

# 光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述

李强<sup>1</sup>, 王艳松<sup>2</sup>, 刘学民<sup>2</sup>

(1. 中海石油研究中心, 北京 100027; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 首先介绍了光纤温度传感器的优点及发展现状, 并重点介绍了应用最为广泛的分布式光纤温度传感器与光纤光栅温度传感器的基本原理。概述了当前光纤温度传感器在电力系统中基本的应用模式, 并综述了光纤温度传感器对电力系统主要设备进行温度监测的现状与意义。针对光纤温度传感器在电力系统中应用存在的问题与不足, 提出了相应的解决方案并对其前景进行了展望。

**关键词:** 分布式光纤温度传感器; 光纤光栅; 温度监测; 故障诊断; 电力系统

## Application situation of temperature monitoring of optic fiber sensor in power system

LI Qiang<sup>1</sup>, WANG Yan-song<sup>2</sup>, LIU Xue-min<sup>2</sup>

(1. CNOC Research Center, Beijing 100027, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The advantages and development of temperature monitoring of optic fiber sensor is presented, and the working principle of fiber optic distributed temperature sensor, fiber grating sensor are respectively introduced, which are most popular in industry use. In the paper, the basic application model of temperature monitoring of optic fiber in power system are presented. Importantly, the applied situation and importance that the optic fiber sensor is used to monitor the temperature of electric equipment are summarized. Aiming at defects of application currently, some applied solutions are presented and their application prospects has prospected.

**Key words:** distributed optic fiber sensor; optical fiber grating; temperature monitoring; fault diagnosis; power system

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0135-06

## 0 引言

温度是电力设备的重要运行参数, 通过监测电力设备温度信息获取电力设备的运行状况是电力系统故障预报与诊断的研究热点, 研究内容包括各种新型的温度传感器的应用、电力设备的故障预报与诊断方法等<sup>[1]</sup>。其中光纤温度传感器在电力系统中的应用是近年来研究的热点, 已广泛应用于发电厂、变电站等<sup>[2-3]</sup>。光纤传感器具有绝缘、抗电磁干扰、耐高电压、耐化学腐蚀, 安全等特点<sup>[4]</sup>。本文对电力系统温度监测的基本内容进行了概述, 研究了当前光纤温度传感器在电力系统中的应用, 并对其发展趋势进行了展望。

## 1 光纤温度传感器

光纤温度传感器是上世纪 70 年代发展起来的一门新型的测温技术。它基于光信号传送信息, 具有绝缘、抗电磁干扰、耐高电压等优势特征<sup>[5]</sup>。在国外, 光纤温度传感器发展很快, 形成了多种型号

的产品, 并已应用到多个领域, 取得了很好的效果。国内在这方面的研究也如火如荼, 多个大学、研究所与公司展开合作, 研发了多种光纤测温系统投入到了现场应用。

按工作原理分, 光纤温度传感器可分为功能性和传输型两种。功能型温度传感器中光纤作为传感器的同时也是光信号的载体, 而传输型温度传感器中光纤则只传输光信号。目前主要的光纤温度传感器包括分布式光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器、光纤荧光温度传感器、干涉型光纤温度传感器等。其中应用最多当属分布式光纤温度传感器与光纤光栅温度传感器。

### (1) 分布式光纤温度传感器<sup>[6-7]</sup>

分布式光纤传感器最早是在 1981 年由英国南安普敦大学提出的。激光在光纤传送中的反射光主要有瑞利散射 (Rayleigh scatter)、拉曼散射 (Raman scatter)、和布里渊散射 (Brillouin scatter) 三部分, 如图 1 所示。分布式光纤传感器经历从最初的基于后向瑞利散射的液芯光纤分布式温度监控系统, 到

基于光时域 (OTDR) 拉曼散射的光纤测温系统, 以及基于光频域拉曼散射光纤测温系统 (ROFDA) 等等。目前其测量距离最长可达 30 km, 测量精度最高可达 0.5℃, 空间定位精度最高可达 0.25 m, 温度分辨率最高可达 0.01℃ 左右。

