

基于光纤光栅传感器的变压器油放电声信号特征研究

任 彬^{1,2}, 任子乾¹, 刘 音², 徐永海¹, 孙 杰², 李国强², 黄 猛^{1*}

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网北京市电力公司, 北京 100073)

摘 要: 声信号是变压器局部放电的关键特征参量。为克服现有变压器局部放电监测方法存在抗电磁干扰能力弱以及无法实现内置式布置的不足, 本文设计出一种频率范围为 5~60 kHz, 覆盖可听声和低频超声的光纤光栅 (FBG) 传感器。利用该传感器对变压器油中柱-柱电极放电发展过程中的声信号进行测量, 同时对声信号的频域重心与可听声能量占比进行提取。进一步将所研制的光纤光栅传感器布置在真型变压器中验证其对变压器内部放电声信号的监测效果。结果表明: 变压器油中柱-柱电极放电声信号的主频带在 5~10 kHz 和 46~60 kHz 范围内, 声信号的频域重心和可听声能量占比随放电严重程度均呈现先上升后下降的趋势; 研制的光纤光栅传感器能够有效监测±400 kV 真型换流变压器中放电的发展过程。

关键词: 变压器; 局部放电; 光纤光栅; 声传感器; 声纹特征

Study on acoustic signal characteristics of transformer oil discharges based on fiber Bragg grating sensor

Ren Bin^{1,2}, Ren Ziqian¹, Liu Yin², Xu Yonghai¹, Sun Jie², Li Guoqiang², Huang Meng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100073, China)

Abstract: Acoustic signal is the key characteristic parameters for identifying partial discharges (PD) in power transformers. To address the limitations of conventional PD monitoring techniques, such as weak anti-electromagnetic interference and inability to achieve internal deployment, a fiber Bragg grating (FBG) with a frequency range of 5-60 kHz covering audible sound and low-frequency ultrasound was designed in this paper. The sensor was employed to monitor acoustic signal during the discharge process between column-column electrodes in transformer oil, and the frequency domain gravity center and audible acoustic energy proportion of acoustic signal were extracted. Further, the prepared sensor was embedded within a full-scale transformer to verify its monitoring effectiveness for the internal discharge sound signals of transformer. The results show that the dominant frequency bands of the column-column electrode discharge acoustic signals in transformer oil are within the range 5-10 kHz and 46-60 kHz, and the frequency domain gravity center and the audible acoustic energy proportion of the acoustic signal show a trend of increasing first and then decreasing with discharge severity. The proposed FBG sensor can effectively monitor the discharge development in the ±400 kV converter transformer.

Key words: transformer; partial discharge; fiber Bragg grating; acoustic sensor; voiceprint characteristics

0 引言

变压器是电能传输的关键节点, 及时发现并预警其中的潜在故障, 有助于运维人员及时干预, 防止故障继续发展, 从而保障变压器运行的安全性与稳定性^[1-5]。当变压器内部绝缘劣化致使电弧放电时, 如果保护装置灵敏度不足, 无法立即动作, 将导

致故障进一步恶化。根据 2013 年 CIGRE 变压器工作组的统计数据^[6], 有超过一半的这类故障案例出现变压器油箱破裂、爆炸的严重后果。因此, 构建一种实时高效的运行状态监测与故障预警方法, 实现对变压器运行状态的有效实时监测, 及时预警其内部故障, 对保障变压器的稳定可靠运行具有重要的现实意义^[7]。

在变压器内部发生的放电由初期缺陷逐步演

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2407005); 国网北京市电力有限公司科技项目 (520233230001)。

化至故障阶段的过程中会伴随有可听声与超声信号的产生^[8-10]。声信号被认为是放电故障发生早期的关键预警特征。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)以其绝缘性好、抗电磁干扰、质量轻以及体积小等优点,被广泛应用于传感领域^[11-13]。近年来,光纤光栅在传感领域的应用取得了显著进展。2003年,美国学者P Fomitchov和S Krishnaswamy率先开展了针对流体与固体结构中声信号的光纤光栅探测研究^[14],结果表明光纤光栅在频率为10 kHz~5 MHz范围内对声信号具有良好的感知能力。2017年,马宾等^[15]将光纤光栅置于变压器油中实现了对变压器内局部放电声信号的在线监测。2019年,虞若雨^[16]基于环形掺铒激光器设计了具有较宽频率响应范围的光纤光栅水听器系统,其信噪比约为50 dB,灵敏度可达到88.0 mV/MPa。

由于具备较强的抗电磁干扰特性及良好的定位性能,声波监测技术在局部放电监测领域逐渐成为研究热点。朱涛等^[17]在110 kV真型变压器中布置3种悬浮放电缺陷,并分析了放电发展中脉冲电流、特高频和声信号的变化规律,结果表明基于声信号与特高频信号的联合诊断方法可对悬浮放电缺陷进行有效识别。秦少瑞等^[18]分析了局部放电声波信号在变压器中的传播过程,同时采集了变压器内局部放电的超声信号。吕昊民等^[19]测量了3种放电模型下局部放电发展过程中的可听声信号频谱特征,同时以可见光信号为辅助判据实现了变压器

故障的识别。

目前对变压器局部放电的监测主要关注超声信号^[20-22],但是随着局部放电程度的加剧,放电后期还会产生大量可听声信号。然而现有的光纤光栅传感器对可听声及低频超声的感知能力相对不足。因此,有必要研制覆盖可听声与超声的光纤光栅传感器并提取局部放电的声信号特征,从而更迅速、可靠地识别变压器内部放电程度,阻断放电故障的发展。

综上,本文研制一种用于油浸式变压器内部可同时监测可听声-低频超声的光纤光栅传感器,利用该传感器采集变压器油中柱-柱电极放电发展过程中的声信号并分析其特征变化规律。通过真型变压器放电声信号感知试验验证该传感器应用于真型变压器的可行性,同时根据声信号最大幅值变化对放电阶段进行划分。

