

变压器绕组线光纤嵌入过程的应变监测

张书琦¹, 普天², 向李程², 徐征宇¹, 廖和安³, 张东生^{2*}

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070;

3. 无锡统力电工股份有限公司, 江苏 无锡 214100)

摘要: 光纤嵌入技术是实现变压器绕组分布式光纤传感的关键。变压器绕组在绕制过程中铜扁线需要进行一定程度的拉伸、弯曲和扭转, 光纤在此过程中常会受到较大的拉伸而断裂。为了对光纤嵌入变压器绕组线的工艺过程进行优化, 试验将 200 m 光纤嵌入到绕组线中, 并使用光纤布喇格光栅(FBG)对绕组线的完整加工过程进行了应变监测, 得到光纤在铜扁线绕制过程中不同环节所承受的应变值。试验结果表明: 光纤在铜线绕制过程中所受到的最大应变均位于收线机位置, 约 4800 $\mu\epsilon$, 在光纤的可承受范围之内; 光纤在整个过程未折断且 FBG 未发生啁啾现象。

关键词: 变压器绕组; 分布式光纤传感; 光纤布喇格光栅; 应变监测; 粘结剂

中图分类号: TN930.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)07-0052-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Strain monitoring about embedding process of transformer winding optical fiber

ZHANG Shuqi¹, PU Tian², XIANG Licheng², XU Zhengyu¹, LIAO Hean³, ZHANG Dongsheng^{2*}

(1. China Electric Power Research Institute Limited Company, Beijing 100192, China; 2. National Engineering Laboratory for optical fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Wuxi Toly Electric Co. Ltd., Wuxi Jiangsu 214100, China)

Abstract: Optical fiber embedding technology is the key to realize distributed optical fiber sensing of transformer winding. In the winding process of transformer, the copper flat wire needs to be stretched, bent and twisted to a certain extent. In this process, the optical fiber is often stretched and broken. In order to optimize the process of embedding optical fiber into the winding line of transformer, 200 m optical fiber is embedded into the winding line in the experiment, and the strain of the whole processing process of the winding line is monitored by using fiber Bragg grating(FBG), and the strain values of different links in the process of copper flat wire winding are obtained. The test results show that the maximum strain of the optical fiber in the process of copper wire winding is in the position of the take-up machine, about 4800 $\mu\epsilon$, which is within the tolerable range of the optical fiber. The optical fiber is not broken and the FBG does not chirp in the whole process.

Key words: transformer winding; distributed optical fiber sensing; fiber Bragg grating; strain monitoring; adhesive

0 引言

电力变压器作为电力系统中的重要设备,其性能和质量直接关系到电网的安全可靠性^[1]。变压器的绕组是变压器的核心部分,如果变压器绕组内部的机械

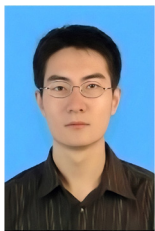
结构存在薄弱环节,必然会产生绕组扭曲、鼓包和移位等变形现象^[2-3],严重时会导致突发性损坏事故。分布式光纤传感技术可以通过对变压器内部绕组温度、应变和振动状态的实时监测,对变压器绕组的异常状态进行预警和报警^[4-5],减少事故的发生。但是,将光纤嵌入到变压器绕组中是对变压器内部绕组实时在线监测的前提。由于变压器绕组在绕制过程中铜线需要进行一定程度的拉伸、弯曲和扭转,光纤在铜线缠绕弯曲过程中经常会受到较大的拉伸而断裂。为保证光纤在后续试验嵌入过程中不发生断裂现象,需全程对模拟光纤嵌入过程试验进行应变监测,确定工艺流程中应变较大(光纤容易发生断裂)的位置,以便对变压

收稿日期: 2019-10-16。

基金项目: 国家电网公司科技项目(GY71-18-055)资助。

作者简介: 张书琦(1981—),男,高级工程师,高电压与绝缘技术专业,中国电力科学研究院高压所副所长。主要从事变压器相关技术与高电压绝缘技术方面的研究,获国家科技进步二等奖1项,省部级科技进步奖多项。

