

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.07.022

空间电容耦合法测量局部放电信号的 波形及能量分布特性分析

吴旭涛¹, 周 秀¹, 周童浩², 田 天¹, 汲胜昌², 罗 艳¹,
李秀广¹, 马云龙¹

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750001; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室,
西安 710049)

摘要:文中基于空间电容耦合法制作了非接触式局部放电传感器,并利用4种典型的绝缘油纸缺陷模型,搭建了局部放电实验平台,探究了所制作的传感器与传统脉冲电流法测量到的局部放电时域波形和频域能量分布特性。实验结果表明:利用空间电容耦合法可有效获取绝缘油纸缺陷模型的局部放电信号。传统脉冲电流法测量频带较低,4种缺陷模型中,仅可有效分辨出含强垂直分量的沿面针板放电信号,其他3种缺陷模型放电信号的时域波形和频域能量分布特性较为接近,无法有效分辨。而文中制作的局放传感器测量频带可达数百兆赫兹,测得的信号高频信息量含量较为丰富,利用信号的时域波形或频域能量分布特性均可实现对不同缺陷模型放电的识别,为利用空间电容耦合方法测量电力变压器局部放电及进行放电模式识别提供了研究基础。

关键词:局部放电;空间电容耦合法;波形分析;能量分布特性;在线监测

Analysis of Waveform and Energy Distribution of Partial Discharge Signal Measured by Spatial Capacitor Coupling Method

WU Xutao¹, ZHOU Xiu¹, ZHOU Tonghao², TIAN Tian¹, JI Shengchang², LUO Yan¹,
LI Xiuguang¹, MA Yunlong¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company Limited, Yinchuan 750001, China; 2. State Key
Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the non-contact PD sensor based on the spatial capacitive coupling method is made. The PD experimental platform by using four typical defect models of insulating oil-paper is set up and the time domain waveform and frequency domain energy distribution characteristics of PD measured by the sensor and the traditional pulse current method are investigated. The experimental results show that the use of spatial capacitance coupling method can effectively obtain the PD signal of the defect model of insulation oil paper. The traditional pulse current method has a low measurement frequency band. Among the four defect models, only the surface discharge signal with strong vertical component under the needle-plate electrode can be effectively distinguished, while the discharge signals of the other three defect models have similar time-domain waveform and frequent-domain energy distribution characteristics and thus cannot be effectively distinguished. While, the measurement frequency band of the PD sensor made in this paper can reach hundreds of megahertz, and the measured signal has abundant high-frequency information. The discharge identification of different defect models can be realized by using the time-domain waveform or frequency-domain energy distribution characteristics, which provides a research basis for measuring PD signal of power

收稿日期:2022-03-15; 修回日期:2022-05-20

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2020BDE13033);宁夏电力有限公司科技项目(5229DK190051)。

Project Supported by Key R & D Program of Ningxia Hui Autonomous Region(2020BDE13033), State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.(5229DK190051).

transformer and discharge pattern recognition by using spatial capacitance coupling method.

Key words: partial discharge; spatial capacitance coupling method; waveform analysis; energy distribution characteristics; on-line monitoring

0 引言

局部放电是绝缘局部区域的微小击穿,是绝缘劣化的初始现象^[1-2]。一旦介质中出现局部放电,通过对其周围绝缘介质不断侵蚀,最终会导致整个绝缘系统的失效^[3]。对局部放电的在线监测和分析是评估电力设备绝缘状况的重要手段之一。其中局部放电信号的波形及频谱特性对于分析发电机、变压器绕组中脉冲放电的规律及进行放电模式识别具有重要价值^[4-7]。

电力设备发生局部放电时,伴随放电的产生会发生一系列物理及化学现象,因此针对不同的物理及化学现象对局部放电进行检测的方法也大致分为电测量法以及非电测量法,典型的例如超声波检测法、温度检测法等都属于非电测量法;而目前实际工程中使用较多的局放检测方法主要有脉冲电流法、特高频法、电容耦合法等电测量方法^[8-13]。电测量法由于检测灵敏度高,信号频谱含量丰富,能对故障类型进行有效识别并通过局部放电量评估绝缘缺陷程度,所以实际应用更为广泛。但脉冲电流法存在测量频率低、频带较窄、信息量相对较少,抗干扰能力较弱和不能确定局部放电所在相别等问题^[12-14];特高频(UHF)检测法测量频带较高,可有效抑制外部干扰和提高信噪比,但传感器外置于变压器时,在检测点处释放出的特高频信号较原始信号峰值产生大幅衰减,导致检测灵敏度降低、准确度降低等^[14-18]。而内置传感器需深入变压器油中,对电力变压器的整体结构及安全运行产生了一定的影响,同时对电力变压器的整体设计提出了更高的要求^[19-20]。

