

文章编号: 1005-5630(2013)01-0075-05

分布式光纤载流量/温度安全监测系统的研究*

杨 斌¹, 田 杰², 江健武², 沈春光¹, 段绍辉²

(1. 上海华魏光纤传感技术有限公司, 上海 201103; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对电力电缆安全监测的应用需求, 提出了一种以拉曼分布式光纤温度传感技术为核心的分布式光纤载流量/温度安全监测系统设计方法。该系统利用拉曼分布式光纤温度传感器对电网中的电力电缆线路的温度、载流量等运行状况进行全方位实时智能监测。试验结果表明, 该系统可实现 20 km 的电缆导体温度和载流量运行状态监测预警, 计算导体温度与实测导体温度最大偏差不超过 1 °C, 定位精度 0.5 m, 采用有限元算法得到的电缆温度和电缆载流量的对应关系与实际情况基本吻合。

关键词: 光纤传感器; 拉曼散射; 电力电缆; 载流量/温度

中图分类号: TP 212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.01.015

Research on distributed optic fiber carrying capacity and temperature security monitoring system

YANG Bin¹, TIAN Jie², JIANG Jianwu², SHEN Chunguang¹, DUAN Shaohui²

(1. Shanghai Boom Fiber Sensing Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China;

2. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to meet the application requirements of power cable security monitoring, a design method of distributed Optic Fiber Carrying Capacity and temperature security monitoring system with Raman distributed fiber temperature sensing technology as core is proposed. This system uses Raman distributed fiber temperature sensor to monitor the temperature, the carrying capacity and other running status of the power cable line in the power grid in a real-time, intelligent and all-around way. The experiment shows that, the system can supervise the conductor's temperature and carrying capacity's running status of 20 km long power cable, and calculating the conductor's temperature and actual measurement with the maximum deviation less than 1 °C and the locating accuracy is 0.5 m. Using finite element calculation, the correspondence of cable temperature and cable carrying capacity were obtained, which coincide with the actual condition.

Key words: fiber optic sensor; Raman scattering; power cable; carrying capacity and temperature

引 言

随着经济社会的发展,对电的需求量越来越大,水电、火电、可再生发电系统、城市变电的大规模建

* 收稿日期: 2012-05-10

基金项目: 深圳供电局有限公司科技基金资助项目(2012 科成 0008)

作者简介: 杨 斌(1977-),男,广西南宁人,高级工程师,学士,主要从事光纤传感及应用和光纤通信方面的研究。

立,电缆输电任务随之加大,如何来保证电缆的安全正常有效的运营,保障电缆资产价值,成为一种迫切需要解决的问题。电缆运行不安全因素主要为电缆在运行时电缆发热,导致电缆温度过高致使电缆发生火灾。光纤传感技术是伴随着光导纤维和光纤通信技术发展而另辟新径的一种崭新的传感技术。光纤传感具有抗电磁干扰、灵敏度高、安全可靠、耐腐蚀、可进行分布式测量、便于组网等诸多优点。目前国内外研究机构用光纤传感监测技术对电力电缆在线测温及载流量^[1]的安全监测的研发和应用大多还处于初期研究阶段,应用也基本停留在对个别设备和某个部件的监测上。比如 Micron Optics 公司推出的光纤点式测温系统实现对风力发电机组的温度检测。

基于拉曼分布式光纤温度传感技术的分布式光纤载流量/温度安全监测系统,不仅具有普通光纤传感器的优点,而且还具有对光纤沿线各点的载流量/温度的分布式传感能力。利用这种特点可以连续实时测量光纤沿线几十公里内各点的温度。定位精度 ≤ 1 m,测温精度可达 1 °C,非常适用于高压电力电缆的载流量/温度传感监测的应用场合。

1 系统工作原理

分布式光纤载流量/温度安全监测系统由拉曼分布式光纤测温传感器、感温光缆、载流量软件以及电流记录仪组成。

拉曼分布式光纤测温传感器^[2-4]能对电力电缆全线温度进行周期性实时在线监测,对极易出现故障的电缆接头进行重点监测。该项技术利用光纤作为传感器,将光纤直接敷设在被测物体表面,在一定条件下被测物体各个位置的温度信号会以光波的形式回传到光纤端部,最终被提取并显示出来。这种技术只需一根或几根光纤就可以监测长达数十公里的线型设备或点式设备。

