

光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展

樊卓杨, 吴超, 王霞

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 光纤传感技术具有抗电磁干扰、体积小、多路复用等优点, 用其进行电力设备智能化在线监测已成为电网发展的新趋势。本文综述了几种光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展, 包含光纤光栅传感技术、散射型分布式光纤传感技术、荧光光纤传感技术和干涉型光纤传感技术。从温度监测、应变监测、局部放电监测、光纤电流传感器、污秽监测和氢气监测等几方面阐述了不同传感技术在不同电力设备中的应用情况及优缺点, 并展望了光纤传感在线监测技术工程化、组网化应用的发展方向。

关键词: 光纤传感; 电力设备; 在线监测

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)10-0001-12

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.10.001

Research Progress of Optical Fiber Sensing Technology in Power Equipment Monitoring

FAN Zhuoyang, WU Chao, WANG Xia

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Optical fiber sensing technology has the advantages of anti-electromagnetic interference, small volume, multiplexing, etc. Intelligent on-line monitoring for power equipment by optical fiber sensing technology has become a new trend of power grid development. In this paper, the research progress of several optical fiber sensing technologies in the field of power equipment monitoring were reviewed, including fiber grating sensing technology, scattering distributed optical fiber sensing technology, fluorescent optical fiber sensing technology, and interferometric optical fiber sensing technology. From the aspects of temperature monitoring, strain monitoring, partial discharge monitoring, fiber-optic current sensor, pollution monitoring, and hydrogen monitoring, the application as well as the advantages and disadvantages of different sensing technologies in different power equipment were explained. At last, the development direction of the engineering and networking application of optical fiber sensing technology was proposed.

Key words: optical fiber sensing; electric equipment; on-line monitoring

0 引言

光纤传感在线监测技术具有抗电磁干扰、寿命长、体积小、灵敏度高、方便进行光电或电光转换、多路复用等一系列优点, 除此之外, 光纤复合地线

(OPGW)等电力特殊光缆的应用也为光纤传感技术应用于电力系统提供了极大的便利。迄今为止, 国内外已经开展了大量的光纤传感在线监测电力设备状态的研究工作, 并先后有挂网运行的记录。

本文对不同类型的光纤传感器进行简要介绍, 并从温度监测、应变监测、局部放电监测、光纤电流传感器、污秽和氢气监测等方面对电力设备中光纤传感技术的应用及发展进行全面分析, 展望光纤传感技术在电力设备监测领域进一步工程化应用的发展方向。

收稿日期: 2020-11-06 修回日期: 2020-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077171)

作者简介: 樊卓杨(1996-), 男(汉族), 山西运城人, 硕士生, 主要从事电缆附件绝缘监测的研究; 通信作者: 王霞(1976-), 女(汉族), 山西运城人, 副教授, 博士, 主要从事聚合物绝缘材料和测试方法的研究。

1 光纤传感技术

光纤传感系统通常由光发射和接收单元、信号调制和解调单元以及光纤组成,能够实现对温度、应变、压力、速度、电流、电压、浓度、流量、流速等多种物理量的监测。

1.1 光纤光栅传感技术

光源发出的光经过耦合器入射到光纤布拉格光栅(FBG)时,光栅将反射其中以布拉格波长为中心波长的窄谱分量,如式(1)所示。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}A \quad (1)$$

式(1)中: λ_B 是布拉格波长; n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率; A 是光纤光栅的周期。

应变或应力引起的光纤拉伸和压缩会导致光栅周期 A 发生变化,弹光效应也会使得有效折射率 n_{eff} 随外界应力的变化而变化;温度变化时的热膨胀会使 A 发生变化,热敏效应也会导致 n_{eff} 随温度的改变而改变,最终导致布拉格波长 λ_B 的改变。目前,各类型光纤光栅传感器基本上都是通过被测信号来直接或间接改变 λ_B ,通过对 λ_B 的监测转化为对被测信号的监测。

1.2 散射型分布式光纤传感技术

光纤的散射主要包括瑞利(Rayleigh)散射、布里渊(Brillouin)散射以及拉曼(Raman)散射。瑞利散射是弹性散射,主要通过光纤线路损耗进行测量和故障定位,基于瑞利散射技术的光时域反射计(OTDR)是最早应用的散射型分布式光纤传感器。布里渊散射是非弹性散射,对应力和温度均敏感,可实现应变和温度的同时监测。基于布里渊散射的散射型分布式传感系统主要有布里渊时域反射计(BOTDR)、布里渊时域分析仪(BOTDA)和布里渊频域分析仪(BOFDA)。拉曼散射也是非弹性散射,基于拉曼散射的散射型分布式传感系统主要是拉曼光时域反射计(ROTDR),其利用光纤中拉曼散射只对温度敏感的特性设计。

1.3 荧光光纤传感技术

荧光光纤采用的荧光材料受到激发光照射时,会向外发射荧光信号,利用激发光谱、发射光谱和荧光寿命等荧光材料特性,可实现电力设备的局部放电监测和温度监测。在局部放电中,局放产生的微光使得荧光光纤发射荧光信号,通过接收荧光信号并进行光电转换,可对局放信号进行分析处理。在温度监测中,最常使用的是荧光余晖寿命型温度传感器,荧光余晖在撤掉光激励后开始衰减,而余

晖寿命就取决于被测物体的温度。

1.4 干涉型光纤传感技术

干涉型光纤传感器将光源发出的光经耦合器分成参考光路和测量光路,测量光路将待测参量转变为光相位变化量,光相位变化导致干涉结果变化,通过对光相位的监测即可实现电气量的监测。目前干涉型光纤主要应用于电力设备局部放电的监测和光纤电流传感器。前者的测量光路主要将局放产生的超声波信号转变为光相位信号;后者的测量光路则主要通过法拉第效应将电流信号转变为光相位信号。根据干涉类型,干涉型光纤可以分为迈克尔逊(Michelson)干涉型、马泽-赛德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉型、赛格纳克(Sagnac)干涉型和法珀(Fabry-Perot, F-P)干涉型。

2 光纤传感技术在电力设备监测领域的应用

2.1 温度监测

温度是电力设备的重要运行参数,也是设备发生故障最直接的表象之一。通过监测电力设备的温度信息获取电力设备的运行状况是电力系统在线监测的研究热点。测温方式分为点式温度监测和分布式温度监测。点式温度监测包括光纤光栅温度监测和荧光光纤温度监测,主要用来监测电力设备中的重点异常部位,包括变压器绕组、开关柜接头、断路器等;分布式温度监测指采用上述散射型分布式光纤传感器进行监测,主要用于输电线路温度的全方位测量。