1 光纤光栅传感器的研制

1.1 光纤光栅传感器原理

根据光纤光栅的耦合模理论,外界物理量的扰动会使光栅的周期与折射率发生变化,导致Bragg波长漂移。考虑到声波主要通过轴向应力作用于光纤光栅,因此将其简化为瞬态正弦纵波模型^[23]。假设声信号沿光纤 z 轴线传播,其声波方向与光纤法线一致,则在声波作用下,声波的应变(ε)、光纤光栅的有效折射率(n_{eff})和中心波长(λ_B)可分别表示为式(1)^[24-26]。

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z - \omega_s t\right) \\ n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}} - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{A} z\right), z \in [0, L] \\ \lambda_B(t) = \lambda_B + \lambda_B \varepsilon_m \left\{ 1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) \cdot [P_{12} - \sigma(P_{11} + P_{12})] \right\} \cos(\omega_s t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ε_m 为作用在光纤光栅上声波的幅值; λ_s 为声波信号的波长; ω_s 为声波信号的角频率; A 为光纤光栅的周期; z 表示光纤光栅的轴向坐标; Δn 表示光纤折射率最大调制系数; L 表示光纤光栅的长度; P_{11} 、 P_{12} 为光纤光栅的弹光系数; σ 为光纤光栅的泊松比; t 为时间。

由上述分析可得,对于结构参数已知的光纤光栅,其中心波长的变化只受声信号的应变幅值和角频率的影响。对于一般的石英光纤, $P_{11}=0.12$, $P_{12}=0.275$, $\sigma=0.17$, $n_{\text{eff}}=1.456$ 。则根据计算可知,光纤光

栅的中心波长为1 550 nm时,一个 10^{-6} 量级的微应变导致的波长偏移量约为1.2 pm。因此,利用光纤光栅实现对声信号的感知是可行的。

1.2 传感器设计

1.2.1 线性边缘滤波法

相比匹配滤波法而言,线性边缘滤波法具有光路结构简单、信噪比高等优点,因此本文基于线性边缘滤波法搭建光纤光栅声传感系统^[27]。图1为线性边缘滤波法的原理图,其中 I 表示光强度, λ_0 为激光器中心波长, λ_s 为光纤光栅反射谱中心波长, λ'_s 为

光纤光栅反射谱在声波作用下漂移后的中心波长。从图1可以看出,激光器的光谱宽度窄于光纤光栅,且位于光纤光栅反射光谱的线性区,当声信号使光栅中心波长漂移时,光纤光栅的反射光强(图中二者光谱的重叠区域)发生变化。当反射光进入光电探测器转化为电信号,就完成了声信号到电信号的转变。

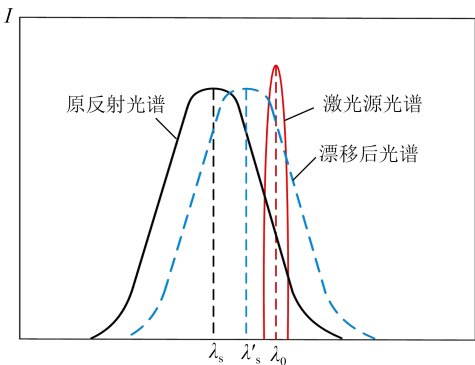


图1 线性边缘滤波原理图

Fig.1 Linear edge filtering schematic diagram

1.2.2 温度干扰抑制

当传感器安装于变压器内部时,受环境温度影响,光纤光栅的中心波长会发生漂移。然而,声波信号处于 kHz 频段,变压器内温度变化频率通常低于 0.01 Hz,二者在频谱上完全分离,温度不会对感知声信号产生干扰。此外,运行经验表明,变压器稳态油温一般保持在 40~90℃ 范围内,短时波动幅度有限,温度导致的中心波长漂移远小于光纤光栅 200~300 pm 的典型 3 dB 带宽,不足以使工作点偏离有效带宽或显著降低灵敏度。因此,所研光纤光栅传感器本身具有较强的温度干扰抑制能力。

1.2.3 传感器组成

图2为光纤光栅传感器整体结构的示意图。

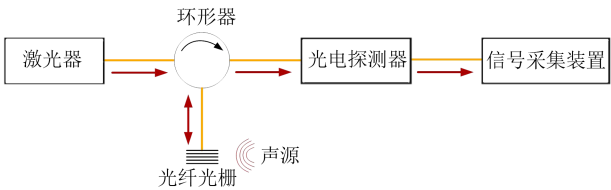


图2 光纤光栅传感器整体结构

Fig.2 Overall structure of fiber Bragg grating sensor

从图2可以看出,传感器主要由激光器、环形器、光电探测器、光纤光栅以及信号采集装置组成。激光器发出的光经环形器传输至光纤光栅,经反射后进入光电探测器转换为电压信号,最后由信号采

集装置进行采集。

传感系统所用激光器工作波长为 1 550 nm,输出光功率为 0~20 mW 可调。采用的光电探测器最大输出电压可达到 10 V,增益最大为 70 dB,可根据声信号的测量需要灵活调节。信号采集装置选用 Keysight DSOX2022A 型示波器,满足声信号采集要求。

光纤光栅栅区长度、反射率等参数对传感器性能影响显著。为获得较高的灵敏度和信噪比,选用栅区长度为 10 mm、反射率为 92% 的光纤光栅。结合线性边缘滤波原理及器件参数计算,传感系统最大波长灵敏度约为 0.032 V/pm,理论频率测量范围为 5~60 kHz,可实现对局部放电可听声与超声信号的宽频带测量。