而在高压母线安装耦合电容器的电容耦合法最早在20世纪70年代采用在发电机绕组的局部放电检测中^[21],后来加拿大又开发了局部放电分析仪(partial discharge analyzer, PDA),根据内部放电与外部干扰到达两只耦合器的不同时延差来鉴别干扰,取得了较好的效果^[22-25]。PDA式检测方法也可将耦合电容器替换为放置在母线附近的金属平板来耦合甚高频脉冲信号,实现了不与母线接触,通过母线周围空间电磁场耦合获得局部放电信号,具有安全、安装维护简便、易于推广等优点。国内的程养春等人在发电机定子局部放电非接触式传感器与监测方法方面开展了大量研究,取得了显著成果^[26]。

但现有的电容耦合法研究均围绕发电机局部放电展开,其在电力变压器局部放电检测中的应用仍有待研究。文中根据局部放电的机理,制作了基于空间电容耦合法测量局部放电信号的非接触式传感器,针对典型油纸绝缘缺陷,探究了制作的传感器与传统脉冲电流法测量到的局部放电时域波形和频域能量分布特性,为利用空间电容耦合方法测量电力变压器局部放电及进行放电模式识别提供了研究基础。

1 测量原理与传感器设计

1.1 空间电容耦合法测量局部放电的原理

局部放电的机理常用三电容模型来解释,见图1^[27]。

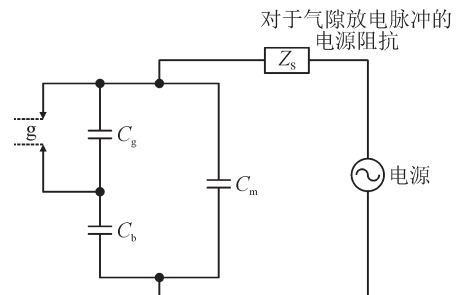


图1 局部放电的三电容等效模型

Fig. 1 Three capacitance equivalent model of partial discharge

图1中: C_g 代表气隙的电容; C_b 是与空气隙串联的电解质的电容; C_m 为除 C_b 、 C_g 以外的绝缘完好部分的电容,一般 $C_m \gg C_g \gg C_b$ 。电容 C_g 由于在较低的电压 U_g 时就开始放电,故等值地用放电间隙 g 与 C_g 并联来表示。

假设电极上施加瞬时值为 u_i 的交流电压,则理论上 C_g 上分到的电压瞬时值为 u_g ,但实际上由于气隙 g 在一个工频周期内多次充放电, C_g 上的电压变化见图2(a)。这样,局部放电将在一个交流周期内多次重复出现。由于气隙放电引起的气隙电压变动将分在 C_b 和 C_m 上, ΔU 为分在 C_m 上的部分,见图2(b)。若能对此 ΔU 进行测量,也即达到了对局部放电信号测量的目的。