2.1.1 点式温度监测

(1) 变压器

1996年,TE HAMMON等^[1]将光纤布拉格光栅温度传感器插入聚四氟乙烯制成的护套当中,并将该护套放在变压器绕组与罐壁的通孔内使传感器不受应变,实现了绕组的温度监测。但由于绝缘护套的存在,光栅与绕组之间热传递效率的及时性难以保证,弱化了该方式的在线监测和及时预警功能。不同于上述采取护套缓解应变干扰的办法,邓建钢等^[2]改进了电磁线结构及制作工艺,将光纤光栅内置于变压器绕组电磁线,该方式保证了热交换的及时性,结果表明该传感器实时温度测量准确度可达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。此外,为实时监测变压器油的温度,YI Jiang等^[3]设计了特殊的十字探头封装结构,如图1所示,十字形探头卡入基底,端部和顶部开口,在

不用胶水的前提下,固定了传感器且保证变压器油与探头的实时直接接触,提高了在线监测的准确性。

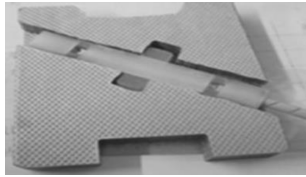


图1 十字形探头FBG传感器封装结构图
Fig.1 Structure diagram of FBG sensor package with cross probe

目前,大量的相关研究已表明光纤光栅传感器能够对变压器的内部温度进行有效监测,但如何与变压器内部结构环境兼容并且最大程度保证信号传递的灵敏度仍然是值得探讨的关键问题。

同样,荧光光纤传感器也可用来测量变压器内部温度,K A WICKERSHEIM^[4]发明荧光光纤测温仪并用于变压器绕组,将磷光材料的探头伸入变压器内部需要测量的位置,通过荧光强度比与温度的关系来检测温度。与荧光强度型温度传感器相比,该方式大幅降低了光源稳定性的影响,但参考通道的加入也增加了系统的复杂性。不同于荧光强度型和荧光强度比型温度传感器,荧光寿命型温度传感器的寿命只受温度的影响,消除了光源强度及光纤变形等因素的干扰,保证了信号监测的准确性。因此,荧光寿命型温度传感器在近年来得到了广泛研究。ZHAO Yong等^[5-6]设计研发了一种Mn²⁺掺杂的氟氧化锆酸磷光体的荧光寿命小型光纤温度传感器,其探头直径为1.8 mm,该传感器在0~90℃内测量时,标准偏差仅为0.45℃。为了不断减小传感探头的尺寸,ZHAO Yongtan等^[7]提出了一种基于微纳米粒子荧光寿命的微纳米光纤温度传感器,其探头直径仅为2 μm,进一步实现了荧光寿命型光纤温度传感器在电力设备领域内细微结构的“无干扰”测量,但该设备目前的温度检测精度不高,仅能达到±2℃,在小型化荧光寿命型传感器的前提下,荧光寿命的准确检测成为该方法的关键。

(2) 输电线路

鉴于光栅可多路复用的优点,通过光纤光栅温度传感系统对输电线路进行温度监测也逐渐成为研究热点。F BARÓN等^[8]将内置3个光栅的光纤插入到焊接在全铝合金导线上的铜管上,以此避免应变的干扰,同时保证温度的准确传递,该模拟系统

连接图如图2所示,其测试结果表明风和其他环境因素引起的架空线路温度变化可能高达30℃。这类模拟方法操作简单,但在实际情况下,直接焊接在导线上的方式较为困难。

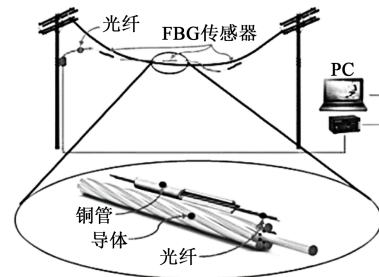


图2 光纤光栅附着导线温度测量示意图
Fig.2 Schematic diagram of temperature measurement of fiber grating attached to wire

依靠光纤光栅的毫米级大小,通过嵌入式方法将光纤光栅埋入绝缘子或电缆线芯是目前较为常见的办法。这类方法最大程度地利用了光纤光栅体积小巧的优点,图3为嵌入光纤光栅的复合绝缘子^[9]以及嵌入光纤光栅的三相电缆^[10]示意图,但这类方法加大了电力设备出厂的难度,同时,如何最大程度地降低嵌入光纤光栅对原有设备的影响、应变对输出信号的干扰也是该类方法继续优化的关键。

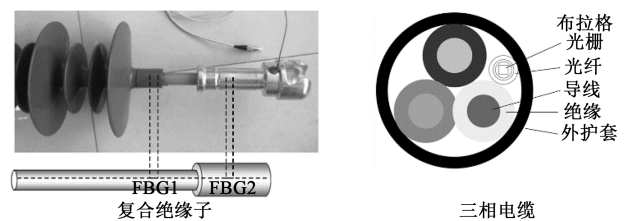


图3 光纤光栅埋入设备温度测量示意图
Fig.3 Schematic diagram of temperature measurement of fiber embedded in equipment

此外,国内外学者也对光纤光栅温度传感器在高压、强磁场环境工作的高压开关柜接头的温度监测进行了广泛研究^[11-12],测量效果基本表明光纤光栅温度传感器同样可对开关柜内重点部位的温度进行有效监测。

2.1.2 分布式温度监测

(1) 输电线路

光纤复合地线(OPGW)等电力特殊光缆当中采用单模光纤,因此一般通过布里渊分布式传感系统对其进行温度测量。国内生产的OPGW等产品均

为松套型,松套型光缆中光纤有一定的余长,并且在光纤单元中填充了油膏,相当于采取了一系列措施保证光纤不受力。因此在非极端情况下(极端情况如输电线路严重覆冰、舞动等),采用布里渊分布式传感系统对OPGW中的线芯进行测量时,无需对应力应变的影响进行修正。并且,OPGW等产品当中的铝包钢线和铝合金线都是热的良导体,因此散射型分布式光纤传感可直接测量线芯温度。罗健斌^[13]在未考虑温度补偿的情况下,建立了BOTDR系统对光纤复合相线(OPPC)的温度进行测量,系统温度分辨率达 0.1°C ,空间分辨率达 10 m ,且测量距离超过了 50 km 。LU Lidong等^[14]基于OPGW雷击位置的热效应,采用温度灵敏度为 1°C 的BOTDR作为分布式温度传感器进行雷击监测,但由于OPGW特殊的结构,OPGW遭受雷击的范围小于 10 cm ,远小于BOTDR系统的空间分辨率,因此通过此种方法只能捕获和定位放电量较大的雷击。

除此之外,LUO Jianbin等^[15]通过将点式传感与分布式传感结合,由点式传感系统捕捉动态应变,由分布式传感系统捕捉动态温度,取得了良好的监测效果,如图4所示。该系统通过BOTDR传感子系统测量架空线路的温度,FBG传感子系统测量架空线路的张力,目前,相关研究已证明了类似系统的可行性。

