

光纤传感器在预装式变电站绕组热点温度监测中的应用

汪进锋¹, 徐晓刚¹, 李鑫¹, 侯丹², 郑敏²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080;

2. 深圳太辰光通信股份有限公司, 深圳 518040)

摘要: 针对目前预装式变电站变压器室内部绕组热点温度在线监测困难的问题, 本文提出了一种光纤传感应用方案, 通过在变压器内布置光纤温度传感器进行在线监测, 可以对变压器的热点温度进行监测, 同时结合变压器负载情况对变压器的寿命损失评估。额定负载和过负载试验数据表明, 该光纤在线监测系统能够准确、及时捕捉到变压器的热点温度, 并给出过负载工况下的合理建议。

关键词: 光纤测温, 预装式变电站, 热点温度, 在线监测, 寿命评估

Application of fiber optic sensor in the hot spot temperature monitoring of the prefabricated substation windings

Wang Jinfeng¹, Xu Xiaogang¹, Li Xin¹, Hou Dan², Zheng Min²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou, 510080

2. T&S Communications Co., Ltd, Guangdong, 518040)

Abstract: For the difficult problem of hot spot temperature on-line monitoring in prefabricated substation, this paper proposes an application of optical fiber sensing scheme, which fiber optic temperature sensors are installed in transformer. The effect of transformer load on the life loss of transformers is also evaluated in this paper. The data of rated load test and the overload test of transformer are indicated that the optical fiber on-line monitoring system can accurately and real-time capture the hot spot temperature of the transformer, and gives the reasonable suggestion of the load condition.

Keywords: Fiber optic sensor, prefabricated substation, Hot spot temperature, On-line monitoring, Life evaluation

0 引言

预装式变电站集合配变、高低压开关及辅助装置于一体, 自动化程度高、组合方式灵活、占地面积小、可深入负荷中心, 在近几年来在国内得到广泛使用。目前预装式变电站自动化系统多集成电压、电流等电量信号, 未对设备绝缘状态监测, 状态监测装置匮乏, 无法实时掌握设备运行状态, 对事故缺乏预判。

广东电网节假日间设备过载导致的故障情况突出, 具体原因与配变过载能力及其保护装置有关, 有必要研究和改进配变过载能力及其高低压保护。配网设备种类繁多, 预试开展不够完善, 计划检修覆盖面小, 尚

处于事后检修阶段, 而且即使开展预试定检工作量大, 实现困难未解决配网故障率高的问题。

提高配变过载能力, 可部分减缓配变因过载导致的故障情况。目前较为常见措施包括选用调容变压器, 根据负荷需要调节配变容量; 从产品设计及原材料选用角度, 采用改进型绝缘结构或热稳定绝缘纸变压器, 成本高, 实现困难。设备状态监测目前主要应用于主网设备, 通过状态监测能够实时获取设备绝缘状态, 配网设备的状态监测量未见统一标准, 目前运行中设备基本无在线监测装置, 而且全密封的预装式变电站结构带电监测实现困难。

变压器绕组热点温度的研究受到国内外学者的广泛关注^[1~3]，目前绕组热点监测普遍采用的方法包括：热模拟测量法、直接测量法和间接算法。其中：热模拟测量法由于绕组温升过程与模拟过程不尽相同，因而造成测量误差较大，国外电网已基本停用该测温装置^[4]；间接算法是依据国际电工委员会的导则进行计算^[5~6]，由于导则简化了变压器的热特性分布，因此计算结果只能在某种程度上反映绕组热点的状态。直接测量法则采用在绕组内直接布置测量点的方式进行热点温度的监测，由于是直接测量的结果，因此准确反映了热点温度的变化，但是由于温度传感器的植入，将会引起绕组绝缘特性的变化，且植入点的位置、数量和分布规律等研究，仍然处于探索阶段，且主要是针对较大型的油浸变压器实施^[7~13]。

本文提出将光纤温度传感器埋入10kV预装式变电站变压器内部，并引出到变压器外部进行在线监测，不仅可以实时监测反映变压器内部温度分布及变化，还可对监测结果进一步分析，得到变压器在过负载情况下的允许安全工作时间。通过试验验证，测试结果和GB1094中的模拟法计算结果相符，测试结果准确、可靠。

1 原理

光纤光栅是通过相位掩模板制造技术，由光纤经过激光照射形成光波长反射器件。一定带宽的光与光纤光栅场发生作用，光纤光栅反射回特定中心波长的窄带光，并沿原传输光纤返回；其余宽带光沿光纤继续传输。

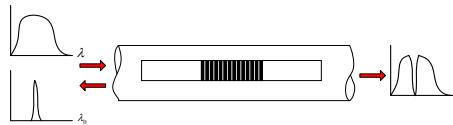


图1 光栅测温原理图

反射的中心波长随作用于光纤光栅的温度变化而线性变化，从而使光纤光栅成为性能优异的温度测量元件。通过测量光纤光栅反射的中心波长，即可测量出光纤光栅温度传感器测量点相应的温度值。