1.2 局部放电传感器的设计

为了对局部放电产生的 ΔU 进行测量,文中研制了相应的传感器,其检测原理的示意图见图3。局放传感器的基本原理类似于电容分压器,平行于

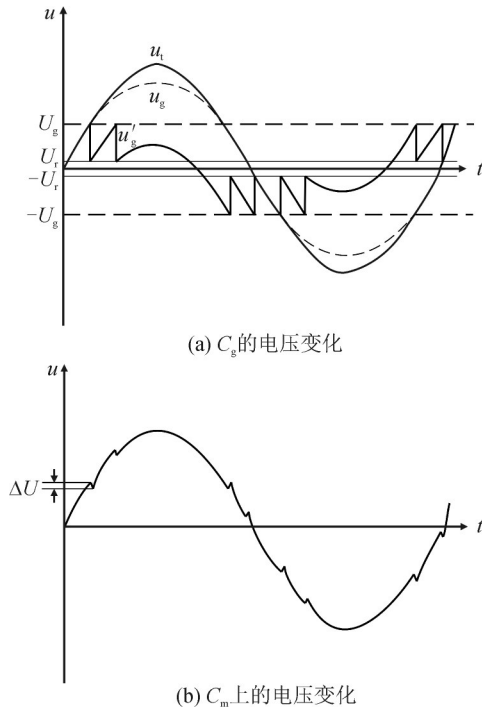


图2 放电时气隙上的电压变化

Fig. 2 Voltage variation in air gap during discharge

高压母线放置一平板电极,两者间形成的耦合电容 C_1 为分压器的高压臂,低压臂电容 C_2 为传感器平板电极与参考地之间的贴片电容,两端并联有电阻 R 。

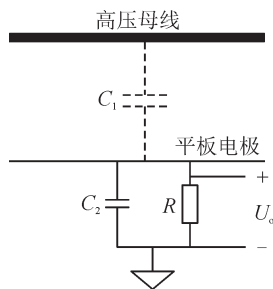


图3 局部放电传感器检测原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PD sensor detection principle

考虑杂散参数时的传感器等效电路图见图4。

其低频截止频率 f_{low} 的计算式为

$$f_{low} = \frac{1}{2\pi R(C_1 + C_2)} \approx \frac{1}{2\pi RC_2} \quad (1)$$

为了得到尽可能高的检测灵敏度,低压臂的输出电压 U_o 应尽量大,这就要求低压臂电容的值应较小。高压母线上的工频电压很高,需要采取措施以降低其对输出信号的干扰。因此需调整电阻 R , 使在工频时, C_2 的容抗远大于电阻 R 的阻值,电阻 R 和耦合电容 C_1 构成分压比极小的分压电路,达到限制工频电压的目的。传感器的高频响应特性主要取决于其杂散电感,对图4所示电路进行分析后可得到两个奇点,对应的谐振角频率 ω_1 和 ω_2 计算式为

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{(L_1 + L_2) C_1 C_2}} \approx \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2) C_1}} \end{cases} \quad (2)$$

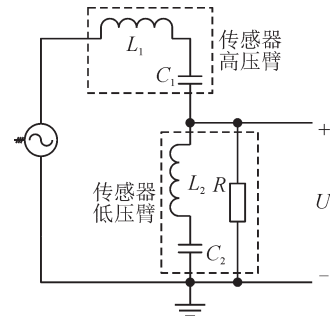


图4 考虑杂散参数时的传感器等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of sensor considering stray parameters

由于 L_1 和 C_1 的值很小,传感器的上限截止频率由 $L_2 C_2$ 决定, $L_2 C_2$ 的值越大,传感器的上限直接频率越低。一般而言, L_2 的值为数个纳亨,文中传感器的 C_2 取值只有数十皮法,因此传感器的上限截止频率可达吉赫兹以上,但实际使用中其上限截止频率要受整个测量系统中的其他设备影响。

最终制作的传感器见图5,选择的低压臂电容 C_2 为 30 pF, 低压臂电阻 R 为 560 Ω , 传感器下限截止频率约为 1 MHz。

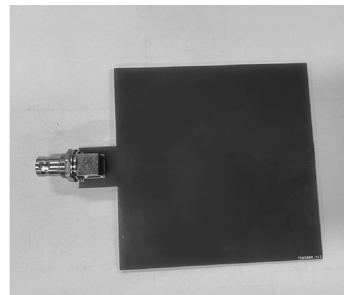


图5 局部放电传感器实物图

Fig. 5 Physical drawing of PD sensor

利用图4所示的等效电路对传感器的幅频响应进行仿真,其中 C_2 取 0.1 pF, L_1 取 0.1 nH, L_2 取 0805 型号电容的典型杂散电感 0.8 nH, 仿真结果见图6。

2 实验测试与结果分析

2.1 局部放电实验模型与平台

为了研究油浸纸板绝缘结构的变压器局部放电,实现对不同放电类型的模式识别,文中采用不同类型的电极构成相应的油纸绝缘缺陷模型。缺陷模型结构见图7,分别为:极不均匀场下无油隙的油纸绝缘模型—无油隙的针板模型;均匀场下无油隙的油纸绝缘模型—无油隙的板板模型;极