* 通信作者: 张东生(E-mail: zhangdsem@qq.com)。



器绕组铜扁线嵌入光纤的工艺进行有目的的局部优化。

目前, 适合对变压器绕组进行应变监测的光纤传感技术包括: 光纤布喇格光栅 (FBG) 传感^[4]、布里渊散射分布式光纤传感和瑞利散射分布式光纤传感, 这 3 种光纤传感各有特点。其中, 布里渊散射分布式光纤传感技术与瑞利散射分布式光纤传感技术皆可获得光纤上不同位置处的散射信号, 从而获得对应的应变信息。但是二者的响应速度较慢, 无法对光纤嵌入变压器绕组这一过程进行实时监测。FBG 传感器虽然为“点式”传感器, 但是, 由于在光纤嵌入的整个过程中, FBG 会连续地通过“光纤嵌入装置”的各个环节对光纤经历的整个嵌入过程都进行实时在线的监测, 因此, 使用“点式”的 FBG 传感器即可胜任。本文使用 FBG 传感技术, 基于该技术测量应变的基本原理, 成功将多个 FBG 传感器预埋入变压器绕组线, 并对光纤嵌入过程进行应变监测。

1 FBG 传感器固定于铜扁线表面的应变测量

FBG 反射的中心波长与光纤的有效折射率、栅格周期有关, 当外力作用于光栅使得 FBG 发生拉伸或压缩时, 光栅的栅格周期发生变化; 同时, 由于弹光效应导致光纤折射率的改变, 使得 FBG 的中心波长发生改变。因此, FBG 可用于应变测量^[6-8]。

试验所布置的波分复用 (WDM) FBG 传感网络结构如图 1 所示。将 3 个初始中心波长不同的 FBG 传感器串接在一根光纤上, 其初始中心波长分别为: 1555.179 nm、1544.968 nm 和 1535.086 nm, 光纤总长度为 200 m; FBG 传感器的位置分别在 50 m 处、100 m 处和 150 m 处, 栅区长度为 1 cm, $L_G=50$ m。WDM 网络

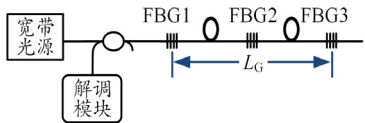


图 1 基于 WDM 的 FBG 传感网络

属于串联拓扑结构, 系统所能串联的 FBG 最大数量主要由光源带宽与待测物理量的变化范围决定^[9]。待测物理量变化范围越小或者光源带宽越大, 可串连的 FBG 数量越多。

这次监测过程中使用的变压器绕组线是长度、宽度和厚度分别为 180 m、5 mm 和 1.52 mm 的铜扁线。为了将光纤嵌入到铜扁线中, 在铜扁线一侧制作了一半径为 0.4 mm 的凹槽, 将光纤嵌入在铜扁线槽内, 然后涂胶固定, 凹槽起到了对光纤的保护作用, 避免在变压器生产过程中对光纤造成损伤。嵌入光纤的铜扁

线结构如图 2 所示。

光纤嵌入的试验装置由铜扁线放线机、光纤放线机、涂胶架、加热固化装置、铜扁线牵引机和收线机组成, 如图 3 所示。A、B 分别表示涂胶架前后两端

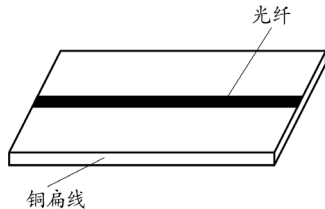


图 2 铜扁线结构示意图

位置, C、D 分别表示加热固化装置前后两端位置, E、F 分别表示铜扁线牵引机前后两端位置, G、H 分别表示收线机前后两端位置。其中, $L_{AB}=37$ cm, $L_{BC}=43$ cm, $L_{CD}=63$ cm, $L_{DE}=61$ cm, $L_{EF}=125$ cm。

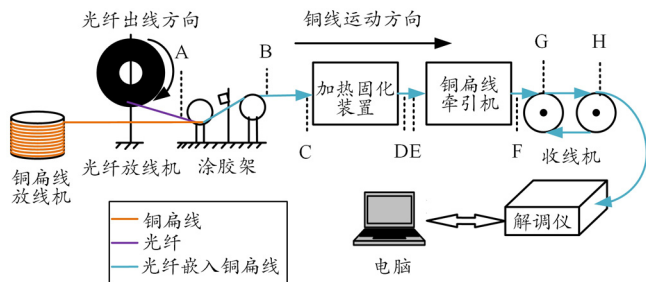


图 3 光纤嵌入装置示意图

铜扁线盘固定于铜扁线放线机上, 将光纤放线机上的光纤用胶黏剂固定于铜扁线凹槽内。在收线机和铜扁线牵引机的牵引力作用下, 光纤随同铜扁线被牵引到涂胶架上涂胶, 然后经过加热固化装置加热固化, 再经过铜扁线牵引机, 最后到达 2 只筒体直径为 260 mm 的收线盘上。另外, 光纤嵌入过程中, 还要经过若干用于调整光纤和铜扁线方向的导向轮。在光纤与铜扁线表面固定的过程中, 解调仪全程采集数据, 采集频率为 10 Hz。