光纤光栅反射波长有如下公式：

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

其中， λ 是光纤光栅的反射波长， n 是光纤材料的有效折射率， Λ 是光栅周期。其

中 n 和 Λ 都会受到温度的影响而发生变化。对于温度传感器，通过求导可以得到波长的相对变化量为

$$\Delta\lambda/\lambda = (\alpha + \zeta)\Delta\theta \quad (2)$$

其中， α 是光纤的热膨胀系数，主要引起栅格周期的变化； ζ 是光纤的热光系数，主要引起光纤折射率的变化。 $\Delta\theta$ 是温度变化量， $\Delta\lambda$ 是波长变化量。

记 $\alpha_r = \lambda(\alpha + \zeta)$ 为光纤光栅温度传感的灵敏系数，则可得到仅受温度作用时，光栅波长变化和温度变化的对应关系。本文中采用的石英光纤刻写的光纤光栅，温度灵敏系数为10pm/°C，线性系数可以达到0.9999。

沿光纤继续传输的透射光继续传输给其它具有不同中心波长的光纤光栅，并逐一反射各个光纤光栅的中心波长，通过测量各反射光的中心波长，从而实现一根光纤上多个光纤光栅温度传感器的串联。

2 实现方案

本项目中变压器A, B, C三相高压和低压绕组上各安装1个传感器，位置在距绕组顶部2-3cm位置；顶层油安装1个传感器，在B相绕组上方铁芯处安装1个传感器，共计8个传感器。

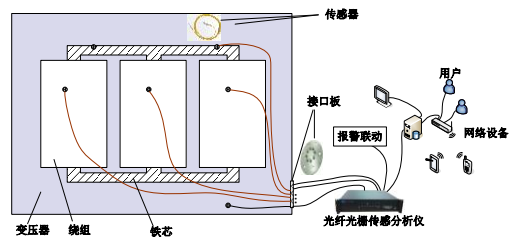


图2 光纤温度在线监测示意图

传感器在绕组、铁芯、母线排及顶层油的安装如图3-图5所示，传感器安装方法和工艺满足《IEC 60076-2, Power transformers –Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers》的要求。



图3 传感器的固定



图4 安装在绕组内的传感器



图5 安装完光纤传感器的变压器

3 试验测试

3.1 额定负载温升试验顶层油温比较

变压器在厂内温升试验过程中,除了布置了光纤光栅温度传感器之外,在顶层油还有1个Pt100油温计,图6是光纤光栅温度传感器所测量油温与Pt100油温计的比较和分析,温升试验持续到18点18分卸载。

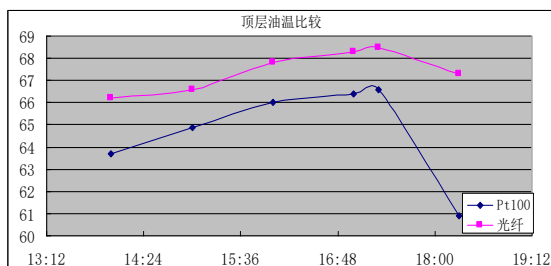


图6 顶层油温测量结果比较

(1) 温升试验稳定后光纤温度传感器和PT100油温计所测顶层油温分别为68.5°C和66.6°C,光纤测量温度高出约2°C;卸载后所测量温度分别是67.3°C和60.9°C,光纤测量温度高出6.4°C。测温结果存在一定温差,可能是因为传感器位置差异所导致;

(2) 两种方法测量温度变化趋势一致;

(3) 温升实验环境温度为20°C,油温升为48.5K,低于国标要求的60K温升限值。

3.2 过负载条件下的监测结果比较

过载试验中负载变化情况为: 1倍负载/254min~1.8倍负载/71min~断电/70min~1倍

负载/158min~2倍/38min。

在试验中一方面利用光纤传感系统对变压器内部热点温度进行在线监测,同时根据传统模拟法进行计算。根据GB1094.7,在变化的环境温度和负载条件下,热点温度的计算按照热点温度增加和降低(即负载的增加和降低)两种情况,分别由公式(3)和公式(4)给出:

热点温度增加时的热点温度计算公式:

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{oi} + \left\{ \Delta\theta_{or} \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x - \Delta\theta_{oi} \right\} \times f_1(t) + \Delta\theta_{hi} + (Hg, K^y - \Delta\theta_{hi}) \times f_2(t) \quad (3)$$

热点温度降低时的热点温度计算公式:

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{or} \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x + \left\{ \Delta\theta_{oi} - \Delta\theta_{or} \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x \right\} \times f_3(t) + Hg, K^y \quad (4)$$