2 传感器性能测试

2.1 传感器的灵敏度

对光纤光栅传感器的灵敏度及温度抗干扰能力进行测试。通过测定光纤光栅传感器与已知灵敏度的压电式声传感器(型号为 G40)对同一声信号的平均响应幅值,再经式(2)计算即可得到所研制光纤光栅传感器的相对标准灵敏度。

$$R_1(f_m) = 20\lg\left(\frac{S_1'(f_m)}{S_2'(f_m)}\right) + R_2(f_m) \tag{2}$$

式(2)中: $R_1(f_m)$ 、 $R_2(f_m)$ 分别表示光纤光栅传感器的灵敏度和 G40 声传感器的标准灵敏度; $S_1'(f_m)$ 、 $S_2'(f_m)$ 分别表示光纤光栅传感器和 G40 声传感器所测电压幅值。

G40 声传感器性能参数如表 1 所示。通过加热控制平台分别将光纤光栅传感器温度逐渐升高至 40、80、120℃ 3 个温度点进行分析,得到如图 3 所示灵敏度响应曲线。

表1 G40 声传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of G40 acoustic sensor					
谐振频率/kHz	频率范围/kHz	灵敏度峰值/dB	尺寸/mm	外壳材料	接收面材料
40	15~70	81	2×36.8	SUS-304	陶瓷

从图3可以看出,在 40、80、120℃ 3 个温度下,光纤光栅传感器灵敏度较大的频带均集中在 22~46 kHz 范围内,在此频带中传感器最大灵敏度均大于 75 dB,对于 60 kHz 以上频段灵敏度呈下降趋势。随着温度的升高,传感器灵敏度并未出现明显变

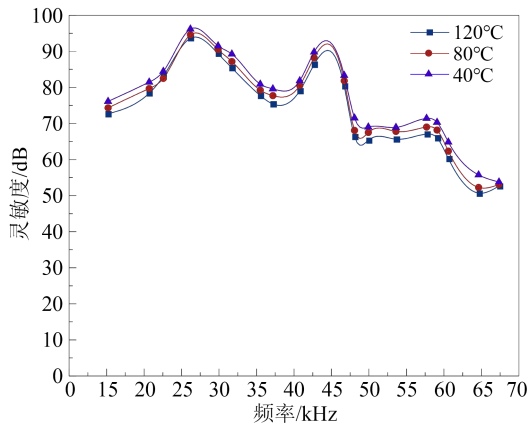


图3 光纤光栅传感器灵敏度响应曲线
Fig.3 Sensitivity response curves of fiber Bragg grating sensor

化,相较40℃下的灵敏度,80℃下灵敏度平均下降了2.98%,120℃下灵敏度平均下降了5.23%。结合表1可知,与现有G40声传感器相比,所研光纤光栅传感器具有更高的灵敏度。同时其受温度影响较小,这使得它可以适应变压器内部运行温度的变化。

光纤光栅传感器在40、80、120℃下灵敏度的峰值分别为96.2、94.6、93.6 dB,均值分别为77.4、75.3、74.1 dB,均高于行业标准中对声传感器灵敏度的规定(峰值≥60 dB,均值≥40 dB)^[28]。因此,尽管传感器在不同频率和温度下灵敏度存在一定波动,但其仍满足局部放电声信号在线监测的需求。此外,高压放电参数变化波动大于传感器灵敏度的波动,因此对后续试验影响很小。

2.2 传感器在绝缘油中的长期稳定性

将KI25型克拉玛依变压器油首先置于85℃、100 Pa的真空干燥箱中24 h,再置于常温、100 Pa的真空干燥箱中24 h,变压器油完成初步处理。之后取出600 mL油样两份,其中一份放入12根长度为1 m的光纤光栅传感器,另外一份不放。然后将含光纤传感器和不含光纤传感器的变压器油样品置于鼓风干燥箱中,在温度为100℃的条件下进行为期200 h的加速老化试验。老化结束后,分别测试油样的含水量和介质损耗因数,并取其平均值作为评价老化程度的指标,结果如表2所示。由表2可以看出,变压器油在老化前后其含水率与介质损耗因数均出现明显变化。进一步比较含光纤传感器与不含光纤传感器的样品发现,两类油样在老化前后的性能指标差异甚微。基于试验结果可以判断:

光纤传感器的引入并未对变压器油的性质造成影响,表明光纤光栅传感器在变压器油中具有良好的适应性与相容性。图4为光纤光栅传感器老化前后声信号响应灵敏度对比。从图4可以看出,老化前后光纤光栅传感器的响应灵敏度无明显差别,老化后相比老化前的灵敏度平均下降了2.09%,可以认为老化试验前后光纤光栅传感器的性能几乎无变化,验证了所研传感器与变压器油之间良好的长期相容性。

表2 变压器油各项指标测量结果
Table 2 Measurement results of transformer oil index

试验条件	含水量/(mg/L)	介质损耗因数/%
老化前	5.11	0.319
老化后	无光纤传感器	8.06
	有光纤传感器	8.21

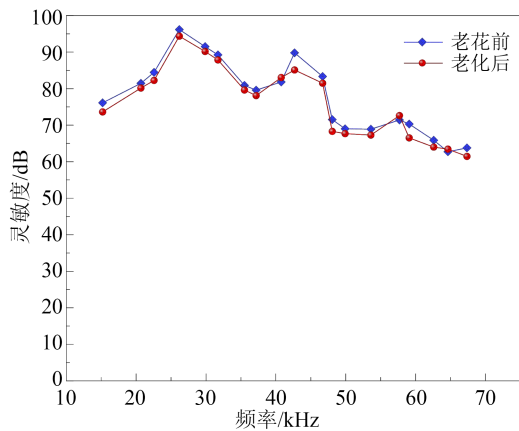


图4 光纤光栅传感器老化前后的灵敏度对比
Fig.4 Comparison of the sensitivity of fiber Bragg grating sensors before and after ageing

