

光纤温度热点监测系统 在高压电力设备中的应用概述

摘要：实时监测大电机/变压器/互感器绕组等高压设备的热点温度，对于提高设备的安全运行、延长设备绝缘寿命、即时判断设备的实际负荷能力以提高设备的经济效益等，都具有非常现实的意义。而目前我国输变电及发电行业在这方面的实际应用几乎为零，利用 PT100 等电类温度传感器间接测量高压部件温度，不能够满足实时、稳定、可靠监控温度的实际需求，突显了我国与发达国家在输变电装备领域的差距。

本文论述了目前国际上成熟运用荧光式光纤传感器，监测高压设备热点温度的发展现状，分析了国内推广运用这一新技术所面临的问题及目前现状，分析了应用的可行性、方法及前景。



大电机、变压器等高压电气设备，是发电和输变电系统的关键设备，它们的安全可靠性和使用寿命，对整个输变电系统的安全可靠运行和寿命是至关重要的。这些高压电气设备大多采用封闭结构，长期工作在高电压、大电流、强磁场的环境中，使得热量聚集。发热温升增加了输电系统的损耗，如果散热不良还会危及设备的正常运行，甚至会造成故障，社会不良影响和经济损失不可估量。

传统的铂电阻 RTD 等“电类”测温技术，由于电子器件探头本身存在绝缘、电磁干扰等问题，需要隔着多层绝缘和屏蔽层来测量温度，而当电压超过一定等级时，只能采用间接方法测量，另外系统还存在数据漂移、可靠、稳定性低、系统可维护性差、故障率高、误报严重等等问题，根本无法提供实时、稳定、可靠的温度数据，使得在电力监控系统中，温度信息的可信度下降，从而使供电系统预测、预防和监控恶性事故的安全保障技术措施中、缺少了能够直接反映事故征兆的温度参数。因此，一种实时、稳定、可靠，能够适应高压、电磁环境，可维护性好的测温系统，成为电力系统急需解决的问题。

荧光式温度传感探头是由普通多模光纤和在其顶部安装的荧光物质体组成。其测温原理是：荧光物质接受一定波长(受激谱)的光激励后，受激辐射出荧光能量。激励消失后，荧光发光的持续性取决于荧光物质特性、环境因素，以及激发状

态的寿命。这种受激发荧光通常是按指数方式衰减的，称衰减的时间常数为荧光寿命或荧光衰落时间(ns)。因为在不同的环境温度下，荧光寿命也不同。因此通过测量荧光寿命的长短，就可以得知当时的环境温度。

由于光纤温度传感器产品全绝缘、小尺寸，可以直接测出高压电气设备内部发热点的最高温度。这样就可以做到实时监测、监控温度，预测、预防事故，同时实时采集运行数据，预测设备的绝缘寿命，判断设备的实际负荷能力，为设备能否超负荷安全运行提供科学依据，提高经济效益。

一、对高压电气设备实时在线温度监测的意义

1. 对于在大电机端部汇流环、轴瓦、定子测温系统中，采用荧光光纤温度传感器具有重大意义。荧光光纤温度传感探头采用聚四氟乙烯材料制成，具有长期可靠稳定、长寿命、本质安全、高压绝缘、抗电磁干扰等特性，彻底弥补了铂电阻测温原件的缺陷，使大电机测温完全实现稳定可靠，终身无需更换和校验。
2. 在变压器等高压设备内部的热点附近埋光纤式温度传感器，从多个传感器探测绕组等设备内部热点温度是将来的发展趋势。从安全角度考虑，在不同的外围温度下，以不同容量运行的变压器，其绕组热点温度不能超过绝缘材料耐热等级所允许的最高热点温度值。如油浸式变压器的最高热点温度限值为140℃，如果绕组热点温度超过了这一温度，则部分油就会因裂解而生成气体，绝缘材料的性能就会降低，导致因气体或绝缘击穿而发生事故。
3. 从变压器等高压设备的寿命角度来看，所选用的各种耐热等级的绝缘材料都有热老化寿命的温度指标。高压设备的寿命取决于绝缘的老化，而绝缘的老化又主要取决于运行的温度。就油浸式变压器而言，当绕组热点温度为98℃时具有额定标牌寿命；F级干式变压器绕组热点温度为140℃时具有额定标牌寿命。故在产品运行中必须注意设备最热点温度，不能超过该耐热等级的热点温度允许值。根据最新的研究表明，绕组热点温度每增减6K，绝缘预期寿命会减一半或增一倍。变压器在运行时，绕组温度分布是不均匀的，决定绝缘寿命的关键因素是绕组最热点的绝对温度，而不是绕组平均温度。新修订的电力变压器负载导则(IEC-354)认为：“绕组最热区域内达到的温度，是变压器负载值的最主要限制因数，故应尽一切努力来准确地决定这一温度值”。所以，对大容量变压器而言，必须在结构上保证绕组热点温度在合格范围内，在运行中能控制绕组热点温度的最高允许值，并能计及热点温度使绝缘预期寿命降低的情况，并设法以降低热点温度来补偿所由于温升而牺牲的寿命。
4. 从输变电设备的运行效率来看，在变压器配备了稳定可靠的温控系统之后，我们就可以根据该系统提供的参数，在合理的范围内充分发挥设备的负载能力，从而提高设备的经济运行效益。以北美一台100MVA的变压器为例：

