

# 500kV 以上超高电压等级油浸式变压器荧光光纤温度监测系统研究

汪晨<sup>1</sup> 程林<sup>2</sup> 邓建钢<sup>2</sup> 陆云才<sup>3</sup>

(1.合肥零度光电科技有限公司, 合肥 230000; 2.国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430000; 3.国网江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 210024)

**摘要** 超高压油浸式变压器内部绕组温度实时监测是保障变压器可靠运行的重要部分, 现有的超高压油浸式变压器内部绕组温度是通过绕组温度计算模型推算而来。变压器内部热点温度, 除了由于线圈发热通过热传递引起其他位置温度的变化外, 还与变压器线圈附近的磁通量有关, 通过模型推算变压器内部温度分布, 误差较大。本文论述了基于荧光余晖衰减特性与温度关系, 研究出一种荧光光纤温度传感技术, 给出了传感器荧光材料特性、结构封装, 验证了传感器的测温精度和所使用材料的安全可靠性。该温度监测系统已经成功应用 500kV 以上超高压等级油浸式变压器中, 实现了超高压油浸式变压器内部绕组温度真正意义上的在线监测。

**关键词** 荧光光纤温度传感器; 荧光寿命; 工频耐压; 雷电冲击; 500kV 以上超高电压等级油浸式变压器

## Fluorescence Fiber Temperature Monitoring System Reserach Used for Above 500kV Ultra High voltage level Oil-immersed Transformers

Wang Chen<sup>1</sup>, Lian Zilong<sup>1</sup>, Cheng Lin<sup>2</sup>, Deng Jiangang<sup>2</sup>, Lu Yuncai<sup>3</sup>

(1.Beijing Oriental RayZer Technolongy Ltd, Beijing100085 2.State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan NARI limited liability company, Wuhan430000 3.State Grid Jiangsu Electric Power & Research Instiute, Nanjing210024)

**Abstract** Internal winding temperature real-time monitoring is an important part of guarantee reliable operation in ultra high voltage level oil-immersed transformers, the existing way to measure internal winding temperature through calculation and winding temperature calculation model. The impact of transformers internal hot-spot temperature is not only the coil temperature fever caused by heat transfer to other position changes but also the magnetic flux close to the transformer coil. Through the model calculated the temperature distribution inside the transformer have big error. This paper discusses based on the fluorescent light attenuation and temperature, find a fluorescence optical fiber temperature sensing technology, provide fluorescent sensor material properties and package structure, Verify the temperature measurement precision of the sensor and the safety and reliability of the used materials. The temperature monitoring system has been successfully applied above 500kv ultra high voltage level oil-immersed transformers, Realize the ultrahigh pressure oil-immersed transformer winding temperature on-line monitoring.

**Keywords:** Fluorescence optical fiber temperature sensor; fluorescence lifetime; Power frequency withstand voltage; Lightning shock; Above 500kv ultra high voltage level oil-immersed transformers

变压器是电网一次设备的重要组成部分, 变压器的绕组热点温度是决定其绝缘寿命的主要因素。从变压器的绝缘寿命看, 一般遵循六度法则: 年平

均温度为 98℃时具有正常寿命, 当超过或达不到 98℃时, 每上升或降低 6℃, 变压器寿命降低一半或延长一倍。

油浸式电力变压器温度量测技术受制于变压器内部环境高电压、大电流、高绝缘以及强电磁场干扰的影响,基于传统电信号测量技术使用的热电偶、热电阻传感器无法满足变压器内部绕组热点温度测量的技术需求。由于长期缺乏变压器热点温度监测技术和设备,出于安全考虑,国内诸多变压器仅运行在 50-60% 的额定容量下,造成现有容量的极大浪费,非常不经济。对变压器热点温度监测能够带来以下收益:(1)可在保证安全的情况下输送更大负荷,获得更大的经济收益;(2)更加直观的监测和评估变压器的运行情况,保障变压器的安全;(3)提前发现过热问题,提前采取措施,避免恶性事故的发生;(4)避免变压器超高温运行,降低绝缘的老化速度,延长变压器寿命。