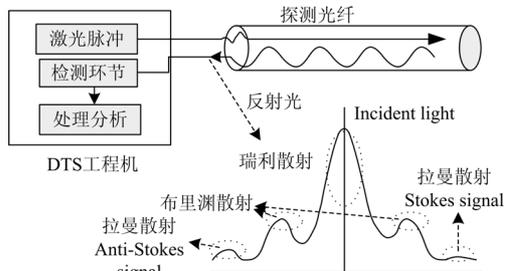


图 1 分布式光纤温度传感器基本原理

Fig.1 Basic principle of fiber optic distributed temperature sensor

目前, 分布式光纤温度传感器主要基于拉曼散射效应及光时域反射计(OTDR)技术实现连续分布式测量, 如 York Sensa、Sensonet 等产品。基于布里渊散射光时域及光频域系统也是当前光纤传感器领域研究的热点, LIOS、MICRION OPTICS 等公司已有相应的产品。

(2) 光纤光栅点式温度传感器

光纤光栅温度传感器是利用光纤材料的光敏性在光纤纤芯形成的空间相位光栅来进行测温的。光纤光栅以波长为编码, 具有传统传感器不可比拟的优势, 已广泛用于建筑、航天、石油化工、电力行业等<sup>[8-9]</sup>。

光纤光栅温度传感器主要有 Bragg 光纤光栅温度传感器和长周期光纤光栅传感器。Bragg 光纤光栅是指单模掺铈光纤经紫外光照射成栅技术而形成的全新光纤型 Bragg 光栅, 成栅后的光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生 Bragg 光栅效应, 其基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学滤波器, 满足如下光学方程:

$$\lambda_0 = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中:  $\lambda_0$  为 Bragg 波长;  $\Lambda$  为光栅周期;  $n$  为光纤模式的有效折射率。

长周期光纤光栅是一种特殊的光纤光栅, 其传光原理是将前向传输的基模耦合到前向传输的包层模中。由于其宽带滤波、极低的背景发射等特点引起人们的重视, 是一种新型的宽带带阻滤波器。

2 光纤温度传感器在电力系统中的应用

电力系统中大量设备需要检测温度信息, 从而

确定电力设备的运行情况, 以便运行调度人员及时采取措施, 消除异常, 避免设备的损坏和事故的发生<sup>[10-11]</sup>。早期通过示温蜡片、数字温度传感器、红外温度仪等获取电力设备温度信息。但是示温蜡片与红外测温仪需要人工巡查, 不能满足现代数字化电力系统的要求。数字温度传感器大多基于电量传送, 受电磁场影响较大, 只能测量关键点, 有一定的局限性。光纤温度传感器则克服了以上缺点与不足, 具有通信迅速、报警设置灵活、适应恶劣环境等优点。

目前, 光纤温度传感器在电力行业中基本的应用模式如图 2 所示, 现场工程机 1 为基于分布式光纤温度测温仪, 现场工程机 2 为基于光纤光栅测温仪, 多台工程机可通过网络将数据上传到集控室的上层机构成测温系统, 实现集中控制显示。其主要内容包括: 1) 分布式光纤或者光纤光栅作为温度传感器紧贴在电气设备上; 2) 通过采集光信号进行相应计算得到温度分布; 3) 开发与设备相应的分析、报警软件; 4) 通过温度信息分析电气设备运行状态, 从而保证电气设备运行在安全区域, 避免事故的发生。在国内外, 主要有以下几个应用领域。

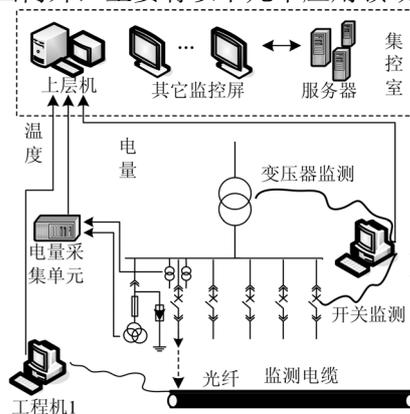


图 2 光纤温度传感器在电力系统应用示意图

Fig.2 Scheme of application of temperature monitoring of optic fiber sensor in electric power system

2.1 电厂温度监控

光纤温度传感器代替传统的温度传感器实现电厂某些关键设备的温度监测是当前的研究热点问题。主要有:

- (1) 利用光纤光栅实现汽轮机内湿蒸汽的湿度与温度测量, 若采用多点监测可动态确定汽轮机内温度场和湿度场的分布<sup>[12]</sup>。
- (2) 同步调相机转子温度的测量<sup>[13]</sup>。
- (3) 光纤温度-压力混合传感器用于核电站第四代反应堆(Gen-IV)高温、压力监测, 可实现系统安