1) 标定功率：100MVA

- 2) 假设因加装温控系统能够增加额外容量: 10%
- 3) 假设系统年超载工作时间为: 450 小时/年 (5%)
- 4) 输变电带来的经济利益: \$80/MWh
从 10% 超载负荷获得的年经济效益 = $1 \times 2 \times 3 \times 4 = \$360,000$
- 5) 测温系统安装成本: \$20,000
- 6) 假定变压器寿命 30 年, 约 225,000 hr
- 7) 在 110% 负荷时的寿命折损因子 (125°C): 3.4
因加装温控系统增加的平均成本 = $(5/6) * 7 * 3 = \$136$
因加装温控系统产生的年均直接经济利益: $\$360,000 - \$136 = \$359,864$

二、高压设备的热点温度监测监控的技术难点

直接测量高压设备的热点温度, 技术上有很多困难, 主要问题有: 高压绝缘、强电磁干扰、系统长期可靠稳定性等。目前国内高压电气设备温控技术主要采用 RTD 热电阻 (Pt100)、热电偶 (高阻线) 等电类传感器测温、压力式温度计、红外测温、传光型“光纤”温度传感模块和 GPRS 无线传输等。

以上这些技术方法, 首先遇到的困难是高压绝缘问题: 电类传感器、气压式测温系统 (如 [WTZK/BWY/BWR](#) 系列等)、以及红外测温等方法, 都面临无法彻底解决金属导线、金属零部件或屏蔽措施、高压区安装压力温包或红外探头对高压设备绝缘安全带来的绝缘隐患。

其次是电磁干扰问题, 弱电温度信号在强磁场环境中受到干扰, 使得系统的稳定可靠性受到置疑。

第三是金属导线和金属零部件在电磁环境中产生涡流、造成损耗和自身发热的问题。

第四的系统寿命问题, 尤其是传光型的点式“光纤型”温度传感器、GPRS 无线传输型温度传感系统和气压式测温系统, 系统寿命问题尤为突出:

- “光纤型”温度传感器 (如 [Optic-3000](#), [DTS-2](#) 等) 和 GPRS 无线传输型温度传感系统 (如 [AT-II 无线测温系统](#)) 存在模块内供电电池及其他零件长期在高温环境下工作寿命短及维护困难等问题, 造成系统整体可靠性下降, 实用性受到影响。

- 气压式测温系统会随着温包内部压力的泄漏而使整个测温系统报废。
- 荧光式光纤传感器探头结构简单, 其寿命仅仅取决于光纤和封装材料特性。



综上所述，热电阻 RTD、热电偶等**电类传感器**测温都需要用金属导线传输信号，由于电磁干扰、金属零部件/导线在强电磁环境下，存在严重的电磁干扰和涡流发热现象，以及无法保证长期稳定可靠的高压绝缘性能，使之在高压电气温度监测应用中，存在先天不足。

压力式温度传感器存在着测温腔体中高压气体或液体的泄露问题，其可靠使用寿命和灵敏度、精度都无法保证。金属制品温包在高压及强电磁环境中的安装也是很大的问题。

GPRS 无线传输和传光型的点式“光纤型”温度传感模块，可靠稳定性差，误报率高，维护困难，间隔一定时间就要更换发射/测温模块电池等问题，并且由于 PCB 板及其电子器件的存在，同样存在破坏设备原有绝缘的问题，使得该类产品在高压/电磁环境中的应用也存在不足。

红外测温为非接触式可视测温，只能在可视的情况下测量设备表面温度，并且易受环境温度和电磁场干扰，不易实现在线自动化监测监控，需要人工操作。而且电气设备内部空间狭小，发热点通常比较隐蔽，无法保证安装红外探头的安全距离。另外该方法还需要知道被测物体的发射率，要保证被测物体的辐射充分抵达红外探测器，还要尽量消除背景噪声。

另外，传统技术产品的感温探头体积过大（如 [Optic-3000](#) 为 6x3.2x2.8 cm）、存在金属零件（如屏蔽网、屏蔽外壳、压力温包、红外探头等）问题，也给上述测温系统在变压器绕组或其他高压电气设备内部安装带来不便，对系统对温度的时间响应速度带来不利影响。

以上方法受苛刻的环境条件及电磁干扰的影响都比较严重。技术手段的局限性，使得他们无法从根本上去除这些影响，因此也就无法根本解决提高系统可靠稳定性、减小测温系统对原有设备的负面影响等核心问题，这些都成为这些技术方法进一步发展应用的瓶颈。

三、光纤测温技术的发展现状及应用可行性

荧光式光纤传感器测温系统，是专门针对高压电气设备温度监测监控应用而设计的，它采用光学原理的传感器件和光信号传输通道，有着良好的电磁不敏感性，传感器尺寸小，可靠稳定，本安型，易于在狭小的高压设备内部安装，能很好