伴随着光电子技术的发展,光纤传感器以其体积小、耐高温、耐高压、抗腐蚀、绝缘性能好等诸多优势非常适合油浸式变压器内部绕组热点温度的测量。目前在 220kV 以上等级变压器内部的温度监测,光纤传感器以其无可取代的性能成为首选方案。但是,到目前为止真正在 500kV 以上变压器内部绕组温度监测也未敢直接采用包括光纤测温在内的任何测温手段。究其原因,主要还是在考虑探头工频耐压、雷电击穿、爬电、放电等问题方面国内没有系统的测试手段和方案。本文针对高等级变压器设计要求,特别设计了耐受高等级电压的光纤温度探头,并经过工频耐压及雷电冲击试验,完全达到变压器内部高等级电压安装要求。本实验还针对一台 500kV 的高等级变压器的内部温度进行了探头安装,以及全部的出厂检测,实验验证本荧光光纤测温系统完全符合出厂要求。

## 1 常见光纤温度传感器对比

荧光光纤温度传感器是基于荧光物质受到激发从而产生荧光,若其中某个参数受温度影响、调制并与温度成单值关系,那么便可以利用这种单调关系对温度进行测量。荧光物质的发光是由于能量高的光照射荧光物质,激发出比其能量低的荧光,激发出的荧光强度随时间成指数规律衰减。荧光衰减时间是温度参数的单值函数,温度升高,荧光寿命减小,通过测量荧光寿命可以得到温度值,利用该方法测量的温度只取决于荧光寿命,而与其他参量无关。

点式光纤温度传感器除了荧光光纤温度传感器外还有半导体光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器,另外还有基于拉曼/布里渊散射的分布式光纤温度传感器。

半导体光纤温度传感器属于光强调制型传感器,如果以光强解调原理的,实际使用过程中容易收到温度、光源强度、光纤微弯效益、耦合损耗等因素的影响,受干扰情况比较严重,以波长为解调原则的,整个系统又会受成本影响。基于拉曼/布里渊散射的光纤传感器测量精度、空间分辨率和测温范围相互制约,保持几个摄氏度的测温误差,其空间定位误差在一米左右,对于变压器内部使用误差较大,一般多数应用于长距离电缆的分布温度监测。

从技术角度分析,荧光和光纤光栅温度传感器分别基于荧光强度和波长信号解调,不受光强影响,使用过程中限制较少,是两种比较适合变压器内部温度测量的传感器。相比于光纤光栅,荧光方式的测温原理仅跟所处环境的温度有关系,并不与压力、应力、形变等其他任何因素相关,而光纤光栅在原理上会受所有这些因素的干扰,所以光栅的封装要求非常高。很显然,针对需要安装在要求持续工作几十年的变压器内部的测温探头,荧光测温原理会成为首选的方式。

长期以来应用于变压器内部温度测量的荧光光纤温度传感器被国外产品垄断市场,其价格昂贵,限制了光纤测温技术在变压器大规模应用推广。据我们所知,即使是国外的测温产品也未安装到 500kV 等级变压器绕组最高电压端。

## 2 传感器的荧光材料的选择与荧光材料封装及固定安装方式

荧光材料作为光纤温度传感器感温部分,其被激发后辐射出的荧光余晖衰减特性直接影响了整个温度传感器的性能。荧光材料的选择是整个传感器的核心之一,目前市面上荧光粉样式种类繁多,通常在灯具及交通应用中居多。材料大多为卤磷酸盐类和稀土三基色荧光粉,这类荧光粉荧光余晖时间较长,同一温度下荧光余晖衰减曲线的一致性差,并不适用于温度传感使用。

荧光材料的选择需要满足几个要点:(1)荧光物质能够被特定波长的光所激发,在实际应用中激发光与辐射的荧光波长不能太接近;(2)荧光材料衰减时间一致性高,当激励光停止时,荧光材料就会立刻停止发光,温度相同时,衰减时间常数相同;(3)荧光余晖衰减的时间常数在温度变化时,时间常数稳定变化;(4)荧光材料化学性质稳定,在空气中中长期暴露不氧化、耐腐蚀、高等级耐油性;在常温状态下,荧光材料余晖衰减时间在 3~5ms 内。