3 变压器油中放电声信号特征分析

为验证所研制光纤光栅传感器对变压器内部放电监测的可行性,利用可听声传感器、超声传感器和所研制光纤光栅传感器三者同时进行变压器油中放电发展过程中声信号的测量。

3.1 试验设备与试验平台

图5(a)和图5(b)分别为变压器油放电声信号感知试验平台的整体结构和所用柱-柱电极放电模型。试验平台由电源装置、放电模型以及声传感系统组成。其中,工频无晕试验变压器型号为YDTW-15/150,额定电压为150/0.22 kV,额定电流为0.1/68.2 A,额定功率为15 kVA;保护电阻阻值为10 kΩ;与试验腔体并联的高压电容器电容值为300

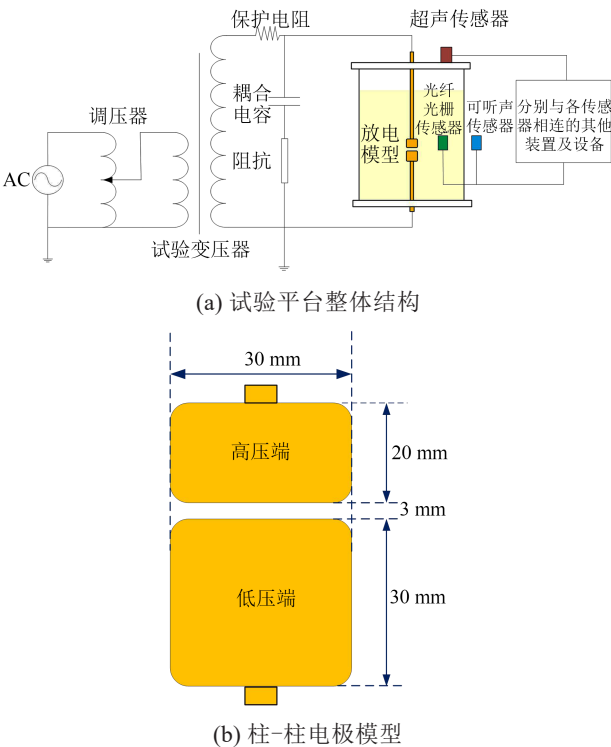


图5 变压器油中放电声信号感知试验平台

Fig.5 Experimental platform for detection of acoustic signals from internal transformer discharges

pF。电源装置在 150 kV 电压下放电可稳定控制在 3 pC 以下。试验腔体由有机玻璃制成，高为 30 cm，内、外径分别为 16 cm 和 20 cm。本文选用的放电模型为柱-柱电极模型，油隙长度约为 3 mm。

试验所用的 KI25 型变压器油提前经过过滤、干燥处理，处理后其微水含量 $\leq 10\text{ mg/L}$ ，含气量 $\leq 1\%$ 。将光纤光栅传感器置于试验腔体内部并浸入油中，与电极间的距离约为 5 cm。超声传感器安装在试验腔体外壁且位于光纤光栅传感器的正上方，使用超声耦合剂与腔体上表面耦合。可听声传感器距腔体外壁约 8 cm。为减小声信号传播过程中衰减的影响，试验中放电模型与光纤光栅传感器、可听声传感器处于同一水平位置。采用阶梯升压法每 1 min 升高电压 2 kV 直至出现明显的火花放电现象。

本文所用可听声传感器和超声传感器为麦克风和压电陶瓷超声传感器，二者的性能参数如表 3 所示。试验中，光纤光栅传感器的光电探测器的增益设为 30 dB。

3.2 试验结果分析

试验过程中，随着外施电压的逐渐增大，会听到明显的放电声，在油中可观察到明显的火花，属于典型的油中火花放电特征。试验过程中观察到

表3 可听声传感器与超声传感器性能参数

Table 3 Performance parameters of audible sensors and ultrasonic sensors

传感器类型	采样频率/kHz	频率范围/kHz	灵敏度/dB
可听声传感器	48	0.020~20	13
超声传感器	—	15~70	峰值>75

光纤光栅传感器输出电压信号的本底噪声幅值约为 10 mV，为确保信号识别的可靠性，将信号幅值达到本底噪声幅值的 2 倍以上作为有效信号的判据。因此，当光纤光栅传感器输出电压幅值为 25 mV 时，记录 3 种声传感器的时域波形后通过傅里叶变换得到其频域波形，结果如图 6 所示。

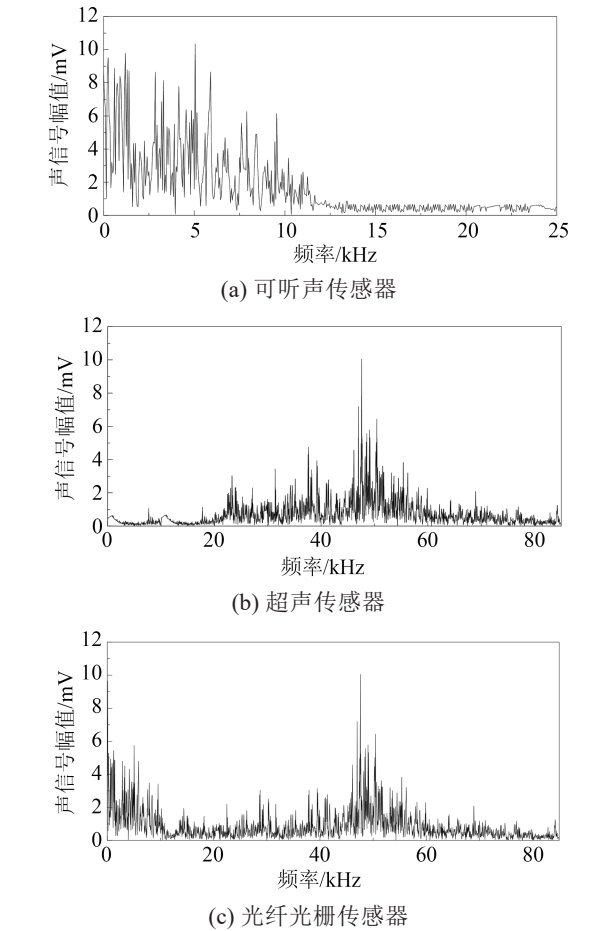


图6 3种传感器所测声信号频域波形图

Fig.6 The frequency-domain waveform diagrams of acoustic signals measured by three sensors