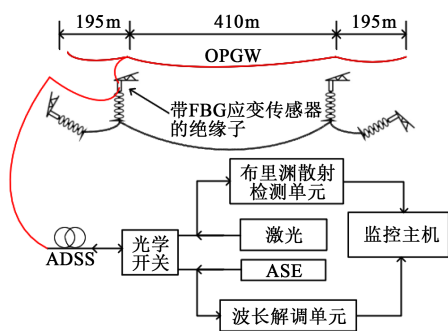


图4 FBG与BOTDR传感系统在线监测架空线路示意图

Fig.4 Schematic diagram of online monitoring for overhead lines by FBG and BOTDR sensing systems

(2)其他电力设备

除了监测输电线路温度,LU Ping等^[16]采用基于拉曼散射的光频域反射系统(OFDR)对变压器铁芯进行实时健康监测,将光纤贴于单相双绕组变压器的4个面上,监测不同部分的温度变化,实时监测变压器的损耗。不同于传统的频域检测技术,OFDR可提供微米级别的空间分辨率,然而所需要的激光

源价格非常昂贵。因此,在实际情况下,系统成本、空间分辨率、最大监测距离等都是温度监测需要权衡的因素。

2.1.3 温度监测方法的比较

表1总结了不同光纤传感器温度监测方法的优缺点。从表1可以看出,包含光纤光栅温度传感器和荧光光纤温度传感器在内的点式测温能够精确到某一点测量,适合电力设备关键部位的监测,并且不受光源功率的限制,体积小,灵敏度高。此外,对于光纤光栅传感器而言,其可构成准分布式传感网络,从而对偏远地区的高压输电线路进行多点遥测。但它们也有明显的缺陷,温度变化前后,光栅、封装材料及被测部件之间因膨胀系数不同,内部应力必然发生变化,因而稳定性会受到影响,因此封装材料与封装形式的选择是光纤光栅温度传感器发展的关键问题,并且材料的选择与封装也需要考虑与被监测设备内外环境兼容的问题。此外,精度高、稳定性好的光纤光栅解调仪往往价格不菲,也限制了该类产品的大范围推广。荧光寿命型的荧光光纤传感器同样不受光源功率影响,但较差的余晖寿命测量及计算模型直接影响着温度测量的精度。

在分布式传感当中,分布式光纤系统传感可与输电线路中的OPGW等光缆线路相结合,在对现有输电网络结构影响最小的前提下,实现温度状态的实时、远程和全方位监测。但在实际的运用过程中,拉曼散射光非常微弱,甚至可能淹没在噪声中,因此拉曼散射的噪声消除水平直接关系到整个系统的温度测量精度。布里渊散射型分布式传感系统需要以激光器作为光源,对光源的稳定性要求很高。准确提取离散布里渊散射频谱当中的中心频移特征值是该领域实际研究重点。目前,五次多项式拟合法、Levenberg-Marquardt非线性最小二乘法等都是常用的拟合方法。此外,温度应变分离技术也是该系统测量精准化发展的关键问题,目前已经有了较多的温度应变分离技术:布里渊散射光强和频移双参数法、Landau-Placzek比值法;特种光纤法;采用布里渊和拉曼双测量系统等。

2.2 应变监测

输电线路覆冰、舞动、杆塔承重状态或变压器绕组变形、位移等电力设备运行状态下可能发生的故障问题,都可归结为应变问题。光纤的应变可导致光纤的波长、功率、频率发生变化,通过将一定的

表1 不同光纤传感器温度监测方法的比较

Tab.1 Comparison of different optical fiber sensors used for temperature monitoring

方式	优点	缺点
点式 光纤光栅	1. 采用波长作为监测量,适用于发射功率不高的设备。 2. 能够精确到某一点测量,能够嵌入式埋入材料或结构内部。 3. 有出色的复用能力,构成传感网络可进行准散射型分布式测量,也可进行遥测。	1. 需要在光纤上刻录光栅,生产工艺复杂。 2. 封装技术有待提高,测温稳定性不高。 3. 可能与设备内部环境存在兼容性较差的问题。 4. 维护性较差。 5. 光纤光栅解调仪昂贵,成本高。
点式 荧光光纤(余晖寿命型)	1. 适用于任何发射功率的设备。 2. 能够精确到某一点测量。	1. 使用寿命短。 2. 测量精度低。
分布式 布里渊散射	1. 散射型分布式传感适用于现有的 OPGW 等,无缝衔接,可进行全方位检测。 2. 测量距离可达 100 km。	1. 应变与温度交叉敏感问题处于深入研究阶段。 2. 对光源的稳定性及控制系统都要求很高,系统复杂。 3. 准确提取中心频移的方法仍需要不断优化。
分布式 拉曼散射	1. 同样适用于现有的 OPGW 等,无缝衔接,可进行全方位检测。 2. 技术成熟,市面上基于拉曼散射的温度传感器产品较多。	1. 光强较弱,测量距离不足。 2. 不适用于单模光纤。 3. 噪声消除水平要求较高。

光纤参数的测量转化为对电力设备应变的监测,从而能够在设备运行状态下判断其工作是否正常,内部有无故障及其类型、性质、发展趋势等。根据光纤应变传感原理的不同,将应变监测方式分为光纤光栅应变监测和散射型分布式应变监测。

2.2.1 光纤光栅应变监测

(1) 输电线路

对于架空输电线路状态监测的研究和应用,国内外学者多采用光纤光栅应变传感器。ZHAO Long 等^[17]利用光纤光栅构成应变传感器、张力传感器、温度传感器和振动传感器,其中应变传感器通过钢板焊接在杆塔测量杆塔应变,焊接可避免传统固定方式中固化胶带来的应变传递效果差的问题。张力传感器用于监测导线结冰情况,而悬臂梁式风振传感器安装在导线夹出口,结合导线振动频率和相关公式,监测输出导线的动态振动情况,通过 OPGW 进行光信号传输,整体系统连接如图 5 所示,这也是普遍采用的光纤光栅传感器铺设方式。并且目前的相关研究中,也多采用已有的电力复合光缆对传感器进行光信号传输,在最小程度破坏原有输电线路结构的情况下,克服了传统传感器供电困难的问题。

不同于普通光纤光栅,M WYDRA 等^[18]采用啁啾光纤布拉格光栅传感器对铝线下垂进行了初步测量,传感器直接安装在导线中间,通过导线的伸

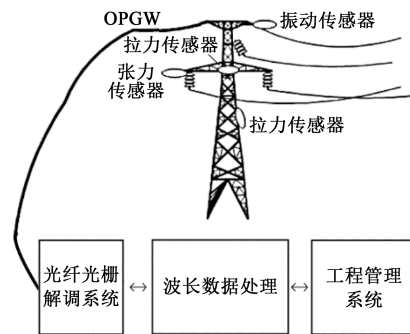


图5 光纤光栅传感系统输电线路状态监测示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical fiber grating sensing system for monitoring transmission line

