

光纤测温技术在核电主变压器的应用及建议

文/中广核集团苏州热工研究院有限公司 冯玉辉 高 超

变压器运行寿命很大程度取决于其绕组的热点温度。结合变压器光纤测温技术的原理，对几种变压器绕组温度测量方法进行了比较和优缺点分析，同时对光纤测温技术的实际应用情况进行了介绍，目前光纤测温技术已相对成熟，提出了光纤测温技术在核电主变压器上的应用建议。

核电厂主变压器作为对外输送电能的重要枢纽和保障核安全设施可靠运行的重要外电源，其设备健康和运行寿命直接影响核电厂的运行安全。变压器设备在运行过程中会在其电回路、磁回路及附属部件上产生热效应，内部温度过高将会影响变压器带载水平、健康状态和运行寿命等。核电厂主变压器具有长期满功率运行的特点，因此，对主变压器内部组件运行热点温度的监测和主变压器热寿命评估，已逐渐成为已商运一定年限（20年以上）的核电厂需重点关注和提前规划的工作。

变压器寿命评估简析

通常，核电厂反应堆通过许可证延续运行年限可达60年，即使运行期结束之后，其乏燃料的冷却仍然需要电源供给，换言之，变压器在核电厂现场需要运行最少60年的时间。按制造厂设计规范的要求，在正常运行条件下，变压器的预期设计寿命通常为30~40年，意味着核电厂在整个运行期间至少需整体更换一次变压器。从设备运行的可靠性和资产处置的经济性出发，选择更换变压器的最合理时间点就显得尤为重要。

变压器运行过程中内部产生的热、内部电场分布、承受的外部机械力与现场运维管理水平都会直

接影响到变压器运行寿命。其中，机械因素主要考虑变压器出口短路或近区短路电动力效应；电气因素主要考虑变压器内部缺陷存在的局部放电现象。核电厂主变压器高压出口均采用高压气体绝缘开关设备（GIS），低压出口均采用封闭母线，发生近区短路的可能性较低。从目前开展的群厂变压器运行在线局部放电监测情况看，各变压器运行状态良好。随着变压器健康状态评估方法（CHR）的推广，现场运维水平也有了一定提升。因此，通常对于长期满功率运行的变压器，其实际寿命就是固体绝缘材料——纤维绝缘纸（板）（以下简称“绝缘纸”）的寿命。绝缘纸老化速度与温度密切相关，随着温度的升高，绝缘纸聚合度将下降，在变压器内部振动和外部短路冲击的影响下可能会发生破裂，最终造成绕组匝间短路。某核电厂主变压器运行初期就存在运行温度高（低温过热）、绝缘油介质损耗及总烃超标等缺陷。以按GB 1094标准制造的变压器为例，其热点温度98℃时相对热老化率为1，相对老化率的计算公式为

$$V=2^{(\theta_h-98)/6} \quad (1)$$

式中， V 为相对老化率； θ_h 为热点温度，℃。

“六度法则”表明，对于非热改性纸，热点温度每升高6℃，变压器老化速度会加快1倍。

其中绝缘纸聚合度和油中糠醛含量可以反映其老化程度。绝缘纸聚合度反映绝缘纸的机械强度，但测量聚合度需要获取绝缘纸样品，实施困难。即使在变压器返厂吊罩检修过程中要取到有针对性的绝缘纸样品都不太现实，通常取端部引线绝缘纸样作为参考样本，而实际变压器绝缘纸样劣化最严重的样品应集中在变压器绕组热点区域。糠醛是绝缘纸老化产物，溶解在绝缘油中，易于测量，但糠醛含量受其他因素影响大，不管是变压器油处理（再生或滤油）还是更换变压器油，均会改变油中糠醛含量。

变压器内部最热点是绝缘纸聚合度下降最多的点，而最热点处的实际温度通常很难获得，因此，如果能准确监测到变压器绕组热点区域温度，就可以较准确地对变压器运行寿命开展综合评估。变压器设备健康隐患和故障发展与其绕组内部热点温升息息相关，通过变压器绕组光纤测温系统的应用，可以为变压器健康状态监测提供一个实时有效的解决方案。

变压器热点温度监测方法

大型电力变压器绕组内部温度分布是不太均匀的。变压器负载能力和预期寿命主要受绕组热点温度限制，绕组温度过高将影响变压器的安全可靠运行。通常电力变压器内部热点温度监测方法有直接测量法、间接测量法，其中间接测量法通过热模拟测量或通过计算预估变压器绕组热点温度，测量结果误差较大；直接测量法主要分为电信号和光信号两种。