1.1 嵌入过程光纤受力分析

在光纤与铜扁线固定之前, 由于光纤放线盘受到一定的摩擦力作用, 导致光纤受到一定的拉力。在光纤与铜扁线固定后, 光纤和铜扁线一起受到拉伸应力, 同时, 在经过若干导向轮和收线盘时, 由于铜扁线的弯曲作用, 在铜扁线一侧的光纤要受到一定的拉伸或压缩。光纤的主要部分材料为 SiO_2 , 其抗拉强度^[9]范围 $\delta=6.895\sim13.79$ GPa, 弹性模量 $E=72900$ N/mm², 单模光纤可承受的应变范围为 9458~18916 $\mu\epsilon$ 。如果放线盘受到的摩擦力过大, 或铜扁线弯曲曲率半径过小, 都会导致光纤由于受到的过大拉伸应力而断裂。因此, 在整个光纤嵌入过程中, 光纤受到的应变应该控制在 9458 $\mu\epsilon$ 以下, 考虑到要保留一定的冗余^[9], 光纤受到的应变最好控制在应变范围的 70% 内。

1.2 监测结果与分析

根据光纤光栅中心波长转化为应变的解调公式^[7], 将解调仪保存的光栅波长数据进行处理, 得到 3 个光栅在嵌入过程中的应变实时在线监测数据如图 4 所示。根据试验过程中所记录的光栅通过标记点的时刻, 可以在图中定位出铜扁线在通过标记点位置处的时间, 从而确定其通过相应位置处的应变大小。FBG 经过 A~H 等 8 个点的应变值如表 1 所示。

从图 4 可以看出: 3 个 FBG 所测得的标记点位置数据各不相同; 其中, FBG1、FBG2 所测数据较为接近; FBG3 所测数据总体小于另 2 个光栅数据, 偏差较大, 说明这个光栅粘贴效果不好, 在后面的数据分析中不予考虑。

图 4 与表 1 的数据表明: 光纤在 AC 段时粘结剂还未固化, 光纤与铜扁线处于分离状态, 此时光纤主要受涂漆架上导轮与牵引设备拉力的影响, A、B 2 个点分别对应光纤经过涂漆架两导轮弯曲时的位置; 在 CD 段中, 光纤受到牵引设备拉力的同时被固化设备逐渐升温, 但经过 DE 段的冷却后应变值基本回到进

入固化环节前的状态, 因此在固化设备内, 光纤受到的拉伸应力不大。在 EF 段, 光纤已固定于铜扁线表面, 牵引设备内部有 2 个距离比铜扁线厚度稍大的导轮, 此处导轮起到使铜扁线平整的作用, 因此光纤在经过牵引设备时会受到 2 个导轮的摩擦力作用, 造成 EF 段中的应变峰值为 2018.2 $\mu\epsilon$ 。GH 段是铜扁线绕制在收线盘上的应变过程, G、H 2 个点分别对应光栅在弯曲时的状态, 应变达到 4888.2 $\mu\epsilon$ 。由于铜扁线的弯曲作用, 在铜扁线一侧的光纤要受到一定的拉伸或压缩。根据材料力学原理, 设铜扁线条厚度为 n , 光栅栅区直径为 r_1 , 收线机半径为 r 。绕组弯曲表面线应变 $\epsilon^{[10]}$ 为:

$$\epsilon = \frac{y}{\rho} = \frac{\frac{n}{2} - r_1}{r + \frac{n}{2}} \quad (1)$$

其中, y 为中性层到弯曲表面的距离, ρ 为中性层的曲率半径。将 $n=1.52 \text{ mm}$ 、 $r_1=125 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $r=13.1 \text{ cm}$ 代入上式, 得到收线机处光纤的理论应变大小为 4819.4 $\mu\epsilon$ 。理论值与试验测得的收线机处的数据基本吻合。

另外, 试验中除光纤通过固化设备时温度较高 (约 140 $^{\circ}\text{C}$) 外, 通过其余设备时均处于室温环境, 且室温在试验进行过程中变化不大。由于室温变化对光纤波长的改变量很小, 因此室温变化对试验结果的影响可以忽略^[11-12]。另外, 在固化设备中, 光纤从室温到高温环境下的温度变化所造成的光栅中心波长改变量与光纤受到的拉伸应力造成的光栅中心波长改变量之和仍然低于光纤在收线设备处的波长改变量, 即光纤在收线盘处所受的拉伸应力大于加热设备处。因此, 温度因素不会影响本试验所得结论的正确性。