全监测<sup>[14]</sup>。

(4) 水电站大坝温度监测, 目前已有很多现场应用的实例, 如分布式光纤监测系统在长调水电站<sup>[15]</sup>、景洪电站<sup>[16]</sup>、云南大理小湾拱坝<sup>[17]</sup>等的应用。

## 2.2 电缆隧道火灾监控

发电厂和变电站内大量的高压电气设备都是通过电缆连接的, 这些电缆都敷设在厂房或变电站下的电缆隧道。由于电缆隧道环境比较恶劣, 且电缆数量较多, 容易由于一根电缆的绝缘损坏、局部放电而引起大面积的火灾事故, 造成严重的经济损失。针对电缆隧道易发生火灾的情况, 传统的预防措施主要有: 1) 使用阻燃电缆或者电缆加涂阻燃层; 2) 隔层之间填充阻燃泥; 3) 在电缆隧道中通过感温电缆实现温度报警; 4) 电缆隧道中定距安装悬挂定温式的自动灭火器等<sup>[18]</sup>。以上措施并不能及时发现火灾隐患和防止火灾事故的发生。

分布式光纤温度监控系统是近年来应用于电缆隧道监测的一种新技术, 它通过在电缆隧道中敷设一条光纤即可实现多条电缆的温度检测与整个电缆隧道的火灾报警<sup>[19]</sup>。总的来说, 分布式光纤测温系统应用到电缆隧道火灾监控的优点有: 1) 实时检测光纤沿线温度, 测温准确, 分辨率较高。按测温距离与测温精度的不同, 一般全线温度更新速度最短10s左右。2) 存储历史温度数据用于作进一步分析。3) 报警等各项指标设置灵活, 可实现多条件报警设置。目前已有不少成功应用的案例, 如在韶关电厂、宁夏石嘴山发电厂、南京扬子石化热电厂、济南钢铁等<sup>[20-22]</sup>。

## 2.3 高压电力电缆负荷安全监测

温度作为高压电力电缆的一个重要的运行参数越来越受到人们的重视。通过数字传感器的方式只能实现对电缆接头等重要部分的温度监测<sup>[23]</sup>。因此, 近年来人们对一些重要的高压动力电缆应用分布式光纤温度监测系统<sup>[24-26]</sup>和光纤光栅测温系统实现电缆温度监控<sup>[27-29]</sup>。

分布式光纤测温根据光纤安置在电缆上位置可分为内置式与表贴式两种。内置式所测温度基本等于电缆缆芯温度, 但其需要特殊生产, 且敷设复杂<sup>[30]</sup>。目前研究比较多的是表贴式光纤测温系统在电力电缆上应用。

光纤测温系统测得电缆表皮温度后, 结合实时电流计算出电缆线芯温度, 可进一步推算出动态载流量并模拟各种运行状态<sup>[31-32]</sup>。电缆温度监测可以在电缆全长度范围内发现过热点和异常行为点, 包括快速升温点和慢性升温点等, 能发现限制电缆载流量的瓶颈点的温度与位置信息, 预防电缆故障的

同时为电力调度提供科学依据。

## 2.4 变压器绕组温度监测

电力变压器的内部故障主要是过热性故障, 研究变压器的过热故障具有很大实用价值<sup>[34-35]</sup>。变压器的寿命与电力变压器绕组温度有一定关系<sup>[36]</sup>。

变压器绕组温度测量方法主要有三种: 1) 基于电信号的数字传感器测温; 2) 红外温度传感器测量; 3) 光纤温度传感器测量。利用光纤温度传感器测量又分为荧光光纤测温仪<sup>[37-38]</sup>和光纤光栅温度传感器。光纤光栅传感器测温是将光纤光栅粘贴在变压器绕组上测量绕组温度。通过对变压器绕组的连续监测, 能掌握变压器工作状态以及了解设备的缺陷和退化情况<sup>[39]</sup>。