地适应高压和大电流的检测环境，从根本上解决了电类、压力类及红外测温系统的缺陷。构成光纤传感器测温探头的材料绝缘性能、化学和机械性能极佳，特别适合于高压环境，不会给大系统带来负面影响。

光纤传感器能够为监控系统提供更加准确可靠的线圈热点温度值，从而使设计人员能够准确把握温度对设备的影响，从而将风险准确控制在安全的范围之内。

从 2002 年开始，沈变就开始尝试在变压器中采用光纤传感器进行测温，之后在出口美国的多台大型变压器中，成功进行了商业应用，至今已经装备数千台，工作良好，成为国内第一家实际应用的设备制造商。现在光纤测温系统的技术成熟度和产品化程度，已经比几年有了大幅度的提高，目前价格也已经成倍下降。

2011-2012 年，东方电气和三峡电厂分别在三峡三台 700 兆瓦发电机组（其中两台蒸发冷却机组）中安装了该技术产品，成功地将该光纤测温技术应用到大型发电机组的在线监控系统，证明光纤测温技术在高压电气设备温度监测监控领域大面积应用的时机已经成熟。

针对光纤测温新技术在高压电气设备温度监测监控的应用，国家电网公司、电力设计院的多位专家从 2002 年起就开始关注并呼吁国家监管机构、设备制造厂商、发电和输变电企业和科研机构，积极推进该项技术的推广与应用，主要观点如下：

1. 光纤传感器是一项适用于高压设备测温、提高系统安全性的新技术。目前我国实际应用还较少，但非常值得在高压输变电领域推广应用。
2. 建议国内高压设备厂家接受这一技术作为工业标准，并积极开展在高压设备上的安装应用。
3. 建议输变电及发电行业业主在招标文件中，将这项技术纳入标书范畴。
4. 建议国内电力研究部门积极开展高压输变电系统中应用这一技术的研究。
5. 这一方法原理简单，技术先进，成本随着市场的迅速扩大正在快速降低，在达到一定应用量时，其费用不会比常规的测温设备费用高出多少，尤其与变压器、可控硅阀等大型设备配套安装时，其费用可以忽略不计，但却成为一个用户选择用其设备的有利理由。
6. 国家主管部门已经出台的变压器、大电机新标准中，都已经将光纤测温技术列为推荐技术选项，成为行业标准的大趋势。参考：

<http://dls.cec.org.cn/yijianzhengqiu/2011-09-19/68174.html>

四、目前阻碍光纤传感技术在高压电气设备中应用的主要问题

1. 部分厂家、业主及设计院对新技术不熟悉，不愿意主动承担应用新技术带来的政策、技术风险。
2. 该技术的应用给设备制造商在制造工艺及质量控制等方面提出一些新的要求：由于系统可以对绕组热点温度进行直测直读，要求制造商在设计、制造时，更好地解决散热冷却、绕组排列、电流密度、热点分布、漏磁及环

流涡流损耗等问题，同时还要解决光纤探头在线圈、铁心内部的安装流程等工艺问题。

3. 对新技术新产品的宣传推广力度有待加强。
4. 用户在等待质量稳定、价格适当的实用化、批量生产的成熟产品上市。

五、市场现状及应用前景

由英迪戈公司（INDIGO PRECISION Inc.）FOTS系列荧光式光纤传感技术产品，是专门针对高压电气设备温度监测而设计的，它无论在产品性能、质量，还是成本，都达到了全球领先的水平，具有最高的性能价格比。

光纤传感技术的应用，可以大幅度提高输变电设备的安全可靠性，提高设备运行效率，减轻人员劳动强度。随着市场认知度的提高、成熟产品的上市、设计及制造工艺的日趋完善、行业标准的逐步建立，光纤传感器技术在高压电气设备温度监测领域中广泛应用的前景是无可置疑。

六、结论及建议

光纤传感技术产品的特点非常突出，特别适合应用于高压电气设备的温度监测，相对于传统技术的优势是非常明显的，可以给输变电及发电行业带来直接的好处，是一项特别值得全面推广的新技术。

- 建议国家相关管理部门积极研究该技术在电力行业的推广与应用，积极培育市场，向国内研究机构提出明确需求，促进应用技术的市场化、产品化。
- 建议生产厂家积极研究该技术在设备制造中的应用，通过技术进步提高企业核心竞争力。比如在变压器等高压设备中埋设光纤传感器之前，可用先通过模拟计算，对高压设备热点温度的分布情况先作分析，确定最热点所在的大致位置。工艺设计方面可以采取一下措施：设计畅通油路、采用适当地绕组电流密度、采用换位导线降低环流耗及涡流耗、采用大功率高效冷却器等。
- 建议业主和设计部门在充分的市场调查基础上，积极推广这一技术在行业的应用，将该技术纳入项目招标书标准要求的范畴。
- 建议系统集成商积极围绕这个新技术产品，进行有针对性的应用开发，提高该技术的附加价值。
- 加大产业合作，建立行业规范，使光纤传感器产品的引进、研发、生产、宣传推广步入良性循环的轨道。