长间接计算导线弧垂,啁啾 FBG 是非均匀周期光栅,具有线性可变的光栅周期,其光谱约为普通 FBG 的 10 倍,可大幅提高应变监测的灵敏度和精度,但其安装方法还有待改进。

此外,不同于传统的圆柱形张力传感器,MA Guoming 等^[19]提出了一种带法兰的“S”型弹性封装结构,如图 6 所示,弹性元件为 S 型剪切结构,截面为“工”字型,材料为 35CrMnSiA。该结构一定程度上解决了传统圆柱型张力传感器中的磁滞和偏心载荷问题,同时通过两个原始布拉格波长相差不大的光栅分别安装在不同的凹槽上,将相反的波长偏移互减,可消除温度的影响,这种结构为光纤光栅张力传感器的进一步精确化测量提供了一定的借鉴。

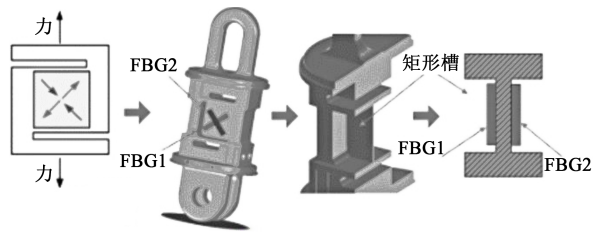


图6 “S”型结构封装的光纤光栅应变传感器示意图

Fig.6 Schematic diagram of optical fiber grating sensing encapsulated in "S" structure

目前,对导线覆冰、振动,输电杆塔变形行为监测的研究层出不穷^[20-24],这些传感系统有广阔的发展前景,可为智能电网提供多种类型的信息。同时,光栅的应变传递理论也较为简单清晰,然而,实际情况的复杂性,特别是新颖的封装保护方式、安装方法、安装位置以及被测部分复杂的应变与光纤光栅应变之间相关关系的建立与评估,需要大量的模型计算、理论推导与实践,这也是此类方法高灵敏度、稳定性及准确度的改进方向。

(2) 变压器

目前,通过光纤光栅应变传感器对变压器进行状态监测的研究较少。李凯^[25]将两支光纤布拉格光栅振动传感器放置于变压器内部铁芯顶部硅钢片处,从变压器外部的光纤端口进行光信号发射和接收。但目前该方法理论模型还过于粗糙,要精准采集大量相关振动信号,建立变压器的光栅振动-故障模型关联库。同时,光栅的布置方式、布置位置都有待研究。

2.2.2 散射型分布式光纤应变传感监测

(1) 变压器

分布式光纤应变传感系统常用来监测变压器的绕组状态,不同于上述光纤光栅振动传感器通过振动法监测变压器铁芯及绕组状态,分布式应变传感的光纤与绕组导线直接紧密缠绕,贴合在一起,光纤的应变可直接反应变压器绕组的变形,从而实现绕组变形位置与变形程度的判断等。

田源^[26]研究了不同变压器内部分布式光纤布置方案,其设计的两种光纤安装结构如图7所示,包括内置和外置两种导线式布置方案。内置导线式布置方案是将传感光纤放入导线宽面一侧开的细槽当中,同时用黏胶将光纤固定在槽中;外置导线式布置方案直接将传感光纤贴附于绕组最外侧导线。他们首先筛选出聚酰亚胺和乙烯-四氟乙烯共聚物作为传感光纤的涂覆层和护套材料^[27],之后分析了

绕组导线发生轴向应变和弯曲应变时光纤应变传递机理,结果表明为提高应变传递率、增大检测灵敏度,应适当减小传感光纤的护套厚度、选择弹性模量较大的黏胶层和护套层材料,增加传感光纤长度。同时,采取内置光纤方案的测量精度更高。两种布置方案均采用了布里渊-拉曼双系统进行应变和温度的区分测量和基于互相关-LM法的布里渊频谱拟合方法和双峰拟合方法进行信号提取,通过基于S变换提取绕组变形时光纤应变曲线特征量,采用极限学习机器学习算法识别绕组故障类型,对测试样本的识别率达94%以上^[28]。

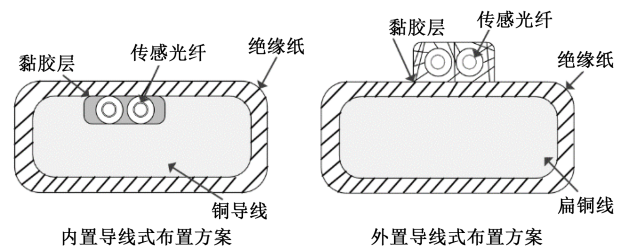


图7 变压器内部分布式光纤布置方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of the distributed optical fiber layout scheme inside the transformer

(2) 输电线路

由1.2节散射型分布式光纤传感技术简介可知,布里渊散射对温度和应变均敏感,因此目前能够对输电线路进行应变监测的分布式传感系统主要基于布里渊散射原理。

吕安强等^[29]通过布里渊-拉曼散射型分布式传感双系统测量光纤复合海底电缆的应变及温度,同上述田源的变压器绕组变形测量原理一样,都是通过拉曼传感系统进行温度补偿,并采用了新的应变、温度同时标定的方法。但由于海缆体积、质量大,运行环境复杂,采用相关理论进行的实体试验验证较少,缺乏实际数据的有效支撑。

2.2.3 应变监测方法的比较

表2总结了光纤在应变监测方面的优缺点。从表2可以看出,光纤光栅应变传感器体积小,灵活多变,可根据需要制作成张力、倾角、舞动传感器等。但光纤不同的涂覆材料、护套材料以及传感器封装材料会导致应变传递率、灵敏度、可靠性等传感参数的不同,需要具体验证并选择合适的材料,并且倾角、舞动传感器采用的等强度梁也是理想化模型,实际制作参数准确的传感器产品也存在一定的困难。同样,输电线路的覆冰、舞动、输电杆塔应