光纤的拉曼散射与温度有着密切的关系。依据光时域反射测定法^[5],将短促的激光脉冲按精确的时间间隔注入光纤之中。在同一根光纤中,散射光的强度随时间呈现出指数衰减。如果知道光在光纤中的传播速度,就能计算出距离。从该指数衰减的偏差就能得出温度。光纤既是该信号的生成器,又是该信号的渠道。反射光被分流到传感器中来加以解码。在光纤测温系统连接的监控屏上能同时显示距离和温度数据。利用此技术把光纤与被测高压电缆采用接触方式安装,测出高压电缆表面温度,根据表面温度,电缆结构,辐射环境等因素,精确计算出电缆的线芯温度,通过线芯温度计算出通过线芯的载流量,并给出电缆对应分区的最高温度,电缆的运行温度和电缆的负荷水平,对温度异常点进行报警。

拉曼光强差和温度为:

$$P_a/P_s \propto \exp(-h \cdot c \cdot \Delta\nu/kT) \quad (1)$$

式(1)中, P_a 表示为拉曼散射反斯托克斯光 Anti-stokes 功率, P_s 为拉曼散射斯托克斯光(stokes)功率, h 为普朗克常数, c 为光速, $\Delta\nu$ 为拉曼频移量, T 为温度。

温度探测距离为

$$z = tV/2 \quad (2)$$

其中, t 表示两倍定点距离光传播时间, V 为光纤中光速。

2 系统的结构与功能设计

分布式光纤载流量/温度安全监测系统:系统由中控室、分布式光纤温度传感器、数据采集器(PLC)、光纤(缆)等设备组成。系统结构图如图1所示。

分布式光纤载流量/温度安全监测系统可以通过电缆温度的监测计算得到电缆载流量变化情况。同时在电缆隧道中实现高温危险报警。主要功能包括:

(1)分布式光纤温度传感器准确实时测量整条电缆的温度分布。它的探测范围:30 km,温度精度: 1 °C,定位精度:1 m;

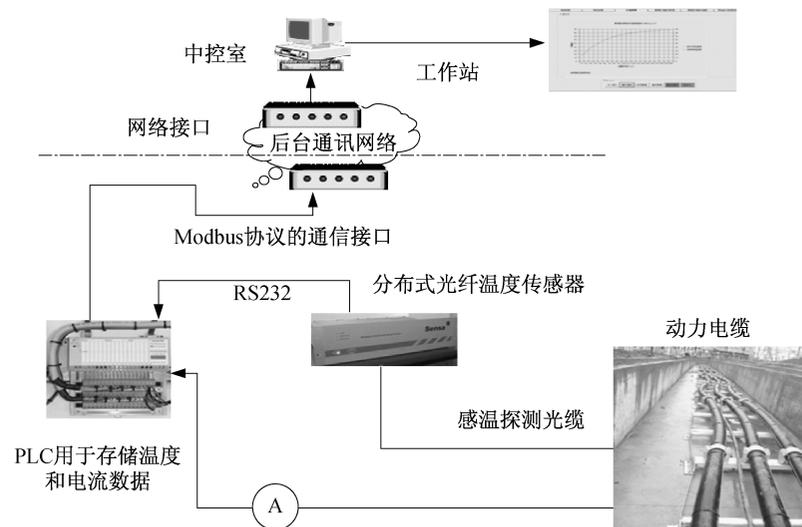


图 1 系统结构图

Fig. 1 The system structure diagram

(2)通过积累和分析电缆运行的温度数据,寻找电缆瓶颈处运行温度和载流量变化的关系,实现有效利用电缆设计允许载流量和达到经济运行;

(3)通过温度监测的数据,研究电缆线路附近的建筑或设施对电缆运行的影响程度,即敷设现场的改变对电缆运行的影响,为以后电缆的敷设提出建议和参考;

(4)通过监测记录电缆的运行温度,可以积累数据,获得电缆在不同季节和每天不同时段温度变化情况,为未来电缆检测提供检测依据;

(5)通过监测电缆的运行温度,为研究电缆温度与电缆老化的关系提供依据;

(6)通过对电缆温度设定报警温度来监测电缆的运行温度,找到电缆在运行过程中存在的隐患问题;

(7)中控室光纤安全运行监测信息管理平台实现在对系统中所有下属分系统的数据进行综合管理,并将数据传输给电网控制中心的中央综合监测信息管理平台;

(8)实现对系统中任意一传感器的各种工作参数设置;

(9)通过列表和地图的方式显示系统中各光纤传感器的监测信息,可在地图或列表中对传感器进行控制,并可在地图和列表状态间自由切换;

(10)发生温度异常时,系统能提供报警并准确确定温度异常位置,指导检修工作;

(11)具有 CRT 显示器,直观显示通道桥架分布、通道走向、通道关键位置及名称,实时连续的温度监测;