从图 6(a)可以看出，火花放电可听声信号主要分布在 0~10 kHz 频率范围内，在频率为 11.6 kHz 以上时，可听声信号的分量强度显著减弱。从图 6(b)可以看出，火花放电时测得的超声信号的频带主要分布在 40~60 kHz 范围内。从图 6(c)可以看出，

光纤光栅传感器测得的火花放电声信号的频带主要分布在0~10 kHz和40~60 kHz,监测到的声信号频带范围与可听声传感器和超声传感器所测声信号的频带范围基本吻合,验证了所研制光纤光栅传感器对放电所产生可听声与超声信号同时感知的可行性。

3.3 放电不同阶段声信号典型特征分析

图7为利用所研制光纤光栅传感器测量的交流电压下柱-柱电极放电前期、中期和后期3个阶段的声信号典型频谱特征。

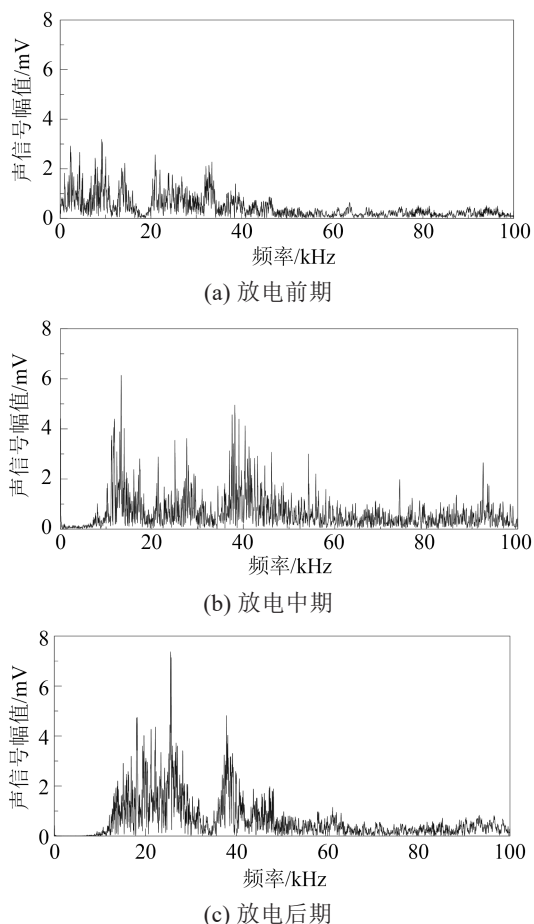


图7 放电不同阶段的声信号频域波形图

Fig.7 The frequency domain waveform of acoustic signals at different stages of discharge

从图7可以看出,在柱-柱电极放电前期,声信号频率主要分布在0~40 kHz范围内,以可听声与低频超声为主,此时整体放电幅值较小;在柱-柱电极放电中期,随着电压幅值增大和耐压时间增加,放电稳定发展,此时放电声信号频率主要分布在10~60 kHz范围内,声信号幅值明显增大;在柱-柱电极放电后期,放电声信号频率主要分布在20~60

kHz范围内,与放电中期相比声信号幅值进一步增大。对于可听声而言,在10~20 kHz区间内也有少量分布,而10 kHz以下的可听声信号几乎消失。

上述放电的3个阶段是依据时域声信号幅值增长斜率来划分的,声信号幅值增长斜率 s_k 由式(3)计算。

$$s_k = \frac{A(t_{k+1}) - A(t_{k-1})}{t_{k+1} - t_{k-1}} \quad (3)$$

式(3)中: A 为时域声信号的幅值; t_k 为第 k 个采样点的时间。

图8为交流电压下柱-柱电极放电发展过程中声信号的频域重心与能量占比随时间的演变趋势。其中,频域重心是指声信号在频域中能量分布的加权平均位置,反映了声信号在频域中能量分布的集中趋势。设信号 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(f)$,其幅度谱为 $|X(f)|$,则频域重心 f_c 可由式(4)表示。

$$f_c = \frac{\int_0^\infty f \cdot |X(f)| df}{\int_0^\infty |X(f)| df} \quad (4)$$

式(4)中:分子表示频率 f 与其对应幅值的加权和;分母表示全频段的总幅度。

能量占比 E_s 是指频率为0~20 kHz可听声信号能量(E_{0-20k})与20~60 kHz超声信号能量(E_{20-60k})的比值,可由式(5)表示。

$$E_s = \frac{E_{0-20k}}{E_{20-60k}} \quad (5)$$

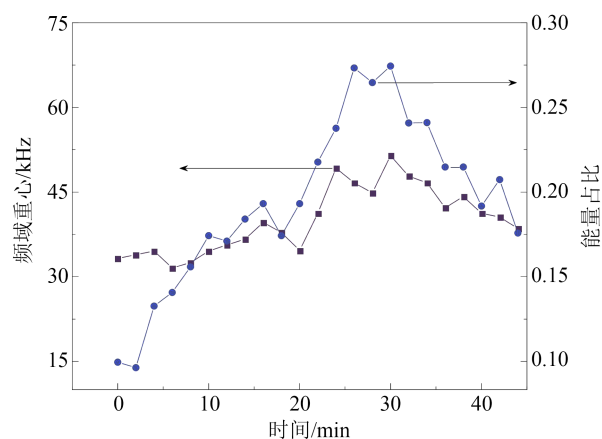


图8 频域重心与能量占比随时间的变化规律

Fig.8 Change laws of frequency domain center of gravity and energy ratio with time