变过程机理非常复杂,该类模型的准确建立对状态监测的准确化至关重要。此外,采用准分布式光纤光栅传感进行监测,难以准确定位导线的真实不均

匀情况,并且安装在户外输电塔上的传感器易损坏,需要更加安全合理的保护装置。

表2 不同光纤传感器应变监测方法的比较

Tab.2 Comparison of different optical fiber sensors used for strain monitoring

方式	优点	缺点
光纤光栅应变传感	体积小巧,灵活多变,可根据需要制成拉力、倾角、舞动等传感器。	<ol style="list-style-type: none"> 1.不同材料的应变传递的传递率、可靠性等需要具体分析。 2.等强度梁模型理想化。 3.输电线路覆冰、舞动机理复杂,模型构建、软件编制复杂。 4.用于输电线路测量仍无法准确定位导线的真实不均匀覆冰情况。 5.安装在输电塔上,易损坏,不适宜恶劣天气下输电线路的状态监测。
散射型分布式光纤应变传感	随输电线路或变压器绕组变化,全方位监测,一定程度保证应变传递的传递率、可靠性等。	<ol style="list-style-type: none"> 1.不同材料的应变传递率、灵敏度、可靠性等需要具体分析。 2.在变压器内部布线容易发生过度弯折导致光纤脆断。 3.传感器的长期稳定性不足。

分布式光纤应变传感可随输电线路或变压器绕组一起变化,全方位监测,一定程度上保证了应变传递的传递率、可靠性等,但同光纤光栅应变传感一样,不同的材料仍需要具体实验分析。此外,光纤在变压器内布线也存在发生脆断的可能性,在长期的监测当中,光纤传感器也会发生应力松弛现象,导致测量结果不准确,传感器的长期稳定性较差。

2.3 局部放电监测

局部放电是电力设备绝缘故障的早期症状,局部放电的有效监测对电力系统的安全运行十分重要。应用于局部放电的光纤类型主要有干涉型光纤、散射型分布式光纤、荧光光纤、光纤光栅等。

2.3.1 干涉型光纤局放监测

干涉型光纤局放监测传感器是当前应用最为普遍的光纤局放监测传感器,主要包括 Mach-Zehnder 传感器、Michelson 传感器、Sagnac 传感器和 Fabry-Perot 传感器。其中,光纤 Fabry-Perot 传感器具有结构小、质量轻、灵敏度高、响应频率好等优点,在干涉型光纤局放监测传感器中得到了广泛研究。

光纤 Fabry-Perot 传感器根据其 F-P 腔构成方式可分为光纤本征型 Fabry-Perot 干涉(IFPI)传感器和光纤非本征型 Fabry-Perot 干涉(EFPI)传感器,相较而言,光纤 EFPI 传感器设计灵活、制造简单、珐珀腔介质多样,从而得到了更多的关注。K MURPHY

等^[30]于 1991 年首次制造了 EFPI 传感器。目前,局部放电的检测和定位最常使用的是光纤 EFPI 传感器。

近年来,对提高 EFPI 灵敏度及线性响应的方法主要集中在新的结构、材料的加工以及传感器阵列的布置。在几种传感器的制造工艺当中,微机电系统技术(MEMS)可实现 EFPI 微米级甚至纳米级膜片的大规模生产,并且可以精确控制 F-P 腔长度和安装平行度,DENG Jiangdong 等^[31]采用微机电系统,通过薄石英玻璃膜片和封装在圆柱形石英玻璃管中的单模光纤搭建了光纤 EFPI 传感器系统,工作原理如图 8 所示。该石英玻璃板的厚度仅为 20 μm,石英玻璃管内径为 1 mm,外径为 6 mm,发射光经 3 dB 耦合器进入单模光纤,到达传感探头后发生两次反射。当局放发生时,硅膜片会发生振动,通过检测高速信号处理器的输出实现局部放电的测量,经实验表明其局放检测较为灵敏。

此外,GAO Chaofei 等^[32]通过仿真研究了声波在变压器内部的传播,设计了一种新型结构传感器及其阵列,传感器及其系统示意图如图 9 所示,该传感器所有零件通过激光焊接,实现了全硅结构,并且通过在硅胶套顶部和底部的开孔帮助传感器实现真空、动态压力下的正常工作。经实验,通过采用 8 个传感器构成的阵列,其局放的定位误差小于 5 cm,尤其适用于变压器绕组内部或绕组间油道中的局部放电,该系统为探索变压器内部环境变化情况下局部放电的精确测量与定位提供了一定的

借鉴。

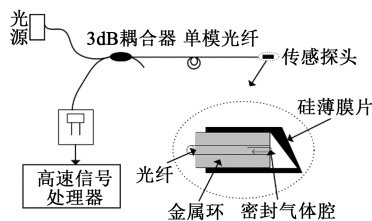
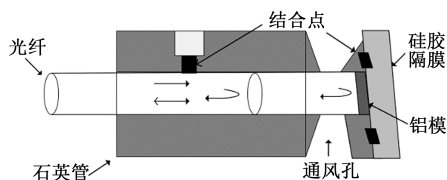
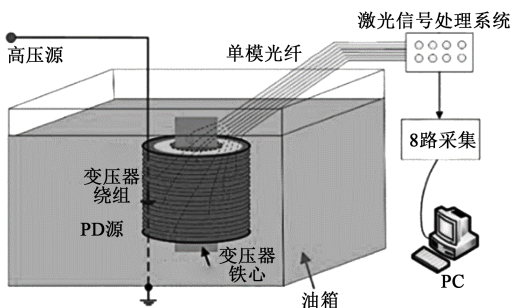


图8 光纤EFPI传感器局部放电测量工作原理图

Fig.8 Working principle diagram of optical fiber EFPI sensor on measuring partial discharge



(a)传感器



(b)局部放电在线监测系统

图9 一种全硅结构EFPI传感器及局部放电在线监测系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of an all-silicon EFPI sensor and its partial discharge online monitoring system

除了采用光纤 Fabry-Perot 传感器进行局放监测外,其他几种干涉型光纤在局放监测领域也有一定的研究。李晓敏^[33]将 Sagnac 光纤传感器应用于局放监测系统,利用直线型 Sagnac 和双回路 Sagnac 进行局放监测定位。周宏扬等^[34]采用 Michelson 光纤传感器建立一种超声传感系统,用于实际 GIS 设备局部放电超声信号检测。吴凌峰等^[35]采用 Mach-Zehner 光纤传感系统对高压多层陶瓷器件进行了局放测量。以上几种传感类型都基于双光束干涉原理,但到目前为止,这几种方法在稳定性、定位能力等方面都弱于 EFPI 传感器,因而也较少研究与采用。

2.3.2 其他类型光纤局放监测

除干涉型光纤之外,散射型分布式光纤、荧光

光纤、光纤光栅等都有用于局放监测的相关研究。PROHWETTER 等^[36]采用瑞利散射型 OTDR 光纤测量电缆终端和中间接头,首次将散射型光纤传感应用于电缆局部放电测量中。皮昊书等^[37]在此基础上作出进一步改进,提出了一种相敏光时域反射仪(ϕ -OTDR)的散射型光纤传感系统,通过检测光纤之间的干涉信号确定局放的大小和发生位置。魏念荣等^[38]提出了 3 种用于局放监测的荧光光纤传感结构,通过对荧光信号的监测与转换得到局放信号。B SARKAR 等^[39]基于局部放电过程中产生的脉冲声压引起的 FBG 波长的偏移原理,在忽略温度影响的前提下搭建 FBG 局放监测系统对变压器内部进行监测。但目前无论是基于瑞利散射型分布式光纤、荧光光纤,还是光纤光栅,都不足以比拟 EFPI 传感器的灵敏度与稳定性,因此相关的研究与应用也较少。