## 2.5 高压开关柜温度监测

高压开关柜用来开闭电力线, 是实现输送、倒换电力负荷, 退出故障设备和线路的关键设备。在长期的运行过程中, 开关柜触点和母线连接处容易老化、松动和接触电阻过大而引起局部发热严重。开关柜过热如若发现不及时往往容易导致火灾事故, 造成大面积停电等。对全封闭的高压开关柜实现在线实时温度监测, 提前发现和排除隐患, 对保证安全可靠供电具有重要的意义<sup>[40]</sup>。

应用分布式光纤温度传感器和光纤光栅温度传感器对高压开关柜的温度监测是当前的一种新的温度监测方法, 能避免强电磁场的干扰, 且耐高压、耐辐射, 能有效提高高压开关柜的可靠性<sup>[41-42]</sup>。尤其光纤光栅温度传感器在变电站开关柜中的应用越来越广泛, 如在天津北辰变电站、上辛口变电站等。

## 3 光纤温度传感器在电力系统中应用现状分析

光纤温度传感器作为一种新型的测温技术发展十分迅速, 应用也越来越广泛。在电力系统中应用也得到了较好的发展, 但存在以下几个方面的问题:

(1) 光纤温度传感器在电力系统的一些应用尚处于初步尝试阶段, 尚需要开发与设备运行状态等的关系模型, 从而更好地利用温度信息。目前在电缆监测上有缆芯温度计算模型、动态载流量模型。

(2) 光纤温度传感器在价格上的劣势制约了其在电力系统中的推广应用, 价格太高使得在某些应用场合监测的实际意义不大。

(3) 光纤在某些电气设备上的敷设较为困难, 最好能在敷设方式和敷设工艺等方面形成业内认可的施工指导与标准规范。

(4) 目前生产光纤温度传感器的厂家基本都只

具备专业研发与生产光纤温度传感器的能力，而在电力系统领域涉足较少，缺乏开发基于光纤温度传感器的电力系统故障诊断方面软件的理论支持与经验，难以将系统功能扩展。

#### 4 展望

随着电力系统的发展，对电力设备的温度监测将会越来越受到重视。光纤测温系统成本的降低以及测温精度等指标的提高，必将促使其在电力系统中的应用更加广泛与深入。

(1) 分布式温度监测系统与点式光纤光栅监测系统相结合构造厂站温度监控系统实现发电厂和变电站重要设备的温度监控，提供全厂（站）重要区域温度信息，及时发现安全隐患，保证电力安全生产、稳定可靠运行。

(2) 分布式光纤测温系统与电缆故障诊断技术相结合构造基于光纤温度传感器的电缆在线故障诊断系统，不仅能实现电缆线芯温度实时监测和动态载流量分析，而且能将电量信号和温度信号结合实现电缆电气故障识别和定位。

(3) 随着分布式光纤测温系统长距离监测技术的成熟，结合应力监测功能将其应用到海底电缆与架空线路的安全监测中也是将来发展的一个方向。

(4) 光纤测温系统用于其它电力设备的温度监测，如变压器、绝缘子、熔断器、绝缘套管、电容器和高压电动机等等，并可结合电气设备特征开发出相应的状态监测、性能评估和故障诊断系统。