Ba3MgSi2O8:Eu2+,Mn2+ 荧光粉采用非均相沉

淀法制备，在进紫外光波段激发条件下，占据 Ba3MgSi2O8 晶格上 Ba2+格位的 Mn2+离子的 3d5 能级的 4T1→6A1 跃迁发射 605nm 红光。硅酸钡镁为基质制备的荧光粉化学特性稳定，能够满足荧光温度传感器对荧光材料的选材要求。

电力系统的工业应用环境，对传感器的机械强度具有一定的要求，要解决在安装过程中抗轴向拉力的相关问题。传感器采用 PFA 高等级耐压材料作为光纤的外保护套管，使用特氟龙绝缘块固定在光纤末端作为抗轴向拉力结构件。

荧光材料本身为粉末状，为了不改变荧光物质的物理属性，不宜二次加工。通过玻璃熔接技术将粉末状荧光材料封装在透明玻璃管中，光纤端面被荧光材料包裹住确保荧光材料被激发出的荧光能够耦合入光纤中。通过玻璃熔接方式能够满足探头在使用过程中的机械强度：

具有绝缘固定块的抗轴向拉力设计，配合油浸式变压器用绝缘垫块的开孔，能够将荧光光纤温度传感器牢固地安装在变压器的线圈内。通常变压器内部线圈绕好后，在套装过程中即可进行荧光光纤温度传感器的安装。在变压器绝缘垫块上根据设定的尺寸进行开孔，随着绝缘垫块一起将荧光光纤温度传感器装在变压器绕组内。荧光光纤温度传感器安装，如下图 1 所示；

荧光光纤温度传感器与绝缘垫块的安装方式图所示：

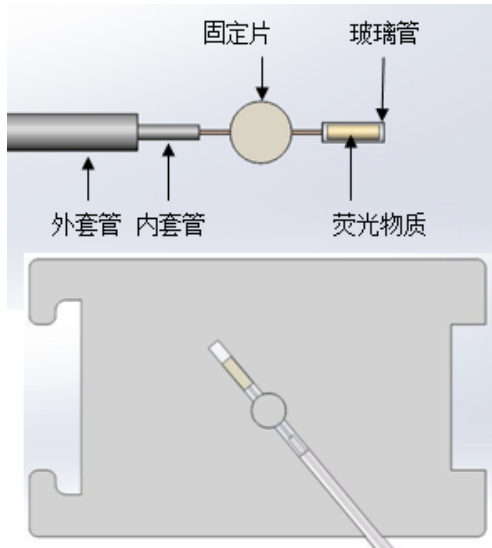


图 1 荧光光纤温度传感器安装示意图

### 3 传感器温度精度及可靠性测试

#### 3.1 精度验证

通过解析荧光曲线的衰减函数得到被测温点的

温度值，为了验证传感器解析得出温度值的准确性，北京市计量检测科学研究院对传感器进行过校准认证实验。实验通过零下 50 到 240 度区间进行升温过程，再选取 12 个温度点让荧光光纤传感器得出的温度值与标准油槽温度值进行对比。

根据测量验证报告，荧光光纤温度传感器温度测量精度能够达到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，该精度能够满足电力系统中的测温要求。温度范围涵盖变压器内部温度变化区间，荧光光纤温度传感器解析的温度准确性完全能够满足变压器内部温度的检测。

#### 3.2 工频耐压及雷电冲击试验验证

变压器内部电场环境复杂，传感器是需要安装在变压器内部，其本身所用的材料的安全性显得尤为重要。为了验证荧光光纤温度传感器的绝缘性能，西安高压研究院对荧光光纤温度传感器进行了工频耐压和雷电冲击测试。

空气的绝缘等级要远低于变压器油，被测试样品进行真空脱气处理。试验过程中模拟油浸式变压器内部的高压环境，使用特制试验工装进行工频耐压和雷电冲击试验。整体工装结构包含电极、均压球、导电杆、支撑架等，工装两端分别接高压导线和接地导线。测试工装示意图如图 2，工频耐压和雷电冲击试验工装相同，试验参考标准 ASTM D2413、ASTM D149、ASTM D3426。