2.3.3 局放监测方法的比较

表 3 列出了不同局部放电光纤测量方法的优点。对于干涉型光纤,Michelson 型传感器和 Mach-Zehnder 干涉仪主要用于低频信号的检测,这两种方法的灵敏度和准确度较低,因此应用较少;Sagnac 干涉型光纤可以对局放的高频信号增益,而对低频噪声衰减,其抗干扰性能最好,但受环境温度影响大;Farby-Perot 干涉型光纤具有灵活方便的小巧结构,同时还具有高灵敏度、精确度和稳定性,是目前最具有发展前景的干涉型光纤。此外,与 IFPI 相比,EFPI 制造简单,珐珀腔介质多样,目前得到了更广泛的研究。而其他类型的光纤传感局放监测方式优点较少,缺点较多,导致研究与应用较少。

2.4 光纤电流传感器

光纤电流传感器主要利用光纤传递信息,利用法拉第效应实现传感,基本可分为 4 种类型:光电混合型、全光纤型、块状玻璃型以及磁场传感器型。光电混合型仍采用电磁感应原理制作传感头,光纤仅作为信号传输的媒介,相关技术也比较成熟。全光纤型利用光纤传感,光纤在被测导体周围形成光回路进行测量,其结构简单、测量范围大、灵敏度高、使用方便,但存在线性双折射问题。块状玻璃型以较高 Verdet 值的磁光玻璃为传感头,不受线性双折射问题的影响,但磁光玻璃传感头制作难度大,同时存在光偏振态变化的问题。磁场传感器型通过磁滞伸缩材料的尺寸变化引起光纤内的应变进而测得电流,但测量结果受到多种因素的干扰,

表3 不同光纤传感器局放监测方法的比较

Tab.3 Comparison of different optical fiber sensors used for partial discharge monitoring

方式	优点	缺点
干涉型光纤局放监测	Michelson	1. 定位准确度较低。 2. 光源波动和外界环境影响大。 3. 信号的解调与提取复杂。 4. 传感光纤布置复杂。 5. 有超声波多路径传播问题。
	Mach-Zehnder	1. 灵敏度低。 2. 结构复杂、稳定性较低。 3. 定位准确度较低。
	Sagnac	1. 光纤探头对灵敏度影响大。 2. 易受温度影响。
	IFPI	1. 灵敏度高。 以光纤作为谐振腔,存在偏振稳定性问题。
其他类型光纤局放监测	Farby-Perot	1. 灵敏度高。 2. 定位能力强。 3. 稳定性高。 4. 谐振腔为非光纤介质。 5. MEMS制作可批量式生产。
	瑞利散射型分布式光	1. 测量频带和电压等级较低。 2. 实时监测相关研究有待发展。
	荧光光纤	1. 灵敏度低。 2. 解调系统复杂。 3. 尺寸较大且合理选择荧光光纤长度非常重要。
	光纤光栅	灵敏度不足,稳定性差。

目前难以实际运用。

相比之下,全光纤电流传感器(AFOCS)的各项指标在理论上优于其他几种。根据信号检出方法的相关原理,AFOCS可分为非干涉型和干涉型两种。非干涉型不需要相位调制器,光偏振状态的旋转角度可反映被测电流。干涉型AFOCS通过调制器对光波进行相位调制,监测输出干涉光的相位差反映被测电流。两者当中,非干涉型AFOCS测量灵敏度低,受双折射问题影响较大,且容易受光源功率波动、温度变化、振动等因素的影响,因此干涉型AFOCS得到了更加广泛的关注。

从结构上分,干涉型AFOCS可分为环形结构和反射结构。以反射结构为例,其一般结构如图10所示。光源发出的光经耦合器起偏为线偏振光,45°熔接点将光分解后,经相位调制器调制,进入四分之一波片变成圆偏振光,经过法拉第效应产生相位差以及反射镜反射后,圆偏振光再经上述过程变

为正交的线偏振光,最终在检偏器处发生干涉。通过测量相位差即可实现电流的测量。

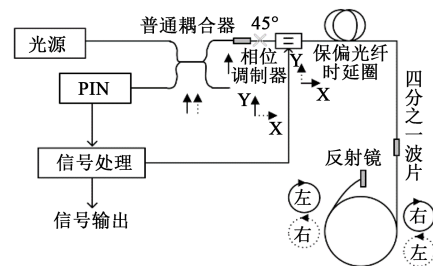


图10 反射结构干涉型全光纤电流传感器示意图
Fig.10 Schematic diagram of interferometric AFOCS with reflective structure

表4列出了干涉型AFOCS的环形结构和反射结构的优缺点。从表4可以看出,线性双折射问题是两者的共同问题,也是目前AFOCS发展亟需解决的关键问题,国内外学者对此进行了广泛的研究,提出的方法主要有采用退火光纤、扭转光纤以

及光纤圈特殊缠绕法等。

表4 两种干涉型全光纤电流传感器的比较

Tab.4 Comparison of two kinds of interferometric AFOCS

种类	优点	缺点
环形结构	成本低。	1. 存在线性双折射问题。 2. 存在 Sagnac 效应。 3. 系统稳定性低。 4. 测量误差大。
反射结构	1. 灵敏度高。 2. 受外界影响小。 3. 可抑制 Sagnac 效应。	1. 存在线性双折射问题。 2. 成本高。 3. 易产生寄生效应。

此外,环形结构的干涉型 AFOCS 成本较低,但存在 Sagnac 效应,它会降低系统稳定性,增加测量误差。而反射结构由于反射回路的存在,可以有效地抑制 Sagnac 效应,灵敏度高,且在同一根光纤中传输,受外界影响小,但反射结构调制时必须使用双折射调制器,增加成本且调制复杂,进行双轴调制易于产生寄生效应。相较之下,反射结构的研究较多,其大电流测量精度可达 $\pm 0.1\%$ ^[40]。