#### 参考文献

- [1] 黄惠智, 杨中山, 徐善纲. 光纤传感器的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电工电能新技术, 1990, 3: 27-33.  
HUANG Hui-zhi, YANG Zhong-shan, XU Shan-gang. Development of Optical Fiber Sensors and Their Application in Power Systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1990, 3: 27-33.
- [2] 刘丽华, 王军, 等. 光纤温度传感器的应用及发展[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (5): 547-551.  
LIU Li-hua, WANG Jun, et al. Applied Study and Development of Fiber-optic Temperature Sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24 (5): 547-551.
- [3] 周广丽, 鄂书林, 等. 光纤温度传感器的研究和应用[J]. 光通信技术, 2007, 6: 54-57.  
ZHOU Guang-li, E Shu-lin, et al. Development and Application of Optical Fiber Temperature Sensor[J]. Optical Communication Technology, 2007, 6: 54-57.
- [4] 梁大巍, 黄尚廉. 分布式光纤温度传感器的研究现状
- 及发展[J]. 应用光学, 1991, 12 (3): 1-6.  
LIANG Da-wei, HUANG Shang-lian. Research Status and Development of Distributed Optical-Fiber Temperature Sensor[J]. Journal of Applied Optics, 1991, 12 (3): 1-6.
- [5] 苏东波. 光纤温度传感器发展现状[J]. 传感器技术, 1995, 6: 1-6.  
SU Dong-bo. Present Status of Development of Optical Fiber Temperature Sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 1995, 6: 1-6.
- [6] 张颖, 张娟, 等. 分布式光纤温度传感器其的研究现状及趋势[J]. 仪表技术与传感器, 2007, 8: 1-4.  
ZHANG Ying, ZHANG Juan, et al. Current Status and Developing Trend of Distributed Optical Fiber Temperature Sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007, 8: 1-4.
- [7] 王剑锋, 张在宜. 分布式光纤温度传感器新测温原理的研究[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17 (1): 25-28.  
WANG Jian-feng, ZHANG Zai-yi, et al. Research of a New Temperature Measure Principle of Distributed Optical Fiber Temperature Sensors[J]. Journal of China Jiliang University, 2006, 17 (1): 25-28.
- [8] 关柏鸥, 刘志国. 光纤光栅温度传感器[J]. 传感技术学报, 1999, 6: 89-93.  
GUAN Bai-ou, LIU Zhi-guo, et al. Temperature Sensor Based on Fiber Bragg Grating[J]. Journal of Transducer Technology, 1999, 6: 89-93.
- [9] 周春新, 曾庆科, 等. 光纤光栅应变-温度传感器的原理及进展[J]. 光纤器件, 2006, 43 (10): 51-56.  
ZHOU Chun-xin, ZENG Qing-ke, et al. Principle and Progress of Fiber Grating Strain-Temperature Sensors[J]. Aser & Optoelectronics Progress, 2006, 43 (10): 51-56.
- [10] 刘念, 谢驰. 电气设备温度监测技术研究[J]. 电工技术杂志, 1999, 6: 30-32.  
LIU Nian, XIE Chi. Study of Temperature Monitoring for Electrical Equipment[J]. Electrotechnical Journal, 1999, 6: 30-32.
- [11] Mukhopadhyay N K, Dutta B K, Kushwaha H S. On-line Fatigue-creep Monitoring System for High-temperature Components of Power Plants[J]. International Journal of Fatigue, 2001, (23): 549-560.
- [12] 钟小江, 全卫国, 李宝树. 光纤光栅传感器技术及其在电力系统中的应用[J]. 传感器世界, 2007, 5: 25-30.  
ZHONG Xiao-jiang, TONG Wei-guo, LI Bao-shu. The Fiber Grating Sensors Technology and Its Applications in Power System[J]. Sensor World, 2007, 5: 25-30.
- [13] Lee Kwang Y, Velas, John P, et al. Development of an Intelligent Monitoring System with High Temperature Distributed Fiber-optic Sensor for Fossil-fuel Power Plants[M]. IEEE Power Engineering Society General