从图8可以看出,在0~20 min时间段内频域重心均在40 kHz以下且缓慢上升,说明在0~20 min

内声信号主频较低,此时可听声能量占比较小但整体呈现上升趋势。这一阶段放电尚未充分发展,放电能量较小,产生的声信号主要由局部的电场变化和少量的气体电离引起,因此声信号的频率集中在低频段。

随着放电的发展,在20~30 min时间段内频域重心呈现快速增长,说明声信号的频谱范围逐渐拓宽,声信号主频向高频段方向偏移。在此时间段内可听声能量占比激增,说明可听声信号能量增强,这与试验过程中人耳明显听到放电声音的现象吻合。在这一阶段,放电能量的增加,导致气体电离和振动加剧,声信号幅值增大,虽然同时引入了更多的高频分量,声信号频谱范围变宽,但是可听声能量占比增大,出现明显的可听声信号。

在30~44 min时间段内能量占比快速下降且频域重心略微下降,说明在放电后期声信号频谱主要集中在超声频段,可听声能量逐渐降低。此时,放电进入相对稳定的阶段,不同频率范围内的放电能量更加均匀。

4 真型变压器放电声信号感知试验

4.1 传感器安装与放电缺陷布置

在前文的探究中利用局部放电试验证明了光纤光栅传感器用于放电声信号监测的可行性。然而,变压器内部结构复杂,势必会对放电产生的声信号产生阻挡和衰减作用。因此将光纤光栅传感器置于 ± 400 kV真型换流变压器中,同时在变压器内部设置放电缺陷,获得声信号特征的同时验证传感器用于变压器内部放电声信号监测的可行性。

± 400 kV换流变压器上放电缺陷与传感器布置情况如图9所示。其中,针-板放电缺陷布置在换流变压器升高座处,如图9(a)所示。光纤光栅传感器通过安装在变压器侧壁上的贯通器布置在变压器内部,同时借助贯通器将光信号引出,布置光纤光栅传感器的贯通器如图9(b)所示。传感器距离放电缺陷的位置约为7.5 m。由于已在实验室中探究了稍不均匀场的柱-柱电极放电声信号特征,因此在变压器中采用如图9(c)所示极不均匀场的针-板缺陷模型进行放电模拟试验。同时可模拟实际变压器在制造、运输、安装和运行过程中出现局部缺陷导致变压器油中发生放电的情况。

4.2 时频域信号分析

采用阶梯升压法对变压器内部针-板缺陷放电

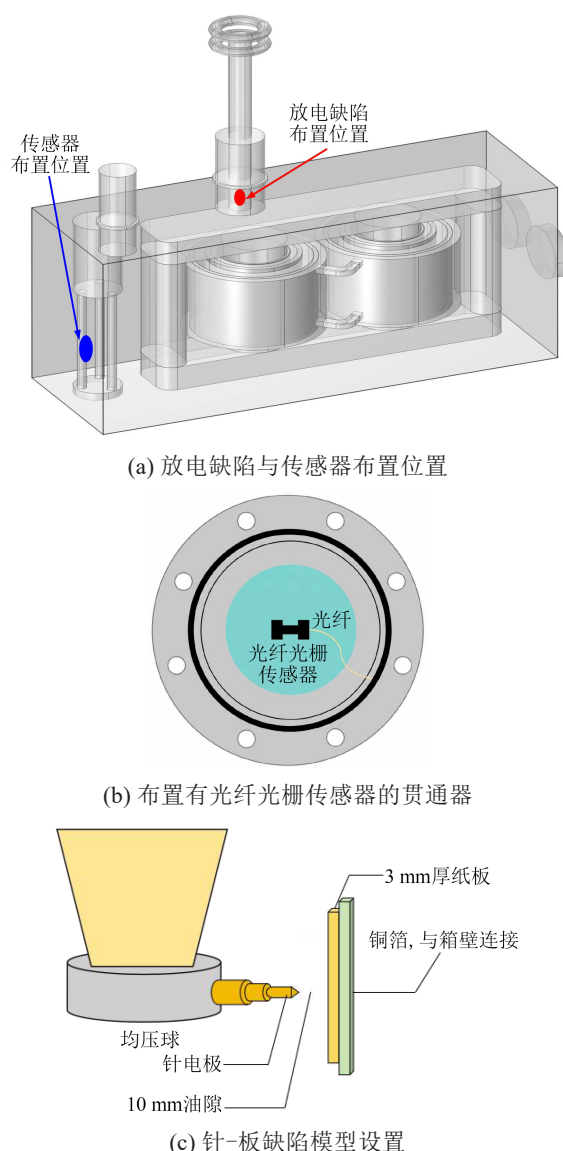


图9 变压器内部放电缺陷与传感器布置情况
Fig.9 Internal discharge defects and sensor layouts of transformer

声信号进行测试,升压间隔5 min,每次升压2 kV。试验中某次放电时传感器所测声信号时域波形及对应的频域波形如图10所示。从图10可以看出,本文研制的光纤光栅传感器时域信号具有较高的信噪比,对应的频域信号主频范围为5~60 kHz。在变压器中检测到的频带范围与实验室所测频带范围一致,进一步验证了所研光纤光栅传感器的声信号监测能力。

试验过程中光纤光栅传感器所测得时域声信号的最大幅值变化规律如图11所示。根据图11的结果,可将整个过程声信号变化分为无放电、微小能量放电、低能量放电、高能量放电4个阶段。在放