2.5 光纤传感在电力系统的其他应用

2.5.1 光纤盐密传感器

绝缘子表面的污秽程度反映了输电线路的基本绝缘情况。将光纤光栅表面涂覆聚酰亚胺,可制成光纤盐密传感器。测量污秽时,将传感器贴附于绝缘子表面,在污秽层湿润的阶段,水分进入聚酰亚胺膜内引起薄膜膨胀,光纤光栅产生应变,布拉格波长随之改变,据此制作成的光纤盐密传感器,可用于绝缘子表面的污秽监测^[41]。但污秽当中的氯化钠会导致薄膜外侧形成浓度较低的氯化钠溶液,膜内水分又向膜外扩散,光纤布拉格波长的变化因此受到了抑制。从目前对聚酰亚胺涂覆的盐密传感器的测试结果来看^[42-43],尽管可通过增加聚酰亚胺薄膜厚度的方法提高灵敏度,但其对盐度仍然不是很敏感,在分光计的低分辨率下,即使盐度有1%的变化,也难以检测到波长变化。类似的还有直接通过刻蚀的布拉格光纤光栅进行盐密测量^[44],但这种传感器要比通过薄膜包裹的传感器脆弱很多,难以实现实际户外应用。

此外,也有部分研究通过测量光在光纤中传输时的光能损耗来体现绝缘子的污秽程度^[45-47]。污秽中盐分电离后的离子态以及无法电离的灰分可导致光波的光能参数改变,通过监测不同环境下光能参数的变化,即可计算污秽的等值附盐密度和不溶

物密度,然而,依靠光进行污秽检测的光纤传感器首先会受到光学器件不稳定的影响,在此大前提下,就难以比拟光纤光栅。

在实际运用的过程当中,不同时间不同地域的户外气候差异大,绝缘子积污性质、污秽程度差别也较大,目前的光纤盐密传感器测量模型大多单一与理想化,污秽与光参数明确的对应关系也需要更多的实验与数据分析,直接表现为污秽检测的准确度与灵敏度不足。在其他领域,例如对海水盐密的检测,同样出现了多种光纤盐密传感器,但其应用环境与户外输电线路存在差异,通过借鉴其他领域的光纤盐密传感器并进行改进,也是一种可行的办法。

2.5.2 光纤氢气传感器

氢气是充油电力变压器中观察到的主要故障气体,也是可能的局部放电和过热的指示器。目前的光纤光栅氢气传感器和干涉型光纤氢气传感器等主要以光纤纤芯镀有钯膜或钯/银、钯/金、钯/铬等复合膜为基础。

对于光纤光栅传感器而言,当纤芯镀有钯膜时,氢气渗透入钯膜生成 PdHx,使得钯膜体积膨胀,导致布拉格光栅纵向拉长,从而带来相应波长的变化,据此测得氢气浓度^[48]。对于干涉型光纤氢气传感器而言,钯膜体积膨胀,光纤伸长后增加光程,导致干涉仪的信号臂内光信号的相位发生改变,由此测得氢气浓度。

目前,为了提高此类氢气传感器的灵敏度及准确性,方案优化仍然集中在钯膜厚度、材料以及光纤的结构上^[49-51]。

2.6 未来的发展方向

目前,光纤传感技术已成为电力设备监测领域的研究重点。光纤布拉格光栅常用于电力设备当中关键部位的温度及应变监测,散射型分布式光纤常与 OPGW 等电力特殊光缆结合,能够进行全方位的温度及应变监测,荧光光纤根据不同特性常用于电力设备温度和局放信号的监测,干涉型光纤常用于局放信号的监测以及光纤电流传感器的应用。但是,相关技术快速发展的同时也存在诸多问题,传感器的出厂加工、噪声的干扰、信号的解调、模型的建立等因素都会极大地影响光纤传感系统的监测范围、分辨率等测量需求与结果,诸多缺点都亟待解决。此外,电网智能化的发展使得单一监测元件或单一故障监测不再适用,基于光纤传感技术的组网化监测采用统一光源供电,通过光纤传感向智

能电网提供多种在线信息也是新的发展趋势。

3 结束语

(1)目前,采用单一的传感元件难以满足电力设备集成化、模块化,电力网络智能化的发展需求,基于抗电磁干扰、尺寸小、可多路复用等优点的光纤传感技术对电力设备运行下的温、力、电、气、光等多种参量进行实时在线组网监测成为一种趋势。

(2)目前,已有光纤传感技术投入到工程应用中,不论是温度监测、应变监测、局放监测还是电流监测等,都需要结合实际需要,在考虑监测环境、精度需求、系统成本的前提下,权衡相关因素,选择合适的光纤类型、封装方案、布置方式、解调系统等。

(3)光纤传感技术的发展涉及光学、电学、力学、化学等多个学科,目前仍有诸多问题亟待解决:传感器的精密加工与装配、出厂的一致性;传感器的灵敏度、在复杂环境下长期工作的可靠性;传感器与电力设备的相容性;传感器及解调系统的成本问题等。

参考文献:

- [1] HAMMON T E, STOKES A D. Optical fibre Bragg grating temperature sensor measurements in an electrical power transformer using a temperature compensated optical fibre Bragg grating as a reference[C]//Proceedings of 11th International Conference on Optical Fiber Sensors. Sapporo, Japan: OSA, 1996:566-569.
- [2] 邓建钢,郭涛,徐秋元,等. 变压器绕组测温光纤光栅传感器设计及性能测试[J]. 高电压技术, 2012,38(6):1348-1355.
- [3] YI Jiang, LIU Shuang, LI Xiao, et al. Fiber Bragg grating sensors for temperature monitoring in oil-immersed transformers[C]//International Conference on Optical Communications and Networks. Hangzhou, China: IEEE, 2016:1-3.
- [4] WICKERSHEIM K A. Optical temperature measurement technique utilizing phosphors: US4215275[P]. 1980-07-29.
- [5] ZHAO Yong, ZHENG Hongkun, LI Guilin, et al. Development of fiber optical temperature sensor based on fluorescence lifetime [C]//Advanced Sensor Systems and Applications. Beijing, China: SPIE, 2016.
- [6] ZHAO Yong, CHEN Maoqing, LÜ Riqing, et al. Small and practical optical fiber fluorescence temperature sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10):2406-2411.
- [7] ZHAO Yongtan, PANG Chenlei, WEN Zhong, et al. A microfiber temperature sensor based on fluorescence lifetime[J]. Optics Communications, 2018, 426:231-236.
- [8] BARÓN F, ALVAREZ-BOTERO G, AMORTEGUI F, et al. Temperature measurements on overhead lines using fiber Bragg grating sensors[C]//2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Turin, Italy: IEEE, 2017.
- [9] CHEN Wen, TANG Ming. Monitoring on internal temperature of composite insulator with embedding fiber Bragg grating for early diagnosis[C]//25th Optical Fiber Sensors. Jeju, South Korea: IEEE, 2017.
- [10] SHI Jiyue. The research of power cable on-line measurement system based on fiber Bragg grating sensor[J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 51(2):1255-1260.
- [11] 巩宪锋,衣红钢,王长松,等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1):155-158.
- [12] YANG Guang, JI Hao, LIU Yangyang, et al. Design of on-line temperature measurement system for high voltage switch cabinet [C]//2015 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems. Amsterdam, Netherlands: Atlantis Press, 2015:859-863.
- [13] 罗健斌. 基于光纤传感技术的高压输电线路覆冰状态监测研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- [14] LU Lidong, YUN Liang, LI Binglin, et al. Experimental study on location of lightning stroke on OPGW by means of a distributed optical fiber temperature sensor[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 65:79-82.
- [15] LUO Jianbin, HAO Yanpeng, YE Qing, et al. Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10):1559-1565.
- [16] LU Ping, LALAM N, BADAR M, et al. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4):041302.
- [17] ZHAO Long, HUANG Xinbo. Integrated condition monitoring system of transmission lines based on fiber Bragg grating sensor [C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an, China: IEEE, 2016:667-670.
- [18] WYDRA M, KISALA P, HARASIM D, et al. Overhead transmission line sag estimation using a simple optomechanical system with chirped fiber Bragg gratings. Part 1: Preliminary measurements[J]. Sensors, 2018, 18(1):309.
- [19] MA Guoming, LI Yabo, MA Naiqing, et al. A fiber Bragg grating-based dynamic tension detection system for overhead transmission line galloping[J]. Sensors, 2018, 18(2):365.
- [20] MAO Naiqiang, MA Guoming, ZHOU Hongyang, et al. The on-line monitoring system of transmission lines weight based on fiber sensing technology[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an, China: IEEE, 2016: 635-638.
- [21] ZHAO Long, HUANG Xinbo, JIA Jingyuan, et al. Detection of broken strands of transmission line conductors using fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors, 2018, 18(7):2397.
- [22] HUANG Xinbo, ZHAO Long, CHEN Ziliang, et al. An online monitoring technology of tower foundation deformation of transmission lines[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 18(3): 949-962.