- Meeting, 2004: 1989-1994.
- [14] Palmer Matthew E, Fielder Robert S, et al. Novel, Fiber Optic, Hybrid Pressure and Temperature Sensor Designed for High-temperature Gen-IV Reactor Applications[A]. in: 5th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation Controls, and Human Machine Interface Technology[C]. 2006. 55-62.
- [15] Yilmaz Gunes, Karlik Sait Eser. A distributed Optical Fiber Sensor for Temperature Detection in Power Cables[J]. Sensors and Actuators, 2006, 125 (2): 148-155.
- [16] Narendran Nadarajah, Weiss Joseph M. Fiber Optic Strain and Temperature Sensor for Power Plant Applications[J]. The International Society for Optical Engineering, 1996, 2594: 149-158.
- [17] 汤荣平. 分布式光纤测温系统在小湾公坝温度监测中的运用[J]. 大坝与安全, 2007, 6: 43-48.  
TANG Rong-ping. Application of Distributed Optical Fiber Temperature Measurement System in Temperature Monitoring of Xiaowan Arch Dam[J]. Dam & Safety, 2007, 6: 43-48.
- [18] Allan Dennis J. Fires and Explosions in Substations[A]. in: IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[A]. 2002. 504-507.
- [19] 冯俊承, 刘建平. 济钢电缆火灾的启示及防火管理[J]. 冶金动力, 2003, 2: 10-11.  
FENG Jun-cheng, LIU Jian-ping. Enlightenment and Fireproof Management of Cable of Jinan Iron & Steel Co[J]. Metallurgical Power, 2003, 2: 10-11.
- [20] Fitch A, Basey W, Nicolls A W. Distributed Temperature Measurement on a Power Cable Using Optical Fibres Incorporated in the Construction[J]. IEE Conference Publication, 1992, 363: 282-285.
- [21] 何明科, 张佩宗, 李永丽. 分布式光纤测温技术在电力设备过热建中的应用[J]. 电力设备, 2007, 8 (10): 30-32.  
HE Ming-ke, ZHANG Pei-zong, LI Yong-li. Application of Distributed Temperature Sensing Technology for Power Equipment Monitoring[J]. Electrical Equipment, 2007, 8 (10): 30-32.
- [22] Boiarski A A, Pilate G, Fink T, et al. Temperature Measurements in Power Plant Equipment Using Distributed Fiber Optic Sensing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (4): 1771-1778.
- [23] 肖洪, 潘贞存. 电力电缆接头运行温度的在线监测[J]. 自动化仪表, 2002, 23 (10): 31-34.  
XIAO Hong, PAN Zhen-cun. On-line Monitoring of the Operation Temperature of the Connectors of Electric Cables[J]. Process Automation Instrumentation, 2002, 23 (10): 31-34.
- [24] Nishimoto T, Miyahara T, Takehana H, et al. Development of 66 kV XLPE Submarine Cable Using Optical Fiber as a Mechanical Damage-detection Sensor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (4): 1711-1737.
- [25] 王立, 李华春, 等. 220kV 电缆分布式光纤测温系统运行情况分析[J]. 电力设备, 2007, 8 (6): 36-41.  
WANG Li, LI Hua-chun, et al. Operation Condition Analysis of Distributed Optical Fiber Thermometric System for 220kV Cable[J]. Electrical Equipment, 2007, 8 (6): 36-41.
- [26] Cchrukupalli S, Macphail G A, Jue J S, et al. Application of Distributed Fiber Optic Temperature Sensing on BC Hydro's 525 kV Submarine Cable System[A]. in: CIGRE[C]. Paris: 2006.
- [27] 李军, 卞超, 吴珺. 电力电缆光纤光栅测温在线监测系统[J]. 江苏电机工程, 2005, 24 (1): 6-8.  
LI Jun, BIAN Chao, WU Jun. The Optical Fiber Grating Temperature On-line Monitoring System of Power Cable[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24 (1): 6-8.
- [28] RAO Yun-Jiang. Recent progress in in-fibre Bragg grating sensors: Applications[J]. The International Society for Optical Engineering, 1998, 3555: 429-441.
- [29] 魏玉宾, 侯培亮, 等. 新型光纤光栅温度传感系统在电力测温中的应用[J]. 中国仪器仪表, 2007, 12: 57-60.  
WEI Yu-bin, HOU Pei-liang, et al. Application of the New Fiber-optical Grating Temperature Sensing System in Electric Power System[J]. China Instrumentation, 2007, 12: 57-60.
- [30] 李继涛, 王福志. 光纤感温式 220kV XLPE 绝缘电力电缆及应用[J]. 电线电缆, 2006, 2: 45-46.  
LI Ji-tao, WANG Fu-zhi. 220kV XLPE Power Cables Containing Optic Fiber Temperature Sensor[J]. Electrical Wire & Cable, 2006, 2: 45-46.
- [31] 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, 7: 11-14.  
LIU Ying, CAO Xiao-long. Research and Application of Online Temperature and Load Monitoring for Power Cables[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007, 7: 11-14.
- [32] 张晓虹, 蒋雄伟, 等. 分布式光纤温度传感器在交联聚乙烯绝缘地下电缆故障检测中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23 (23): 36-39.  
ZHANG Xiaohong, JIANG Xiongwei. Application of Fiber Optic Distributed Temperature Sensor to Fault Detecting of XLPE Insulated Underground Cable[J]. Power System Technology, 1999, 23 (23): 36-39.
- [33] Hanna M A, Chikhani A Y. Thermal Anaysis of Power in Multi-layered Soil[J]. IEEE Trans on Power Delivery,

1994, 9 (1) : 572-578.

[34] 陈雷, 杨国梁. 电力变压器温度数据采集子系统的设计[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27 (5) : 117-120. CHEN Lei, YANG Guo-liang. Heat Protection for Electric Transformers[J]. Techniques of Automation and Application, 2008, 27 (5) : 117-120.