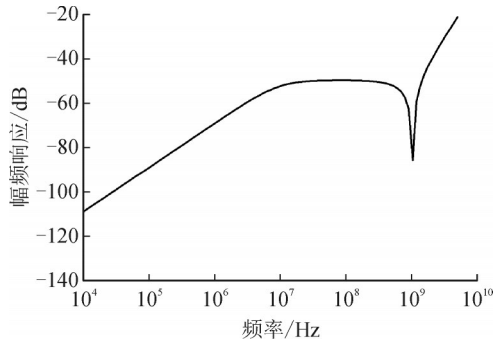


图6 传感器幅频响应仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of amplitude frequency response of sensor

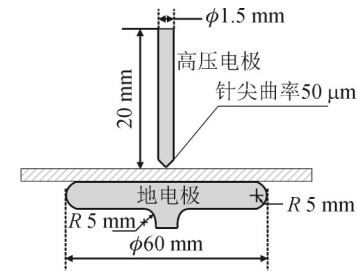
不均匀场下油纸绝缘沿面模型—具有强垂直分量的针板模型与具有弱垂直分量的沿面针板模型。其中绝缘纸板厚度为1 mm,针电极由碳钢制成,针尖曲率半径约为50 mm,其余电极均由黄铜制成。实验中所用的绝缘。绝缘纸板按照 IEC 60641 标准进行了严格的预处理,变压器油也按照 IEC 60422 标准进行了滤除杂质和干燥处理。

以脉冲电流法为基础搭建见的实验平台见图8。图8中,700 pF的耦合电容器与50 W无感电阻构成脉冲电流法检测支路,所制作的局放传感器放置于距试品20 cm处,两者同时连接到Tek DPO4014B示波器对局部放电信号进行采集。

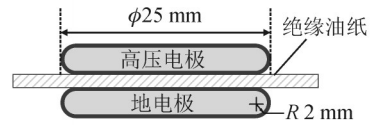
2.2 局部放电的时域波形及分析

实验过程中,通过调压器和无局放变压器为实验模型施加约10 kV交流电压。同时利用脉冲电流法和文中所制作的传感器采集不同缺陷下局部放电时域波形,随机选取其中一组波形见图9。

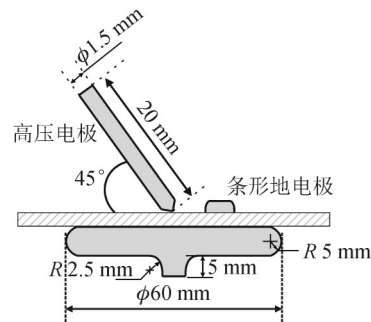
实验结果表明:①对于无油隙针板放电信号而言,脉冲电流法测得的放电波形具有明显的极性且绝大部分存在明显的衰减振荡,衰减过程迅速,脉冲时间一般小于400 ns;局放传感器测得的脉冲波形波头有极为强烈的高频振荡,波形极性可以通过脉冲峰值判断,波形高频成分衰减较快,低频成分衰减较慢,脉冲时间约为脉冲电流法测得的两倍;②对于无油隙板板放电信号而言,脉冲电流法测得的放电波形具有明显的极性,放电波形存在衰减振荡过程且衰减过程较慢,脉冲持续时间较长;局放传感器测得的脉冲波形与脉冲电流法类似,但振荡更为明显,脉冲时间类似;③对于含强垂直分量的沿面针板放电信号而言,脉冲电流法与局放传感器测得的脉冲波形类似,均为带有明显的高频振荡信号,且信号幅值先增大后减小,从波形图可以看出局放传感器测得的波形高频分量更多且脉冲时间更长;④对于含弱垂直分量的沿面针板放电信号而



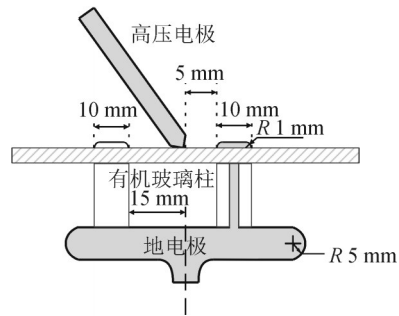
(a) 针板模型



(b) 板板模型



(c) 含强垂直分量的沿面模型



(d) 含弱垂直分量的沿面模型

图7 油纸绝缘局放模型

Fig. 7 Partial discharge models of oil-paper insulation

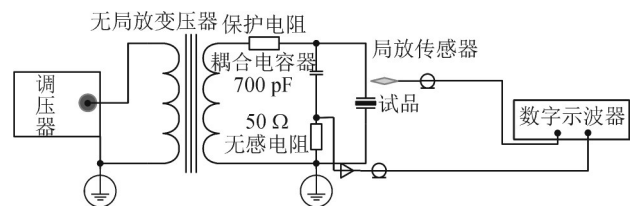


图8 局部放电实验平台

Fig. 8 Partial discharge test platform

言,脉冲电流法测得的放电波形具有明显的极性,放电波形存在衰减振荡过程且衰减过程较慢,脉冲持续时间较长,局放传感器测得的脉冲波形波头具有明显高频振荡,无法分辨脉冲极性,且高频分量衰减极快,而低频分量持续时间较长,整体波形持续时间长于脉冲电流法测得的波形;⑤对于4种缺