整个监测过程的实测数据表明: 应变较大的地方出现在绕组弯曲较大的地方; 对加热固化区域, 温度导致的波长变化、热应变和光纤拉应变之和亦小于在弯曲处的最大应变。

1.3 光纤固定在铜扁线表面效果观察

为观察粘结剂将光纤固定在铜扁线上的效果, 本文截取部分已固定光纤的铜扁线在显微镜下进行观察, 放大倍数约 520 倍。图 5(a) 为胶黏剂将光纤固定在铜扁线表面后在显微镜下的图片, 图中中间部分灰色区域为光纤, 可以看到有少许气泡 (图中箭头位置); 图 5(b) 为胶黏剂覆盖铜扁线表面后在显微镜下的图片, 可以看到也有少许气泡 (图中箭头位置)。结合 1.2 节中 FBG 的应变数据结果来看, 少许气泡对应应变测量影响不大, 光纤固定效果较好。

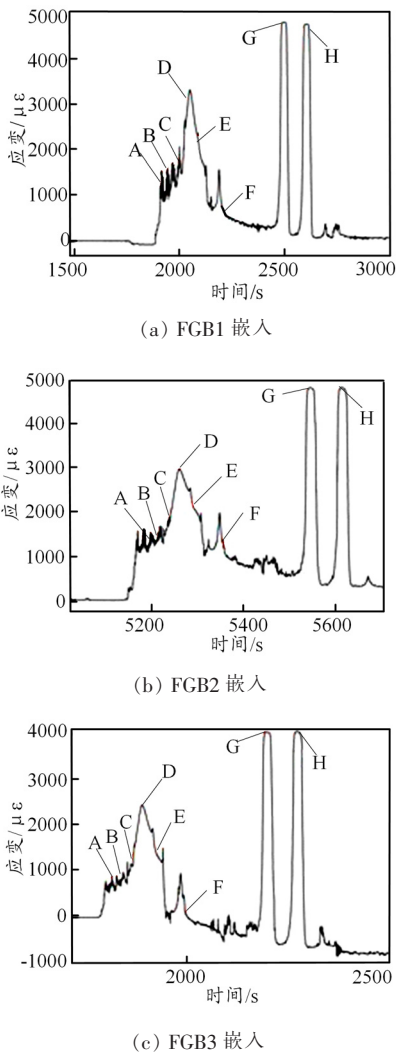
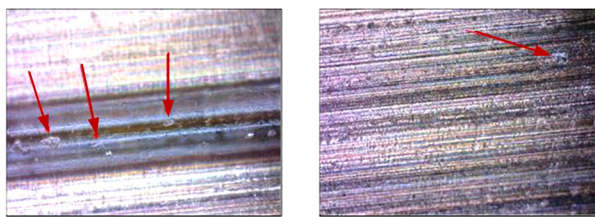


图 4 光纤嵌入铜扁线时的应变历程

表 1 铜扁线经过标记位置处的应变

光栅编号	8 个位置处的应变 (单位: $\mu\epsilon$)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
FBG1	1271.2	1457.2	1596.0	3159.3	2092.0	528.7	4598.6	4567.6
FBG2	1416.7	1416.7	1795.3	2812.9	2055.9	1198.0	4888.2	4888.2
FBG3	703.7	844.0	1135.1	2330.3	1357.0	117.7	4038.3	4071.5



(a) 胶粘剂将光纤固定在铜扁线表面 (b) 胶粘剂覆盖铜扁线表面后
图 5 电子显微镜下观察光纤固定情况

2 铜扁线涂漆加工过程的应变测量

光纤固定在铜扁线表面后, 需要后续涂漆加工。为监测涂漆过程中铜扁线表面的光纤是否会发生断裂现象及铜扁线的应变历程, 需对铜扁线涂漆加工过程进行监测。铜扁线涂漆装置示意图如图 6 所示。嵌有光纤的铜扁线卷绕在绕组放线设备上, 铜扁线上的光纤包含 2 个 FBG, 其波长分别为 1555.179 nm 和 1535.086 nm。在铜扁线牵引机的作用下, 铜扁线从放线设备绕出, 绕过主导轮后朝着收线机的方向运动。铜扁线在收线设备上的卷绕方式与图 3 中收线机相同。试验过程中, 解调仪全程采集数据, 采集频率为 10 Hz。