图 2 高压环境的试验现场

工频耐压试验，电极间距设定为 25mm，荧光光纤温度传感器穿过测试工装中左边部分的通孔，荧光光纤温度传感器探头与右边电极接触。工装整体放置在充满变压器油的容器中，工装两端分别接

高压导线和接地线。

在试区大气  $P=96.5\text{kPa}$ 、 $T=29.4^{\circ}\text{C}$ 、 $RH=33\%$  的条件下，采用逐步加压方式，直至样品达到加压设备的极限或被击穿（极限加压电压为  $200\text{kV}$ ）。起始工频耐受电压为  $80.2\text{kV}$  之后不经降压而直接逐步升高耐受电压。

表 1 工频耐压试验数据表

样品	耐受电压 /(KV)	耐压强度 /(KV/mm)	备注
光纤探头 1	164.1	6.56	-
光纤探头 2	160.1	6.40	-
光纤探头 3	165.6	6.62	-
光纤探头 4	195.2	7.81	-
特氟龙保护套 1	159.2	6.37	-
特氟龙保护套 2	141.2	5.65	-
特氟龙保护套 3	150.1	6.01	-
特氟龙保护套 4	150.7	6.02	-

试验结果表明，荧光光纤温度传感器的工频耐压参数，能够安全可靠的安装在油浸式变压器内部。

雷电冲击试验所用的试验工装及安装方式与工频耐压试验是一样的。试区大气  $P=96.4\text{kPa}$ 、 $T=30.6^{\circ}\text{C}$ 、 $RH=46\%$  条件下。起始加压  $350\text{kV}$ ，同一电压区间加压三次后再提高施加电压。电压频率为  $50\text{Hz}$ ，脉冲波为  $1.2/50\mu\text{s}$ ，间隔电压  $50\text{kV}$ ，加压保持  $20\text{s}$ 。最少达到第二级加压未出现击穿，算为有效测试，高于二级加压或目标值出现击穿为有效测试电压值。

表 2 冲击试验数据表

样品	耐受电压 /(kV)	耐压强度 /(kV/mm)	备注
光纤探头 1	501.2	20.05	12 次无击穿
光纤探头 2	502.3	20.09	12 次无击穿
光纤探头 3	500.3	20.01	12 次无击穿
光纤探头 4	502.2	20.08	12 次无击穿
特氟龙保护套 1	500.8	20.03	12 次无击穿
特氟龙保护套 2	500	20.00	12 次无击穿
特氟龙保护套 3	501.3	20.05	12 次无击穿
特氟龙保护套 4	501.8	20.07	12 次无击穿

试验结果表明，荧光光纤温度传感器能够耐受的电压冲击。

## 4 实践应用

荧光光纤温度传感器在 2016 年 5 月份应用于一台  $500\text{kV}$  油浸式变压器内部温度监测中，主要监测

变压器内部绕组、拉板、压钉、油口等 32 个位置的热力分布情况。油浸式变压器在出厂前需要进行一系列的出厂检验试验，其中变压器的温升试验是用来验证变压在工作时内部线圈及相关热点温度是否在其正常工作范围内的重要手段。

荧光光纤温度传感器在  $500\text{kV}$  油浸式变压器中的安装过程中可使用手持仪表对荧光光纤温度传感器进行测试，确保安装成功。线圈部分安装完成后，荧光光纤温度传感器随线圈一同进入干燥炉进行干燥。待干燥完成后，安装剩余位置上的荧光光纤传感器。压钉、拉板、油口等位置直接通过捆绑的方式，固定在需要测量的位置上。

荧光光纤测温传感器感温部分安装需要被检测的变压器内部热点上，连接器端通过贯通器连接到测温主机上，对荧光信号进行解析并实时显示温度值。数据通过 485 总线传输到监视上位机，上位机能够显示实时温度曲线并将温度保存在后台数据库中。实现整个温度监测系统的运行。