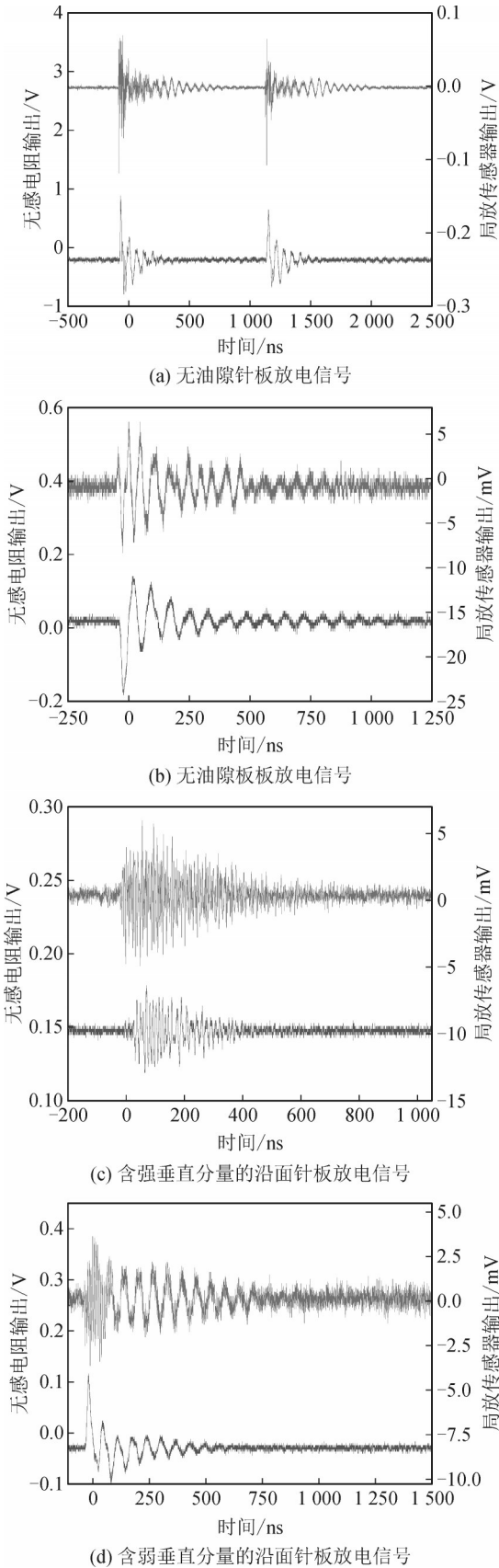


图9 局部放电信号时域波形图

Fig. 9 Time domain waveforms of partial discharge signals

陷下的局部放电信号整体而言,脉冲电流法测得的无油隙针板、无油隙板板和含弱垂直分量的沿面针板放电波形较为类似,而文中制作的局放传感器测得的放电波形则有各自的特征。

2.3 局部放电的频域波形及分析

设一个能量信号 $s(t)$ 的能量为 E , 则此信号的能量由式(3)决定

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt \quad (3)$$

若此信号的傅里叶变换,即频谱密度为 $S(f)$,则由巴塞伐尔(Parseval)定理可得

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df \quad (4)$$

式(4)表明: $|S(f)|^2$ 在频率轴 f 上的积分等于能量信号,所以称 $|S(f)|^2$ 为能量谱密度,它表示在频率 f 处宽度为 df 的频带内的能量信号,或者看作单位频带内的能量信号。相比于频谱密度,能量谱密度更能体现出信号能量的分布规律。对脉冲电流法和文中所制作的传感器采集到的不同缺陷下局部放电信号绘制能量谱密度图见图10,其中左侧图为脉冲电流法,右侧图为局放传感器。

从能量谱密度图可以看出:

1) 脉冲电流法测得的无油隙针板、无油隙板板和含弱垂直分量的沿面针板放电信号的能量谱密度图较为类似,能量谱密度主要集中在 10~20 MHz 之间,50 MHz 以上的能量密度较低;

2) 脉冲电流法测得的含强垂直分量的沿面针板放电信号的能量谱密度主要集中在 50~100 MHz 之间,40 MHz 以下和 100 MHz 以上的能量密度较低;

3) 对于无油隙针板放电而言,局放传感器测得信号的能量除在 100 MHz 内密度较高外,在 100~500 MHz 范围内均有分布,且在其中一些频率点处能量密度较高;

4) 对于无油隙板板放电而言,局放传感器测得的信号能量主要分布与脉冲电流法类似,主要集中在 50 MHz 以内;

5) 对于含强垂直分量的沿面针板放电信号而言,局放信号能量的分布范围与无油隙针板放电类似,但相对于无油隙针板放电,其能量分布更加连续,且分布在 200 MHz 以上的能量比例更高;

6) 对于含弱垂直分量的沿面针板放电信号而言,其能量主要集中分布在 100 MHz 以内,更高频率下能量密度较低且仅分布在较少的频率点处。

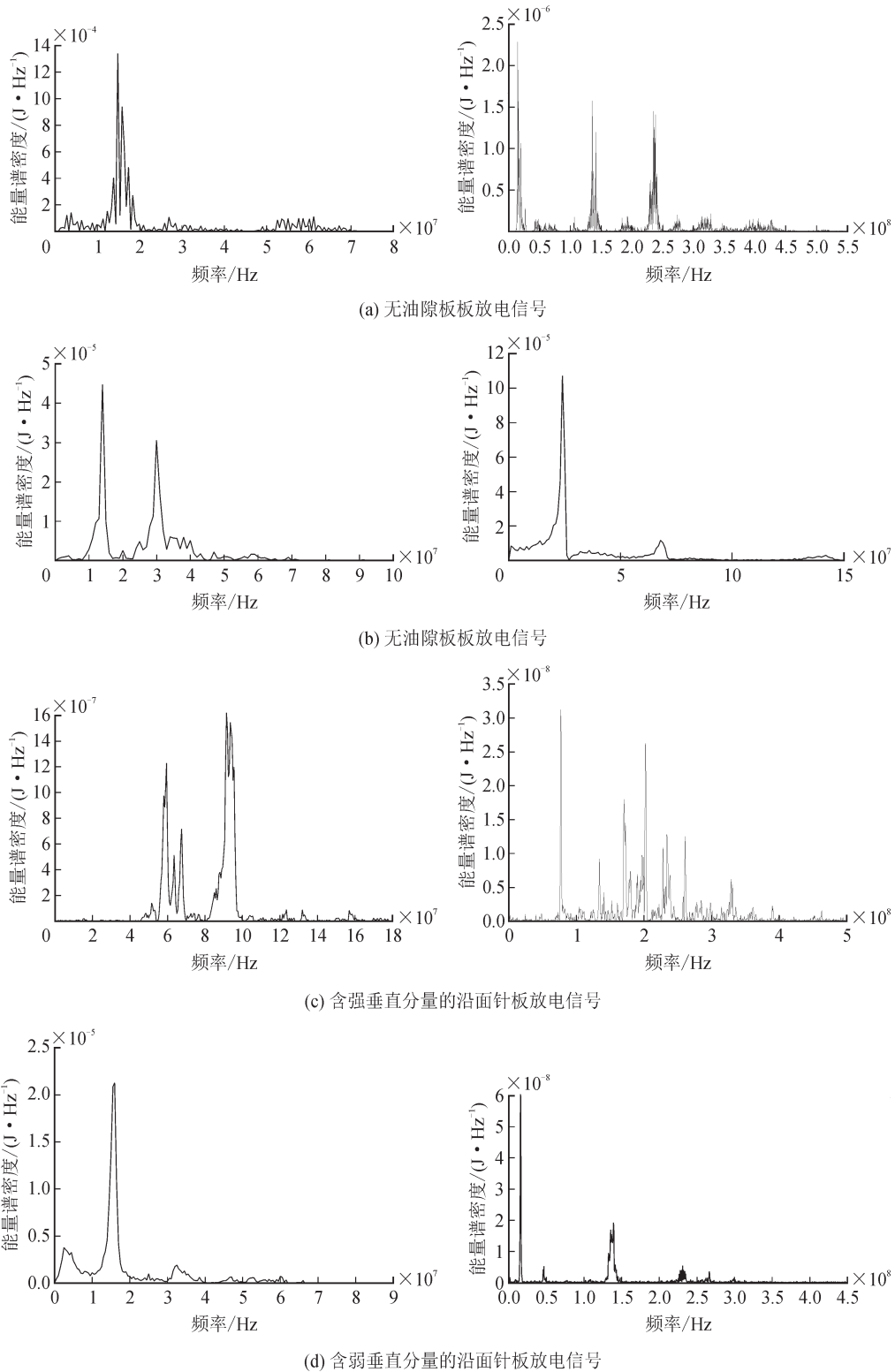


图10 局部放电信号能量谱密度图

Fig. 10 Energy spectrum density diagrams of partial discharge signals

3 结论

文中制作了基于空间电容耦合测量局部放电信号的非接触式传感器,针对4种典型油纸绝缘缺陷,探究了制作的传感器与传统脉冲电流法测量

到的局部放电时域波形和频域能量分布特性,得到的主要结论如下:

1)传统脉冲电流法所测得的无油隙针板、无油隙板板和含弱垂直分量的沿面针板放电信号的时域波形、能量谱密度图较为类似,时域波形具有明

显的极性,且伴随着衰减振荡过程,能量谱密度主要集中在10~20 MHz之间,50 MHz以上的能量密度较低。而含强垂直分量的沿面针板放电信号时域波形带有明显的高频振荡,且信号幅值先增大后减小,能量谱密度主要集中在50~100 MHz之间。

2)文中制作的传感器所测得局部放电时域波形,除无油隙板板缺陷放电外均带有明显的高频振荡成分;从能量谱密度也可以看出,无油隙板板缺陷放电的能量密度主要集中在数十兆赫兹,而其它3种缺陷放电的能量除数十兆赫兹的低频分量外,还存在数百兆赫兹的高频分量,且不同缺陷放电的能量分布具有明显差异。

3)初步验证了空间电容耦合测量绝缘油纸缺陷局部放电的可行性,相比于传统脉冲电流法,此方法具有更高的检测频带,能够有效分辨局部放电缺陷类型。

参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2583-2601.
- [2] 康兵,杨勇,李振兴,等. 基于实际运行数据的配电变压器故障原因多维度分析[J]. 智慧电力,2019,47(3): 66-70.
KANG Bing, YANG Yong, LI Zhenxing, et al. Multidimensional analysis of causes of distribution transformer fault based on actual operation data[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 66-70.
- [3] 王彦博,朱明晓,邵先军,等. 气体绝缘组合电器中局部放电特高频信号S参数特性仿真与实验研究[J]. 高电压技术,2018,44(1): 234-240.
WANG Yanbo, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation and experimental research on S parameter characteristics of partial discharge UHF signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2018,44(1):234-240.
- [4] 淡文刚,陈祥训,郑健超. 油中局部放电脉冲波形的测量与特性分析[J]. 电网技术,2000(6): 37-40.
DAN Wengang, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Measurement and analysis of pluse current of partial discharge in oil[J]. Power System Technology, 2000(6):37-40.