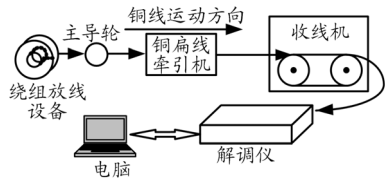


图 6 铜扁线涂漆装置示意图

3 涂漆过程应变变化分析

铜扁线在涂漆加工过程中的应变历程如图 7 所示。由于光栅初始状态是缠绕在放线设备上, 故初始应变不是 0。图 7(a) 中, 横坐标 215~225 s 处没有数据, 可能是在数据采集过程中丢失了这几秒钟的数据, 但是对观察整体波形图的影响不大。根据应变历程图片, 可以得出以下结论: 由于铜扁线初始状态是缠绕在放线设备上, 故初始应变达到 4885.0 $\mu\epsilon$; 铜扁线在解除缠绕状态的瞬间光纤应变也随之下降。经过主导轮时铜扁线会先向外侧 (光纤侧) 弯曲然后再向内侧弯曲, 这一过程在图中显示为应变到达 -989.4 $\mu\epsilon$

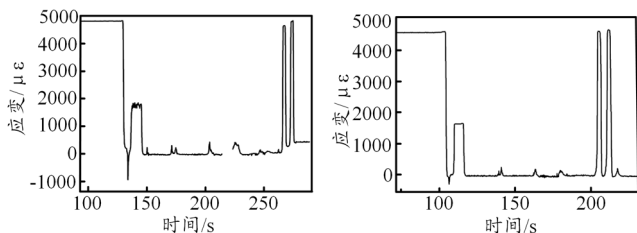


图 7 铜扁线涂漆过程的应变历程

后上升至 1852.6 $\mu\epsilon$ 。牵引设备到收线设备间的过程是涂漆过程, 应变量较小。铜扁线最后绕制到收线盘上时, 应变达到 4855.4 $\mu\epsilon$ 。

4 结束语

本文在试验中成功将 200 m 的光纤嵌入了变压器绕组线, 嵌入效果较好, 光纤未发生折断。同时, 通过 FBG 测量了光纤嵌入到绕组线中的应变情况及铜扁线通过涂漆加工时的应变情况。整个嵌入过程应变变化趋势对嵌入装置的优化具有指导性意义。试验可得出以下结论:

- ① 光纤嵌入到绕组线的过程和涂漆过程的最大应变处均出现在光纤弯曲曲率较大 (收线机) 的位置, 应变大小为 4888.2 $\mu\epsilon$ 。后续嵌入装置的优化工作可着重围绕收线机进行。
- ② 在试验给定的工艺条件下, FBG 测得的应变在光纤可承受的应变范围内, 说明 FBG 在嵌入过程所处的环境满足分布式光纤传感系统的测量要求。
- ③ 试验给定的粘结剂在当前工艺条件下固化效果好, 可以满足项目使用要求。

参考文献:

- [1] 王利, 杨红磊, 秦炜淇, 等. 基于光纤布喇格光栅的配电变压器分布式温度监测方法[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 152-157.
- [2] 马继先, 郭东升. 变压器绕组变形判据的研究 [J]. 华北电力技术, 1998(7): 6-8.
- [3] 赵宏飞, 马宏忠, 陈楷, 等. 基于振动信号的变压器绕组松动实验研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 13-15.
- [4] 姜德生, 何伟. FBG 传感器的应用概况 [J]. 光电子激光, 2002(4): 420-430.
- [5] SWIFT G, MOLINSKI T S, BRAY R. A fundamental approach to transformer thermal modeling: part II, field verification [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 176-180.
- [6] 朱世富, 张东生. 碳纤维复合材料冲击响应监测及定位[J]. 自动化仪表, 2019, 40(3): 83-84, 93.
- [7] 魏莉, 周祖德, 黄俊, 等. 一种 FBG 非接触机械振动传感器的研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(14): 1873-1876.
- [8] 邓建钢, 郭涛, 徐秋元, 等. 变压器绕组测温 FBG 传感器设计及性能测试[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1348-1355.
- [9] 黄正欧, 张拥军, 颜复斌. 光缆拉伸应变要求对光缆性能影响的探讨 [J]. 现代传输, 2010(3): 55-57.
- [10] 喻小明, 李学罡. 工程力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 121-123.
- [11] YING Yong, LIU Fujia. Research on the on-line measuring method for the hot spot temperatures of transformer windings[J]. Northeastern Electric Power Technology, 2002, 23(9): 17-19.
- [12] 李进. 基于 FPGA 的分布式 FBG 变压器绕组温度在线监测的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.