- [23] XIE Kai, LÜ Zhongbin, ZHENG Xing, et al. Transmission line galloping induced dynamic strain measurement of an angle brace based power transmission tower by FBG sensors[C]//2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Houston, USA: IEEE,2018.
- [24] JURASZEK J. Fiber Bragg sensors on strain analysis of power transmission lines[J]. *Materials*,2020,13(7):1559.
- [25] 李凯. 变压器的振动状态分析与光纤光栅监测研究[D]. 昆明: 昆明理工大学,2016.
- [26] 田源. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [27] 刘云鹏,田源,姜烁,等. 光纤护套材料对变压器油热老化特性影响研究[J]. *绝缘材料*,2017,50(12):54-59.
- [28] LIU Yunpeng, TIAN Yuan, FAN Xiaozhou, et al. Detection and identification of transformer winding strain based on distributed optical fiber sensing[J]. *Applied Optics*,2018,57(22):6430-6438.
- [29] 吕安强,李永倩,李静,等. 基于BOTDR的光纤复合海底电缆应变/温度监测[J]. *高电压技术*,2014,40(2):533-539.
- [30] MURPHY K, GUNTHER M, VENGSARKAR A, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. *Optics Letters*,1991,16(4):273-275.
- [31] DENG Jiangdong, XIAO Hai, HUO Wei, et al. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers [J]. *Optics and Laser Technology*,2001,33(5):305-311.
- [32] GAO Chaofei, YU Lei, XU Yue, et al. Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2019,34(4):1251-1260.
- [33] 李晓敏. 局部放电超声特性光纤传感检测方法研究[D]. 太原: 太原理工大学,2018.
- [34] 周宏扬,马国明,张猛,等. 基于Michelson光纤干涉的GIS局部放电超声信号检测技术[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(21):6452-6459.
- [35] 吴凌峰,贺红亮,魏晓勇,等. 用于局部放电探测的超声光纤传感方法[J]. *压电与声光*,2017,39(2):190-193.
- [36] ROHWETTER P, RENÉ E, KREBBER K. Distributed acoustic sensing: Towards partial discharge monitoring[C]//Proceedings of 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. Curitiba, Brazil:SPIE,2015.
- [37] 皮昊书,韦盈释,陈金锋,等. 基于光纤传感技术的电缆接头局部放电监测[J]. *深圳大学学报(理工版)*,2020,37(1):57-62.
- [38] 魏念荣,张旭东,曹海翔,等. 用荧光光纤技术检测局部放电信号传感器的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2002,42(3):329-332.
- [39] SARKAR B, KOLEY C, ROY N, et al. Condition monitoring of high voltage transformers using fiber Bragg grating sensor[J]. *Measurement*,2015,74:255-267.
- [40] LI Chuansheng, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao, et al. Error analysis and experiment for reflective sagnac interferometer-type fiberoptic current sensor[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics. Dalian, China: IEEE,2011.
- [41] 穆瑞铎. 用于绝缘子表面盐密检测的光纤布喇格光栅传感器的研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.
- [42] MA Guoming, JIANG Jun, MU Rruiduo, et al. High sensitive FBG sensor for equivalent salt deposit density measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2014,27(2):177-180.
- [43] LUO D, MA J X, IBRAHIM Z, et al. Etched FBG coated with polyimide for simultaneous detection the salinity and temperature[J]. *Optics Communications*,2017,392(1):218-222.
- [44] YANG H Z, QIAO X G, RAJIBUL I, et al. Simultaneous measurement of aliphatic alcohol concentration and temperature based on etched taper FBG[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*,2014,202(31):959-963.
- [45] 万德春,蔡炜,宋伟,等. 光技术盐密在线监测系统的研究[J]. *高电压技术*,2005,31(8):33-35.
- [46] 张锐,吴光亚,刘亚新,等. 光技术在线监测绝缘子盐密和灰密的实现及应用[J]. *高电压技术*,2010,36(6):1513-1519.
- [47] HUANG Xinbo, XIE Cheng, LI Husheng. Equivalent salt deposit density optical fiber sensor for transmission lines in power grid [J]. *IEEE Sensors Journal*,2016,17(1):91-99.
- [48] MA Guoming, LI Chengrong, LUO Yingting, et al. High sensitive and reliable fiber Bragg grating hydrogen sensor for fault detection of power transformer[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*,2012,169:195-198.
- [49] MA Guoming, LI Chengrong, MU Ruiduo, et al. Fiber Bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2014, 21(1):380-385.
- [50] MA Guoming, JIANG Jun, LI Chengrong, et al. Pd/Ag coated fiber Bragg grating sensor for hydrogen monitoring in power transformers[J]. *Review of Scientific Instruments*,2015(86):226-232.
- [51] FISSER M, BADCOCK R, TEAL P, et al. Development of hydrogen sensors based on fiber Bragg grating with a palladium foil for online dissolved gas analysis in transformers[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Munich, Germany: SPIE,2017.