- [5] 司文荣,李军浩,袁鹏,等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报,2008(4): 481-486.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Measurement and analysis of pluse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008(4): 481-486.
- [6] 徐春社,孙振权,赵学风,等. 油纸绝缘气隙模型局部放电特性试验研究[J]. 高压电器,2012,48(2): 34-41.
XU Chunshe, SUN Zhenquan, ZHAO Xuefeng, et al. Experimental investigation of the partial discharge feature with the air gap model in oil - paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(2): 34-41.
- [7] 史瑞楠. 基于局放脉冲波形的复合电压下油纸绝缘缺陷发展程度评估[D]. 济南:山东大学,2018.
SHI Ruinan. Diagnose of defect development process based on single waveform of partial discharge in oil - pressbord insulation under compound voltage[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [8] HUSSAIN G A, KUMPULAINEN L, LEHTONEN M, et al. Preemptive arc-fault detection techniques in switchgear and controlgear—Part II[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1649-1658.
- [9] 黄世龙,王晓辉,郭旭敏,等. 采用TEV传感器的开关柜局部放电检测技术研究及实现[J]. 高压电器,2016,52(10):19-26.
HUANG Shilong, WANG Xiaohui, GUO Xumin, et al. Research and implementation of partial discharge in HV switchgear using TEV sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 19-26.
- [10] 于泊宁,任明,张志斌,等. 配电设备分布式局部放电感知技术的实现方法[J]. 高电压技术,2020,46(6):1929-1938.
YU Boning, REN Ming, ZHANG Zhibin, et al. Implementation method of distributed partial discharge sensing technology for power distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(6):1929-1938.
- [11] ZHOU H Y, MA G M, ZHANG M, et al. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1):24-32.
- [12] 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, LYU 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.
- [13] 陈钜栋,江军,杨小平,等. 油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测[J]. 电力工程技术,2021,40(1): 147-154.
CHEN Judong, JIANG Jun, YANG Xiaoping, et al. Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated - paper bushing based on UHF technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 147-154.