光纤温度传感器安装到  $500\text{kV}$  变压器内部，跟随变压器一同进行温升试验。变压器需加载  $80\text{kV}$  电压，通过改变变压器负载，增大变压器线圈电流使得线圈发热，风机启动同时内部变压器油进行循环散热。整个温升过程需要加压  $80\text{kV}$  后保持 10 个小时以上，再撤销电压测量变压器整体阻抗，然后再加  $30\text{kV}$  电压保持 4 个小时。整个过程线圈温度会快速上升到最大值，由于变压器油的循环散热，线圈的温度会相对比较稳定。在撤销电压测量阻抗过程中，线圈内没有电流，线圈温度会下降得比较快，再次加  $30\text{kV}$  电压后温度再次快速上升。由于第二次加压的电压值低，在第二次加压后，线圈温度值应低于第一次加压后的温度值。

荧光光纤温度传感器在整个温升过程中实时监测并记录温度数据，每 40 秒钟记录一个温度值，温度曲线如图 3：

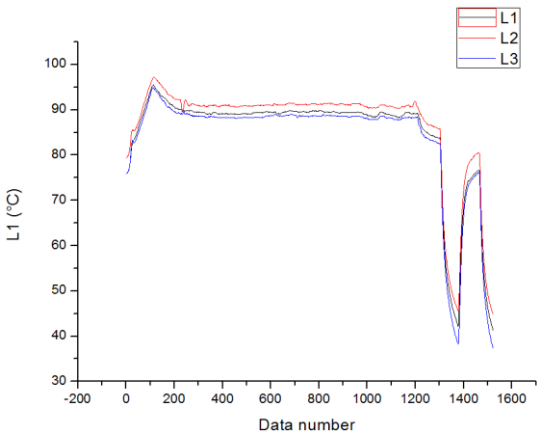


图3 线圈位置温度变化过程曲线

整个温升试验温度变化趋势符合前期推测,并且能够准确的测量出各个热点的具体温度值,为变压器的研究提供可靠的数据来源。荧光光纤温度传感器安装在变压器内部与整个变压器一起进行绝缘与耐压试验,试验均能够顺利通过再一次验证荧光光纤温度传感器的安全可靠。

## 5 结论

荧光光纤传感器将无源测温方式成功应用到超高压等级油浸式变压器中,解决了变压器内部由于高压环境的局限难以对温度进行实时监控的难题,克服了传统测温技术在电力系统应用的不足。荧光光纤传感器,体积小,安全性高,通过验证荧光光纤温度传感器的安全可靠,荧光光纤温度传感器完全能够满足长期在高压及超高压环境中的耐受。

随着电力系统的发展,对电力设备的温度监测将会越来越被重视。荧光温度传感技术较其他光纤测温技术拥有成本低,精度高,使用方便等特点,必将促进其在电力测温市场的发展。

荧光光纤传感器在变压器公司500kV油浸式变压器中监测温度分布,是荧光光纤传感器在全国最高等级变压器中的首次应用,是荧光光纤传感器在的电力系统中的标志性应用。

## 参考文献

[1] 阳林,史尊伟,黄吉超等.基于BOTDR分布式光纤传

感器技术的架空线路温度检测现场试验研究.高电压技术,2015,41(3):925-930

- [2] 钱政,孙焦德,袁克道,孙典升.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.
- [3] 吕政扬,刘晓安.变压器在线监测技术的新突破[J].西北电力技术,2003(3):45-47.
- [4] IEC 60076—2, Power Transformers-Temperature Rise.
- [5] ASTM D149-97a Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
- [6] ASTM D2413 Standard Practice for Preparation of Insulating Paper and Board Impregnated with a Liquid Dielectric
- [7] ASTM D3426 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves
- [8] 丁跃清,吴高林,袁静,宋伟.基于光纤测温技术的变压器绕组热点温度分析研究[J].变压器,2012,49(11):53-57
- [9] 肖冰,徐迪,基于荧光衰减原理的光纤绕组测温技术研究.[J].华北电力技术,2012(4):7-9

## 作者简介

汪晨(1990.08-)男,汉族,安徽省桐城市人,硕士研究生,中级嵌入式工程师,主要从事光传感研究。