(12)具有局域网络接口,可与站内的管理网络相连,实现信息的共享,连结站内局域网的计算机可同样具有温度显示和报警功能,安装于单控室的主机和连网的计算机能够自动显示相应的报警提示。

3 载流量设计

载流量监控软件监控获得电缆施加负载电流和电缆表面温度后,通过计算可以取得电缆导体温度,判断电缆现场运行时的导体工作温度是否超过导体最高允许工作温度,从而判断电缆是否正常运行还是过载运行,以便于即时调整负荷电流,对电缆安全运行起到监控作用。

电流记录仪和分布式光纤温度传感器将采集到的负荷电流和电缆表面(或内部某层)温度信号传输到计算机,利用已知的电缆的结构参数,建立数学模型,计算出相应位置的电缆导体温度,准确判断电缆的载流能力。电缆温度监测与计算模型结构如图 2 所示,图中 R 表示热阻, C 表示热容, W 表示损耗, θ 表示温度。

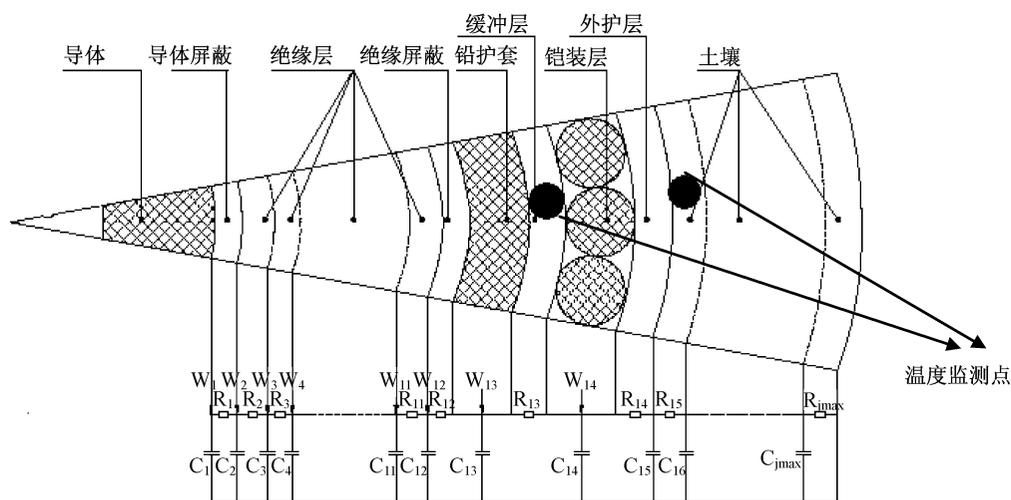


图 2 电缆温度监测与计算模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the power cable's temperature monitoring and computational modeling

根据 IEC60287 标准^[6]可以知道,载流量计算为:

$$I_T = f(\Delta\theta, \Sigma W_i, \Sigma R_i, \Sigma C_i) \quad (3)$$

式(3)中, ΣR_i 表示总热阻, ΣC_i 表示总热容, ΣW_i 表示总损耗, $\Delta\theta$ 表示温度变化量。分布式光纤载流量/温度安全监测系统的采集文件被转换并输出到一个表格文件中。表格的每一栏都代表了电缆线路上一个地理位置点的不同温度值,获取不同数据点的空间分辨率是 1 m,每一行都显示了一个空间温度分布曲线。以这个表格为基础,绘制两种类型的图用做进一步的分析。一种是显示光缆线路上温度与空间分布曲线图,另一种显示某一特定点的温度随时间变化曲线图。

对于温度空间分布曲线图,可计算得出以下数值:温度最大值 $T_{\max}\Phi(x)$;温度算术平均值 $T_a\Phi(x)$;温度最小值 $T_{\min}\Phi(x)$;温度变化值 $\Delta\Phi(x)$;标准偏差值 $\delta(x)$ 。

温度变化值 $\Delta\Phi(x)$ 用于检测温度数据存取期间,每一点上的温度变化,其值为:

$$\Delta\Phi(x) = T_{\max}\Phi(x) - T_{\min}\Phi(x) \quad (4)$$

标准偏差值 $\delta(x)$ 用来确定利用分布式光纤载流量/温度安全监测系统计算得出值的可靠性。

载流量监控软件由测温光纤在电缆表面或任意层面采集到的温度,计算出相应位置的电缆导体温度,以曲线的方式直观地实时反映出电缆外护套和电缆导体各点的温度分布情况,或者在测得电缆施加电流和电缆表面温度后,输入计算机指定控件,按给定按钮就显示出电缆导体在施加该电流值下的电缆导体温度。因此,分布式光纤温度传感器获得电力电缆的温度分布后,就可以确定电缆负荷电流是否达到了载流量。