- 147-154.
- [14] 孙曙光, 陆俭国, 俞慧忠, 等. 基于UHF法的GIS局部放电测量与分析[J]. 电测与仪表, 2012, 49(4): 5-8.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Measurement and analysis of GIS partial discharge based on UHF method[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2012, 49(4): 5-8.
- [15] LI J, ZHANG X, HAN X, et al. A Partial discharge detection method for SF₆ insulated Inverted current transformers adopting inner shield case as UHF sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3237-3239.
- [16] UMEMOTO T, TENBOHLEN S. Validations of simulation of UHF electromagnetic wave propagation in an oil-filled tank by time-domain measurements[J]. Transmission Distribution IET Generation, 2019, 13(9): 1646-1652.
- [17] 李军浩, 司文荣, 杨景刚, 等. 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008(6): 718-722.
LI Junhao, SI Wenrong, YANG Jinggang, et al. Propagation characteristic of partial discharge ultra high frequency signals outside transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008(6): 718-722.
- [18] 刘顺成, 向加佳, 陈 剑, 等. 局部放电特高频检测校准影响因素研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 128-134.
LIU Shuncheng, XIANG Jiajia, CHEN Jian, et al. Calibration influence factors of UHF partial discharge detector [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 128-134.
- [19] 邵先军, 朱明晓, 刘家齐, 等. GIS内置特高频传感器性能参数的数值仿真与优化设计技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 282-291.
SHAO Xianjun, ZHU Mingxiao, LIU Jiaqi, et al. Numerical simulation and optimal design technology of parameters of UHF sensors built in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 282-291.
- [20] 蔡 鋈, 袁文泽, 张轩瑞, 等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. 高电压技术, 2020, 47(6): 2041-2050.
CAI Jun, YUAN Wenze, ZHANG Ruixuan, et al. Ultra-high frequency self-sensing detection method for transformer partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2020, 47(6): 2041-2050.
- [21] KURTZ M, LYLES J F. Generator insulation diagnostic testing[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(5): 1596-1603.
- [22] 刘立生, 邱阿瑞. 高压电机局部放电在线监测方法[J]. 电工电能新技术, 1999(3): 26-30.
LIU Lisheng, QIU Arui. Approaches of on-line monitoring for HV Electrical machines partial discharge[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1999(3): 26-30.
- [23] 刘少克, 陈乔夫, 林全铭. 大型电机定子绕组绝缘局部放电测量的噪声干扰及其抑制方法[J]. 高电压技术, 1993(3): 78-81.
LIU Shaoke, CHEN Qiaofu, LIN Quanming. The noise suppression in PD measurement of stator winding of large generator[J]. High Voltage Engineering, 1993(3): 78-81.
- [24] STONE G C. Partial discharge measurements to assess rotating machine insulation condition: A survey[C]//Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 1996: 19-23.
- [25] STONE G C. Advancements during the past quarter century in on-line monitoring of motor and generator winding insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 746-751.
- [26] 程养春. 发电机定子绝缘局部放电非接触式在线监测方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
CHENG Yangchun. Non-contact method of on-line monitoring partial discharges for the stator insulation of large generators[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [27] 严 璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 243-245.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 243-245.
- 吴旭涛(1971—), 男, 教授级高工, 从事电力设备状态检测及故障诊断工作。
- 周 秀(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力设备状态检测及高压试验工作(通信作者)(E-mail:zhouxiu007@163.com)。
- 汲胜昌(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备在线监测及故障诊断等(E-mail:jsc@xjtu.edu.cn)。