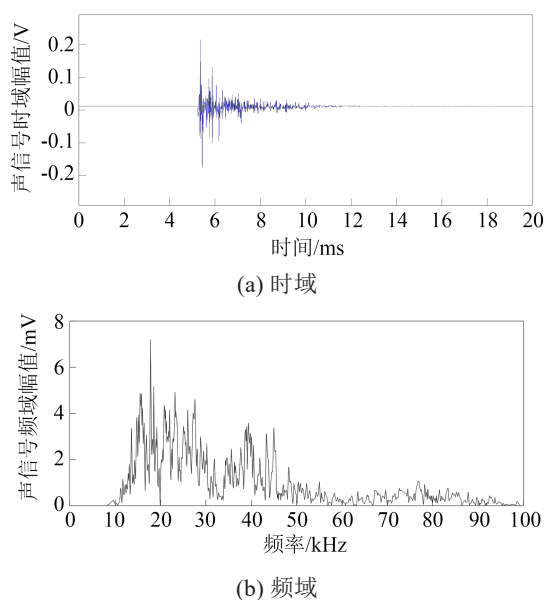


图10 光纤光栅传感器所测时域与频域波形

Fig.10 The time-domain and frequency-domain waveforms measured by the fiber Bragg sensor

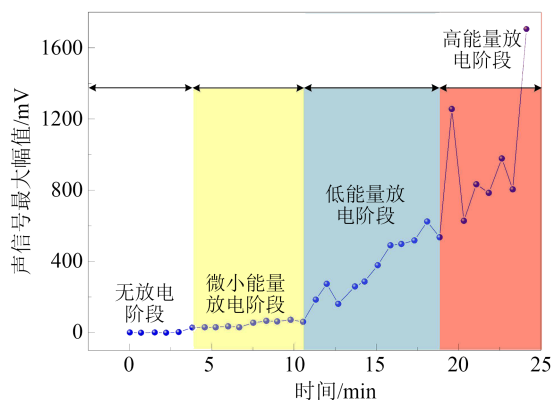


图11 光纤光栅传感器所测声信号最大幅值

Fig.11 The maximum amplitude value of the acoustic signal measured by the fiber Bragg sensor

电的3个阶段里,声信号最大幅值呈现缓慢增大-增大速度加快-激增的现象。在微小能量放电阶段,声信号最大幅值整体较小;在低能量放电阶段,声信号最大幅值整体呈现增大趋势且增长速度加快;在高能量放电阶段最大幅值出现激增,并且在击穿前出现声信号幅值回落的现象,紧接着在临近击穿前夕达到最大值。试验结果表明,所研制光纤光栅传感器可内置于大型变压器中且可实现对放电声信号的灵敏监测。

5 结论

本文提出了一种变压器内置式可听声-超声信号的光学感知方法,同时研究了变压器油放电的声

信号特征,主要结论如下:

(1)设计了基于光纤光栅的声传感器,测量频带范围为5~60 kHz,频率响应范围覆盖了可听声与超声信号,同时该传感器几乎不受温度的影响,且在变压器油环境中具有良好的适应性与相容性。

(2)变压器油中柱-柱电极放电的主频带在0~10 kHz和40~60 kHz范围内。在放电发展过程中,可听声-超声信号的频域重心逐渐增大然后减小,可听声能量占比在放电前期和中期持续增大,放电后期减小。

(3)在 ± 400 kV 真型换流变压器内部进行了放电声信号感知试验,根据时域声信号最大幅值将放电过程划分为微小能量放电,低能量放电及高能量放电3个阶段。同时验证了光栅光纤声传感器对变压器内放电声信号监测的有效性。

参考文献 References

- [1] 朱超杰. 基于真型变压器的局部放电研究[D]. 上海:上海交通大学,2013:10-11.
Zhu Chaojie. Study on partial discharge inside true-size transformer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2013:10-11.
- [2] 程述一,律方成,谢庆,等. 基于暂态对地电压和超声阵列信号的变压器局放定位方法[J]. 电工技术学报,2012,27(4):255-262.
Cheng Shuyi, Lü Fangcheng, Xie Qing, et al. Study of partial discharge locating method in transformer based on transient earth voltage and ultrasonic array signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(4):255-262.
- [3] 陈丽娟,李霞. 2011年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2012,45(7):89-93.
Chen Lijuan, Li Xia. Reliability analysis of national power transmission and transformation facilities in 2011[J]. Electric Power, 2012,45(7):89-93.
- [4] 邓雯瀚,苗宇,许逸,等. 电力变压器状态评估方法的应用及展望[J]. 智慧电力,2023,51(10):93-102.
Deng Wenhan, Miao Yu, Xu Kui, et al. Application and prospect of condition assessment method of power transformer[J]. Smart Power,2023,51(10):93-102.
- [5] 张若泉,冉慧娟,谢军,等. 基于动态多模态融合的电力变压器故障诊断方法[J]. 绝缘材料,2025,58(5):107-115.
Zhang Ruquan, Ran Huijuan, Xie Jun, et al. A fault diagnosis method based on dynamic multimodal fusion for power transformer [J]. Insulating Materials,2025,58(5):107-115.
- [6] Working Group A2. 33. Guide for transformer fire safety practices [R]. Paris, France: CIGRE,2013:32-61.
- [7] 刘光伟,关宇,董明,等. 变压器匝间故障特性与检测研究进展[J]. 绝缘材料,2023,56(11):7-15.
Liu Guangwei, Guan Yu, Dong Ming, et al. Research progress in characteristics and detection of transformer interturn fault[J]. Insulating Materials,2023,56(11):7-15.
- [8] 金显贺,朱德恒,谈克雄. 电力变压器绝缘局部放电的声发射频谱[J]. 电工技术学报,1989(4):40-45.