其中,

$\theta_h(t)$: 随时间变化的暂态热点温度;

θ_a : 环境温度;

$\Delta\theta_{oi}$: 开始时的顶层油温对环境温度的梯度;

$\Delta\theta_{or}$: 额定损耗下顶层油温温升;

$\Delta\theta_{hi}$: 开始时的热点温度对顶层油温的梯度;

R : 额定电流下负载损耗与空载损耗的比值;

K : 负载系数(负载电流/额定电流);

H : 热点系数;

g_r : 额定电流下绕组平均温度对油平均温度(油箱内)的梯度,即铜油温差;

x : 总损耗对顶层油(油箱内)温升的指数幂(油指数),可查表求得;

y : 电流对绕组温升的指数幂(绕组指数),可查表求得。

函数 $f_1(t)$ - $f_3(t)$ 分别表示按稳态值为1时顶层油温升的相对增加量、按稳态值为1时热点对顶层油温梯度的相对增加量和总降低至为1时顶层油对环境温度梯度的相对降低量。

$$f_1(t) = 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau_0 \times k_{t1}} \right)} \quad (5)$$

$$f_2(t) = k_{21} \times [1 - e^{\frac{-t}{\tau_w \times k_{22}}}] - (k_{21} - 1) \times [1 - e^{\frac{-t}{\tau_o \times k_{22}}}] \quad (6)$$

$$f_3(t) = e^{\frac{-t}{\tau_o \times k_{11}}} \quad (7)$$

其中， τ_w 和 τ_o 分别是绕组的热时间常数和平均油时间常数， k_{11} 和 k_{22} 是变压器的热特征常数。

根据GB1094.7中8.2.2节表4中针对配电变压器推荐的参数值，以及试验前的测温数据，得到如表1中以下参数：

表1 配电变压器模拟法计算参数值

θ_a	20℃	$\Delta\theta_{av}$	1.2K	$\Delta\theta_{wv}$	0 K
R	11.81	H	1.1	g_r	17.6 K
x	0.8	y	1.6	-	
k11	1	k21	1	k22	2
τ_o	180 min	τ_w	4 min		

计算的热点温度和光纤测量的热点温度曲线如图7所示。

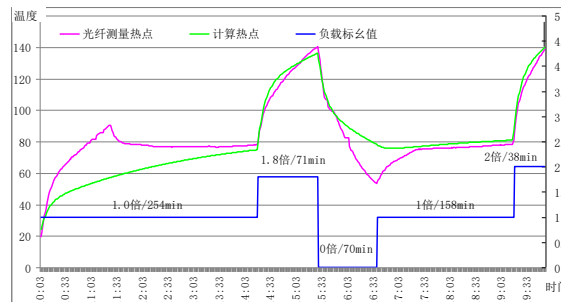


图7 实测热点温度和计算热点温度随负载变化曲线

表2是每个负载结束时的热点温度值和计算热点温度值的比较。

表2 负载调整周期结束时的热点温度值

时间(min)/负载系数	计算热点温度	实测热点温度
254/1.0	74.7	78.6
71/1.8	136.3	140.8
70/0	77.8	54.3
158/1.0	78.8	80.9
38/2	139.7	140.4

通过曲线比较和各时间段热点的最终温度比较结果，可以看到：

(1) 光纤测温结果和模拟法计算结果变化趋势相同，都能够及时反映过负载工况下变压器内部热点温度情况；

(2) 在负载持续过程中，光纤测量热点温度和模拟法计算值有一定温差，在温度上

升和下降过程中，温度变化范围更大。这是因为模拟法计算的是绕组平均温度，而光纤传感是直接测量的是绕组上热点区域内某一点的温度，其变化更灵敏。

3.3 变压器过负荷能力评估

GB1094.7中的表3规定了超铭牌额定值负载时的电流和温度限值。以预负载系数为1，而后1.8倍过载条件为例，对过负载情况下的允许安全工作时间进行了计算。

考虑到配电变压器允许最高环境温度为50℃，因此有必要对该变压器在不同环境温度下的热点温度进行考察。根据GB1094.7中规定的热点温度计算公式，详见公式(3)和(4)，可知热点温度是在环境温度的基础上，叠加油的温升和铜油温升而来，所以环境温度的提升可以直接叠加在热点温度的变化上。即在某个环境温度下的热点温度等于20℃环境温度时的热点温度加上环境温度变化值，在变压器负载运行时间-温度曲线上，环境温度的变化可表现为曲线沿温度坐标轴的平移，通过对曲线的计算和变压器运行的温度限值，可以计算得到不同环境温度下的热点温度以及过载能力。