电力电缆载流量监测的目的如下:

- (1)通过光缆的实时监测得到电缆芯(导体)的实时运行温度;
- (2)监测电缆芯长期运行的温度状态(XLPE 电缆的运行温度为 90 °C);
- (3)短时间内支持用户自定义运行电缆载流量的计算;
- (4)检查运行电缆的符合率。

4 试验结果

实验中采用窄线宽光纤激光器作光源,中心波长 1 550 nm,峰值功率 10 W,脉宽 5 ns,对应系统定位精度为 0.5 m;光纤放大器最大增益为 40 dB,噪声系数为 5 dB。

光缆紧贴到动力电缆的表面,光缆沿线选取三个位置点(17 710 m、18 435 m、18 870 m)分别敷设在三根动力电缆的表面进行电缆温度/载流量测试,每点测试各采集 10 组信号,电缆温度监测安装图如图 3 所示。

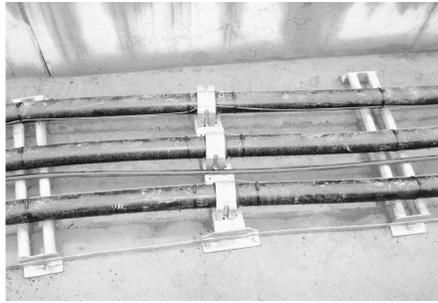


图3 电缆温度监测安装图

Fig. 3 Installation drawing of power cable's temperature monitoring system

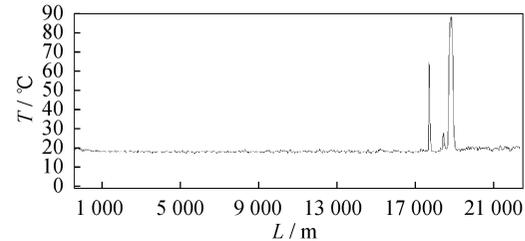


图4 电力电缆线路长度方向的空间-温度曲线图

Fig. 4 The diagram of temperature vs length along power cable line

电力电缆分布式光纤载流量/温度安全监测系统监测的温度测试曲线见图4。当光纤温度稳定时,用水银温度计计量电缆测试点的暂态温度,然后与分布式实时测取的温度进行比较,得到该模块的温度计量精度;同理,在测试电力电缆中,选取不同光纤位置,现场三根试验电力电缆传

输不同电流强度时,电流记录仪和分布式光纤温度传感器将采集到负荷电流和电缆温度信号,试验数据见表1。

试验结果表明,计算导体温度与实测导体温度最大偏差不超过 1°C ,采用有限元算法得到的电缆温度和电缆载流量的对应关系与实际情况基本吻合。

5 结 论

研究基于拉曼分布式光纤温度传感器在中高压地理铠装电力电缆的温度、载流量等领域监测的应用设计,综合分析处理各传感器信息,并且在出现异常情况时,通过控制相应的联动设备采取一定的措施来保障电网正常运行。试验结果表明,该系统可对20 km电力电缆的温度、载流量实时监控预警,显示险情位置,定位精度优于1 m。

参考文献:

- [1] 刘 英,曹晓珑. 电力电缆在线测温及载流量监测的研究进展与应用[J]. 电网与水力发电进展,2007(5):11-14.
- [2] 王莉田,史锦珊,王玉田,等. 背向散射多点分布式光纤测温系统的研究[J]. 仪器仪表学报,1996,17(6):639-641.
- [3] 宋牟平,汤伟中,周 文. 喇曼型分布式光纤温度传感器温度分辨率的理论分析[J]. 仪器仪表学报,1998,19(5):485-488.
- [4] 李志全,白志华,王会波,等. 分布式光纤传感器多点温度测量的研究[J]. 光学仪器,2007,29(6):8-11.
- [5] 李荣伟,李永倩,杨 志,等. 基于相干光时域反射计的光纤温度传感测量[J]. 光子学报,2010,39(11):1988-1992.
- [6] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1:2006 Calculation of the current rating-part 1: current rating equations(100% load factor)and calculation of losses[S]. Geneva:IEC,2006.

表1 温度测量试验结果

Tab. 1 Temperature detection results

水银温度计 计量温度/ $^{\circ}\text{C}$	光纤取样 范围/m	系统测量 温度/ $^{\circ}\text{C}$	电缆传输 电流强度/A
65.5	17 710~17 711	65.4	450
26.7	18 435~18 436	26.3	200
88.8	18 870~188 71	88.6	500