- Jin Xianhe, Zhu Deheng, Tan Kexiong. The frequency spectra of acoustic emission during partial discharge in power transformer insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1989(4):40-45.
- [9] 张瑞琪. 基于声学信号的变压器放电故障诊断方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018:27-39.
- Zhang Ruiqi. Research on transformer fault diagnosis method based on acoustic sign[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2018:27-39.
- [10] 冯婷娜. 模拟变压器内部油纸绝缘缺陷局部放电可听声信号频谱特征研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021:24-36.
- Feng Tingna. Research on frequency spectrum characteristics of partial discharge audible sound signal in simulating oil-paper insulation defects in transformer[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2021:24-36.
- [11] 孙廷玺,陈浩,钱森,等. 光纤传感技术在局部放电检测的研究进展[J]. 高压电器,2018,54(11):1-8.
- Sun Tingxi, Chen Hao, Qian Sen, et al. Progress of fiber optic sensor in partial discharge detection for power cables[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(11):1-8.
- [12] 侯喆. 变压器内部电弧放电声光纤传感器研制及声纹特征研究[D]. 北京:华北电力大学,2022:5-7.
- Hou Zhe. Research on optical fiber acoustic sensor for arc discharge in power transformer and its voiceprint feature[D]. Beijing: North China Electric Power University,2022:5-7.
- [13] Qiao J X, Zhang W C, Chen Q C, et al. DFB-FL applied in the liquid-solid composite dielectric for ultra-high sensitive partial discharge acoustic emission detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21(18):20960-20968.
- [14] Fomitchov P, Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor,2003,42(4):956-963.
- [15] 马宾,徐健. 一种用于变压器局部放电在线监测的光纤声发射传感器实验研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(7):2273-2277.
- Ma Bin, Xu Jian. Study of fiber-optic acoustic emission sensor for partial discharges detection in power transformer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37(7):2273-2277.
- [16] 虞若雨. 光纤光栅水听器研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019:35-42.
- Yu Ruoyu. Research on hydrophone based on fiber Bragg grating[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2019:35-42.
- [17] 朱涛,陈理,沈煜,等. 真型变压器中典型悬浮缺陷的局部放电特征[J]. 高压电器,2025,61(1):173-180.
- Zhu Tao, Chen Li, Shen Yu, et al. Partial discharge characteristics of typical floating defects in full-size power transformer[J]. High Voltage Apparatus,2025,61(1):173-180.
- [18] 秦少瑞,王彦博,丁国成,等. 一种新的电力变压器超声局部放电定位方法研究[J]. 绝缘材料,2019,52(2):74-80,86.
- Qin Shaorui, Wang Yanbo, Ding Guocheng, et al. A novel ultrasonic localization method of partial discharge in power transformers[J]. Insulating Materials,2019,52(2):74-80,86.
- [19] 吕昊民,郑玉平,潘书燕,等. 变压器缺陷发展过程中可见光与可闻声信号的特征规律及联合判据[J]. 现代电力,2024,41(5):994-1000.
- Lü Haomin, Zheng Yuping, Pan Shuyan, et al. Characteristics and joint criteria of visible light and audible sound signals during the development of transformer defects[J]. Modern Electric Power,2024,41(5):994-1000.
- [20] 史荣斌,王思涵,马国明,等. 基于声聚焦结构的局部放电光纤超声传感技术[J]. 中国电机工程学报,2023,43(21):8518-8527.
- Shi Rongbin, Wang Sihan, Ma Guoming, et al. Optical fiber ultrasonic sensing for partial discharge based on acoustic focusing structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8518-8527.
- [21] 王浩宇. 基于光纤超声传感的局部放电检测研究[D]. 大连:大连理工大学,2022:60-75.
- Wang Haoyu. Research on partial discharge detection based on optical fiber ultrasonic sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2022:60-75.
- [22] 邢超,乔辉,田源,等. 基于声光调制及RF相位检波的光纤干涉型局部放电超声传感方法研究[J]. 高压电器,2025,61(3):152-159.
- Xing Chao, Qiao Hui, Tian Yuan, et al. Study on fiber interferometric partial discharge ultrasonic sensing method based on acoustic-optic modulation and RF phase detection[J]. High Voltage Apparatus,2025,61(3):152-159.
- [23] Sikorski W, Ziomek W. Detection, recognition and location of partial discharge sources using acoustic emission method[M]. Berlin: Acoustic Emission,2017.
- [24] Minardo A, Cusano A, Bernini R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2):304-312.
- [25] Posada-Roman J E, Garcia-Souto J A, Serrano J R, et al. Multi-channel ultrasound instrumentation for on-line monitoring of power transformers with internal fiber optic sensors[C]//2013 IEEE International and Measurement Technology Conference. 2013:200-205.
- [26] Wu Q, Okabe Y, Yu F M. Ultrasonic structural health monitoring using fiber Bragg grating[J]. Sensors,2018,18(10):3395.
- [27] 姬彤. 基于光纤光栅感知的变压器内部电弧放电声纹特征研究[D]. 北京:华北电力大学,2023:12-16.
- Ji Tong. Research on the characteristics of arc discharge voiceprint in transformer based on fiber grating sensing[D]. Beijing: North China Electric Power University,2023:12-16.
- [28] T/CEC 555—2021:局部放电超声波监测仪技术规范[S].
- T/CEC 555—2021:Technical specifications for partial discharge ultrasonic detector[S].

收稿日期:2025-06-27;修回日期:2025-11-12。

作者简介:

任彬(1990—),男(汉族),山西运城人,高级工程师,主要从事柔性直流输电与新型电力系统研究;

通信作者:黄猛(1988—),男(汉族),湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事电气设备在线监测与故障诊断研究。