1. 间接测量法

(1) 热模拟测量法

目前，各核电厂变压器均采用绕组温度指示器来进行变压器的温度监测，即在测量变压器的顶层油温的基础上叠加绕组电流模拟的绕组温升。绕组温度指示器形式有多种，以核电厂某大型变压器使用的绕组温度指示器为例（见图1），将感温包插入热电偶套管，套管内装配一个发热元件用于模拟绕组温度，取变压器套管电流互感器（TA）电流经标准运算后，模拟出绕组热点温度与顶层油温的差值。感温包内装满热膨胀系数大的气体或液体，用一根毛细管将其连接到另一根螺旋形的弹簧管上，

当温度升高时气体膨胀，弹簧管会轻轻展开，所产生的张力会传送至温度标定刻度盘上。事实上，因变压器的冷却方式和负荷曲线各有差异，通过此方式来获取绕组温度会导致重大误差。该方法的优点是经济性好，可直接启动冷却系统；缺点是准确性差，且测量温度有一定的时差。因为：①绕组冷却油道中的油温比顶层油温高；②冷却油道中油的时间常数比顶层油的时间常数要短；③负载突然变化时，油循环不能立即做出反应。

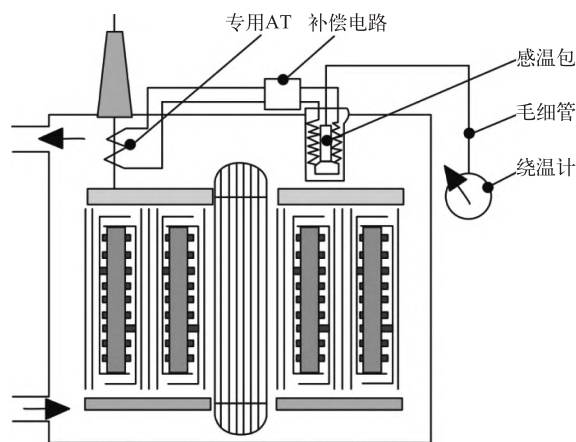


图1 WTI测温示意图

(2) 计算法

变压器在任何负载等级下绕组热点温升计算式为

$$\Delta \theta_h = \Delta \theta_{or} + \Delta \theta_{hr} = \Delta \theta_{or} + H g_r \quad (2)$$

式中， $\Delta \theta_h$ 为绕组热点温升； $\Delta \theta_{or}$ 为额定损耗下油箱内顶层油温对环境温度的温升； $\Delta \theta_{hr}$ 为额定电流下热点温度对油箱内顶层油温的温升； H 为热点系数； g_r 为绕组对油温差。

该方法的优点是经济、简便，缺点是计算参数由经验得出，准确率不高、通用性不强，在现场无法使用。

2. 直接测量法

(1) 电信号测量法

电信号测量法最具代表性的是热敏电阻电桥法和铂电阻法。但这些测温技术在变压器上运用仍存在一定的局限。如热敏电阻变化率为非线性，高温区测量不适用；而铂电阻测量热响应慢，耐冲击性、耐振动性差。由于变压器内部存在电压高、场强高的特点，这些测量方法容易受到干扰，测量准确性和稳定性都不太高。

(2) 光信号测量法

光信号测量法以光纤测温方式为代表,可满足变压器各种负载条件下的绕组内部热点温度测量。且光纤测温传感器可以在电压高、场强高的工况下稳定运行,具有抗电磁干扰、电绝缘、体积小和耐腐蚀等优点,光纤测温技术在电力变压器的绕组内部热点温度测量的应用已有30年历史。在各种负载条件下均能提供可靠的绕组温度,在整个变压器的生命周期中,可牢固耐用地进行温度监测。即使个别光纤测温探头损坏,也仅是失去对故障探头区域温度的监测,不会影响到其他测温探头的正常工作。

光纤测温原理

光纤测温技术的原理主要有荧光测温、光纤光栅测温 and 半导体测温。其中半导体砷化镓随着温度的升高,其禁带宽度将随之减小。随温度升高其本征吸收波长变大,同时透射率曲线向长波方向移动,但形状不变。通过测量透过砷化镓的光的强弱可达到对温度的精准稳定测量,典型的光纤测温系统在变压器中的安装示意图如图2所示。

