别在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温升曲线,参见图9。

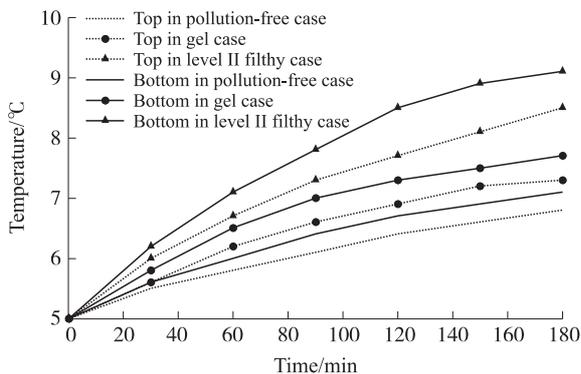


图9 金属棒上、下端温升曲线

图9表明,加压以后,金属棒上端在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温度由 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别上升至 $6.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $7.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $8.5 \text{ }^\circ\text{C}$;相同情况下,金属棒下端的温度由 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别上升至 $7.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $9.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在三种情况下,硅橡胶绝缘子金属棒下端温升比上端温升分别高 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

这是因为金属棒上端表面积比下端表面积大,散热更加明显;并且下端接高压端,上端接地,电场下端(高压端)比上端(接地端)分布更加密集,宏观电场强度与电介质的极化程度成正比^[16],实验反应了极化效应所带来的影响。

根据图3给出的实验原理,获得了破坏前后硅橡胶绝缘子伞群部分在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温升曲线,参见图10。

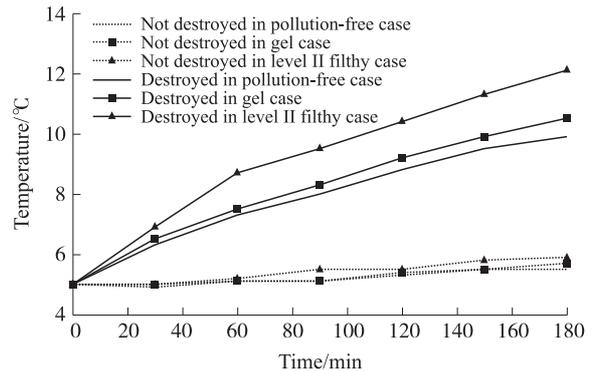


图10 破坏前后的伞群温升曲线

图10表明,破坏前的硅橡胶绝缘子伞群部分在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温度由 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别上升至 $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $5.9 \text{ }^\circ\text{C}$;而破坏后的硅橡胶绝缘子伞群在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下的温度由 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别上升至 $9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $12.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这是因为完整的硅橡胶绝缘子工作状态稳定,几乎没有泄露电流,所以温升不大;而破坏后的硅橡胶绝缘子表面易积垢,由此形成导电层,导致泄露电流增加,泄露电流流过电介质时引起绝缘子的温升加剧。

4 结论

利用光纤 Bragg 光栅温度传感器检测硅橡胶绝缘子的温度特性。在无污染、凝露和Ⅱ级污秽等级情况下,对硅橡胶绝缘子的常见发热部位:金属棒上、下两端和破坏前后的硅橡胶绝缘子伞群部分,分别进行了温度检测。温度特性实验表明:破坏后的硅橡胶绝缘子伞群部分温升比破坏前的硅橡胶绝缘子伞群部分温升最大,温度由 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别上升至 $9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $12.1 \text{ }^\circ\text{C}$;而金属棒下端温度高于上端温度,硅橡胶绝缘子金属棒下端温升比上端温升分别高 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本文提供了一种光纤 Bragg 光栅温度传感器对硅橡胶检测的方法,通过实验验证了不同环境下硅橡胶绝缘子及其各部位的温度的变化情况,可有效的检测硅橡胶绝缘子的工作温度,反映硅橡胶绝缘子的工作状态。

因此,光纤 Bragg 光栅温度传感器可用于对硅橡胶绝缘子温度的检测,对硅橡胶绝缘子温度的测量具有普遍的通用性。

参考文献:

- [1] 梅红伟,毛颖科,王黎明. 污秽物中含糖量对变电站内绝缘子外绝缘性能的影响[J]. 高电压技术,2012,38(1):66-67.
- [2] 方春华,王建国,操平梅. 污秽绝缘子泄露电流与环境温、湿度相关分析[J]. 高电压技术,2012,38(4):885-886.
- [3] 熊俊,李成榕,赵林杰. 复合绝缘子表面湿润特征建模分析[J]. 高电压技术,2008,34(2):234-238.
- [4] 孟玲,贾磊,姜明顺,等. 基于光纤光栅的铝电解槽温度在线检测系统[J]. 传感技术学报,2011,24(2):204-205.
- [5] 信思念,柴伟. 光纤 Bragg 光栅温度传感器封装方法研究[J]. 传感器技术,2004,23(4):10-11.
- [6] Gorur R S, Schneider H M, Cartwright J, et al. Surface Resistance Measurements on Nonceramic Insulators[J]. IEEE Transaction On Power Delivery,2001,16(4):801-805.
- [7] 李卫国,屠志刚. 电气设备绝缘试验与检测[M]. 第一版,北京:中国电力出版社,2006.
- [8] 李川,张以谟,赵永贵,等. 光纤光栅:原理、技术与传感应用[M]. 北京:科学出版社,2005:114-116,161-163.
- [9] 王宏亮,张晶,乔学光等. 一种耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 传感技术学报,2008,21(6):964-965.
- [10] Suda Tomotaka. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):481-487.
- [11] IEC 507 - 1991—04. Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on AC Systems,1991[S].
- [12] 李川,张旭. 一种测量瓷质绝缘子温度的光纤 Bragg 光栅温度传感器,实用新型,专利号:201120535422.0.
- [13] IEC Report Publication - 815—1986. Guide for the Selection of Insulators Inrespect of Polluted Condition,1986[S].
- [14] 李波,刘念,李瑞叶. 变电站绝缘子污秽在线监测技术[J]. 高电压技术,2008,34(6):1288-1291.
- [15] XU Guoxiang, Mc Grath P B. Electrical and Thermal Analysis of Polymer Insulator Under Contaminated Contaminated Surface Conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,3(2),1715-1720.
- [16] 范建斌. 复合绝缘子运行状况评估方法[J]. 电网技术,2006(12):24-28.



庄君刚(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向:传感器设计与应用,光纤光栅传感器,805768589@qq.com;



李川(1971-),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:光电子技术,光纤传感技术,测控技术,boatrivier@eyou.com。