根据GB1094.7中的表3超铭牌额定值负载时的电流和温度限制规定，计算出不同环境温度下在预负载系数为1.0，后1.8倍过载条件下允许的工作时间如表3所示。

表3 不同环境温度下的过负载允许安全工作时间

	负载系数/温度限值	不同环境温度下允许的工作时间			
		20℃	30℃	40℃	50℃
绕组热点	1.8倍/140	68	48	30	17
顶层油温	1.8倍/115	-	-	55	37
铁芯	1.8倍/160	-	-	-	-

表3中，“-”表示试验及计算过程均未超过温度限制。从温度限值考虑，在环境温度分别为20℃、30℃、40℃、50℃时考虑，在与负载为1.0倍，之后1.8倍过载条件下允许的工作时间分别为68min、48min、30min和17min。

4 结论

针对预装式变电站中配网油浸变压器的状态监测和检修困难现象,本文提出了一种采用光纤传感的温度在线监测系统,并通过试验验证了其性能。通过和传统油温计、GB1094 模拟法计算结果的相互印证和比较,可以看到该光纤温度在线监测系统能够准确、实时有效的监测变压器热点温度,同时通过对热点温度的监测,结合变压器负载工况,可以评估变压器的安全工作时间,这对于评估变压器工作状态,减少故障发生几率有积极的参考作用。

参考文献

[1]伍企舜. 变压器绕组热点温度的直接测量法[J]. 电测与仪表, 1985, (6):36~39

WU Qi-shun, Directly Temperature Measurement Method on Power Transformer Windings[J], Electrical Measurement & Instrumentation. 1985, (6):36-39

[2]钱政, 孙焦德, 袁克道等. 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, SHUN Jiao-de, YUAN Ke-dao, et. Al, On-line Monitoring of Hot-Spot Temperature in Transformer Winding[J], High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 26-28

[3]丁跃清, 吴高林, 袁静等. 基于光纤测温技术的变压器绕组热点温度分析研究. 变压器, 2012, 49(11): 53~57

DING Yue-qing, WU Gao-lin, YUAN Jing, et. Al, Analysis and Research of Hot Spot Temperature of Transformer Winding Based on Optical Fiber Temperature Measurement Technology[J], Transformer, 2012, 49(11): 53-57

[4]陆万烈, 夏业勤. 变压器绕组温度测量的“热模拟”误差[J]. 变压器, 1999, 36 (10): 15~17

LU Wan-lie, XIA Ye-qin, Thermal Simulation Error in Winding Temperature Measurement of Transformer[J], Transformer, 1999, 36(10):15-17

[5]IEC60076-7: Loading Guide for oil-immersed power transformers[S]. 2005

[6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T1094.7—2008 油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京:中国电力出版社, 2008: 30~36
GB/T 1094.7-2008, Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers[S], 2008: 30-36

[7]Grattan K., Sun T. Fiber optical sensor technology: an overview[J]. Sensors and Actuators, 2000, 82(1): 40-61

[8] 刘军. 变压器内部温度光纤光栅监测及绕组热点温度计算改进方法[D]. 硕士学位论文, 重庆大学, 2009.

LIU Jun, The FBG Monitoring Principle of Transformer Internal Temperature and the Improved Method for Calculation of the Hot Spot Temperature[D]. A Thesis of Chongqing University, 2009

[9] 王兵. 光纤温度热点监测系统在高压电力设备中应用的现状与前景[J]. 高科技与产业化, 2009, 3(12): 108~111.

WANG Bing, Review of the Applications on Fiber Temperature Hot Spot Measurement in High Voltage Electrical Equipments[J], High-Technology & Industrialization, 2009, 3(12): 108-111

[10] Zhang Z., Grattan K., Palmer A.. A novel signal processing scheme for a Fluorescence based fiber optic temperature sensor[J]. Rev Sci Instrum., 2006, 62(7): 1735-1941

[11] 陈军. 光纤测温技术在变压器上的应用[J]. 变压器, 2008, 45(1): 38-41

CHEN Jun, Application of Optical Fiber Temperature Measurement Technology to Transformer [J], Transformer, 2008, 45(01): 38-41

[12] 宋伟, 李毅等. 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, 2011, 48(12): 34-38

SONG Wei, Li Yi, et Al., Analysis and Research of Hot-Spot Temperature of Transformer Winding Based on Optical Fiber Temperature Measurement Technology[J], Transformer, 2011, 48(12): 34-38

[13]侯丹, 卫广远, 钱政, 郑敏, 变压器绕组热点温度监测中光纤光栅传感器的应用研究[J], 电测与仪表, Vol. 51, No.21

Hou D, Wei Guangyuan, Qian zheng, Zheng min, Research on application of Fiber Brag Grating Sensor in Hot-spot Temperature Measurement for Transformer Winding[J], Electrical Measurement & Instrumentation. 2014, Vol. 51, No.21