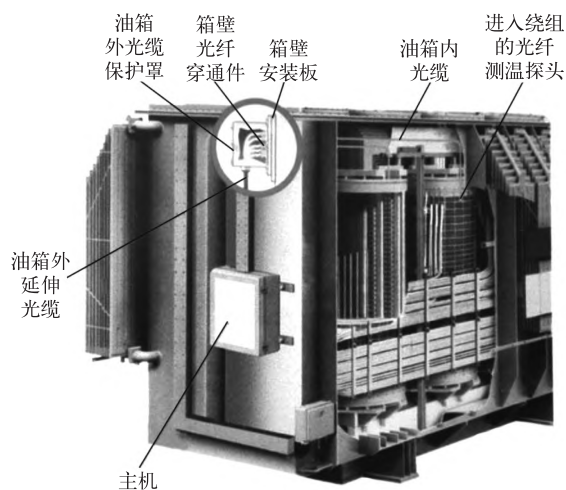


图2 光纤测温系统安装示意图

光纤测温技术在变压器上的应用

目前,光纤测温已广泛应用于国内500 kV变压器上,并在1 000 kV特高压输电变压器样机中安装了光纤绕组测温系统,在扎布罗日1 200 kV电压等级变压器上成功运行。国家电网公司近年的智能化变电站项目也有一定数量的光纤测温产品陆续投入

使用。国内外著名的变压器制造厂都在其制造的变压器产品中安装使用了光纤测温系统。某核电站电力变压器安装了在线光纤测温系统,投运至今光纤测温系统运行正常。

鉴于光纤测温技术原理不同,技术路线方向不同,不同厂家生产的光纤测温产品不尽相同,各有优缺点。本文仅以某公司生产的T/Guard系列光纤测温系统为例进行介绍。该系统光纤测温探头插入相邻线饼间的垫块中,在辐向垫块上开槽。由于垫块实际上阻止此位置的油循环,所以垫块处的温度梯度非常小,光纤测温探头测得的是两个相邻线饼的平均温度。同时测温光纤从与变压器贯穿部位采用带保护盒的光纤贯通器安装法兰,法兰配置氟橡胶密封圈。光纤贯通器设计简单,既不浪费光纤,密封效果又好,因此,光纤测温技术有很好的推广运用前景。

某变压器采用T/Guard系列绕组热点光纤测温系统,光纤探头安装示意图如图3所示。

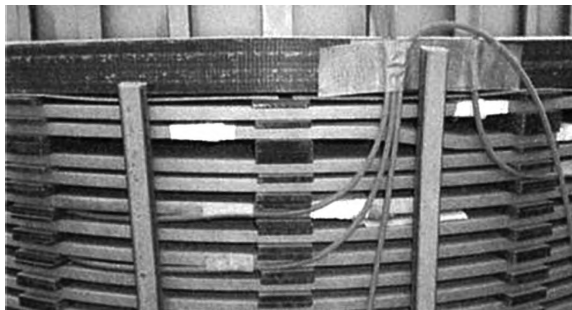


图3 光纤探头安装示例

光纤测温技术在核电主变压器的应用建议

随着光纤测温技术的不断成熟,未来变压器智能化、精细化管理将成为变压器运维管理的方向,尤其是光纤测温系统能实现直接、准确和实时测温,明显提升了变压器监测效率,值得在核电新机组主变压器上进行推广,本文就光纤测温技术的应用提出以下建议。

1) 核电厂主变压器运行需从安全性和经济性两个方面进行综合考虑,后续新机组在运行周期内一定会遇到变压器何时进行老化替代最优的问题。而从目前变压器寿命评估的角度出发,供现场进行评估的可用技术参数过少,使变压器很难充分发挥其寿命价值。不论从变压器日常运行状态监测手段的

优化方面出发，还是从变压器寿期评估经验积累方面出发，都非常有必要引进光纤测温技术。

2) 可通过光纤测温装置直接测量线圈最热点温度并进行温升试验，检验变压器真实的设计水平和制造质量。另外，依据直接测量获取的热点温度，可在不破坏绝缘或降低变压器寿命的前提下，安全且最大化地增加负载及核准变压器的过载能力。

3) 光纤测温技术的应用最理想的结果在于实时在线监测到变压器绕组最高温度的点，即光纤测温探头能置于变压器绕组内部温度最高的点上。通过仿真分析计算可知：变压器绕组最热点通常位于距顶端大约10%的位置，但实际上受热点区域的涡流损耗、杂散损耗、油流和油黏度等诸多方面因素的综合影响，变压器绕组实际热点与理论推理的热点不一定完全相同，可通过出厂试验温升与设计温升

的比对，适当进行光纤测温探头位置的优化调整，并结合后续不同工况变压器运行期间的热点温度监测数据进行分析 and 经验积累。

4) 根据安装光纤测温系统的主变压器温度的监测数据，开展主变压器寿命研究，提升核电主变压器在线监测数据综合应用水平。

结束语

光纤测温具有安全、可靠和稳定等诸多优点，通过绕组内部热点温度监测有效评估变压器的寿命损失，对变压器设备健康状态和运行寿命的准确评估提供了有效的技术支撑，给变压器智慧监测与诊断提供了先进的技术手段。EA

(收稿日期：2021-07-07)