[35] Meliopoulos A P. State Estimation Methods Applied to Transformer Monitoring[A]. in: IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. 2001. 419-423.

[36] Ribeiro A B, Lobo Eira N. Multi-point Fiber Optic Hot-spot Network Integrated into a High Power Transformer Proceedings of SPIE[A]. in : The International Society for Optical Engineering[C]. 2007.

[37] 陈淑谨, 王世阁, 刘富家. 变压器绕组热点在线监测装置的研制与应用[J]. 变压器, 2000, 37 (8) : 23-27. CHEN Shu-jin, WANG Shi-ge, LIU Fu-jia. Development and Application of on-line Monitoring Device of Transformer Winding Heat Spot[J]. Transformer, 2000, 37 (8) : 23-27.

[38] Kim Myonghwan Lee June-Ho, et al. A Study on Internal Temperature Monitoring System for Power Transformer Using Optical Fiber Bragg Grating Sensors[A]. in: Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials[C]. 2008. 163-166.

[39] 钱政, 孙焦德. 电力变压器绕组热点状态的在线监测技术[J]. 高电压技术, 2003, 29 (9) : 26-28. QIAN Zheng, SUN Jiao-de. On-line Monitoring of Hot-Spot Temperature in Transformer Winding[J]. High

Voltage Engineering, 2003, 29 (9) : 26-28.

[40] 孟庆民. 光纤温度传感器在电力高压开关在线监测中的应用[J]. 传感器世界, 2005, 7: 19-22. MENG Qing-min. Application on Temperature Monitoring for HV Switches Based on Fiber-Optic Sensors[J]. Sensor World, 2005, 7: 19-22.

[41] 毛献辉, 施清平. 光纤温度传感器在电力设备安全监测中的应用[J]. 计测技术, 2007, 27 (5) : 20-23. MAO Xian-hui, SHI Qing-ping. Application of Optical Fiber Sensor to Security Monitoring of Electrical Devices[J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27 (5) : 20-23.

[42] 时斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33 (8) : 169-174. SHI Bin. HV Switchgear Temperature On-line Monitoring System with Distributed Optical Fiber Sensor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (8) : 169-174.

收稿日期: 2009-01-15; 修回日期: 2009-05-14

作者简介:

李强 (1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为配电网优化规划、电缆故障诊断等研究; E-mail: lmk\_upc@yahoo.com.cn

王艳松 (1965-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为电能质量分析与谐波治理, 电网的优化规划与节能技术, 电网故障诊断与配电自动化等。

(上接第 86 页 continued from page 86) 时, 提出了一种基于准同步算法与 DFT 相结合的误差测量方法, 有效地解决了校验过程中电网频率波动对校验精度的影响问题。研究表明, 基于上述校验方法的电子式互感器校验系统满足现场测试的精度要求, 今后的研究工作应重点考虑校验系统的运输、安装以及现场测试环境的要求, 为校验系统构建一个操作方便的工作平台, 以最终应用于工程实践。

参考文献

[1] IEC40044-8—2002, Electronic Current Transformers[S].

[2] 钱政, 李童杰, 张翔. 电子式互感器校验方法的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1316-1319. QIAN Zheng, LI Tong-jie, ZHANG Xiang. Design and Realization of Calibration Method of Electronic Transformer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1316-1319.

[3] 戴先中, 唐统一. 周期信号谐波分析的一种新方法[J].

仪器仪表学报, 1989, 10(3): 248 -255. DAI Xian-zhong, TANG Tong-yi. A Novel Method for Spectrum Analysis of Periodic Signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1989, 10(3): 248-255.

[4] 李英英, 王恒福, 葛荣尚. 用准同步离散 Fourier 变换实现高准确度谐波分析[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(5): 47-50. LI Fu-ying, WANG Heng-fu, GE Rong-shang. Realization of High Precision Harmonics Analysis with Pleisiochronous DFT Arithmetic[J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 1999, 39(5): 47-50.

收稿日期: 2009-02-07

作者简介:

马永跃 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护测试技术; E-mail: mayoyue@163.com

黄梅 (1959-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统建模及应用、接入系统分析、继电保护及自动化的教学与科研工作。