

GIS 内置特高频传感器响应特性试验及结果分析

何宇航¹, 张铸林², 张劲¹, 姚晓¹, 苏明虹², 薛志航¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 四川 成都 610041)

摘要:为确保安装使用内置特高频传感器的气体绝缘金属封闭开关设备局部放电监测系统可靠工作,使用吉赫兹横电磁波室试验平台,对四川电网新建 1000 kV 及 500 kV 输变电工程气体绝缘金属封闭开关设备所使用的 665 只内置特高频传感器开展了频率响应特性试验,并且使用可调制脉冲发生装置对部分已经完成现场安装的传感器开展了检测灵敏度试验。结合传感器原理及安装要求对试验结果进行了分析,并据此对内置特高频传感器及局部放电监测系统现场应用提出了建议。

关键词:内置特高频传感器; 吉赫兹横电磁波室; 频率响应特性; 检测灵敏度

中图分类号: TM 937 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)01-0099-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250114

Response Characteristics Test for Built-in UHF Sensor of GIS and Its Result Analysis

HE Yuhang¹, ZHANG Zhulin², ZHANG Jing¹, YAO Xiao¹, SU Minghong², XUE Zhihang¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. High-tech Branch of Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to guarantee the reliability of partial discharge monitoring system in gas insulated metal enclosed switchgear (GIS) installed with built-in ultra-high frequency (UHF) sensors, the tests for frequency response characteristics of 665 built-in sensors used in newly-built 1000 kV and 500 kV power transmission and transformation projects are carried out through the gigahertz transverse electromagnetic (GTEM) platform, and the detection sensitivity test is carried out by using a modulated pulse generator for some sensors already installed on GIS. Based on the principle of sensors design and installation requirements, the test results are analyzed, and the suggestions are proposed for the application of built-in UHF sensors and partial discharge monitoring systems.

Key words: built-in ultra-high frequency sensor; gigahertz transverse electromagnetic cell; frequency response characteristics; detection sensitivity

0 引言

近年来,随着四川电网电压等级提高和设备规模扩大,仅依靠技术人员定期开展局部放电特高频带电检测已无法满足“重要设备全覆盖、缺陷隐患跟踪监视、差异化状态检修”的工作要求。在这样的背景下,需要提升重要设备局部放电特高频“在线监测+带电检测”的应用效果,充分发挥在线监测技术缺陷预警和跟踪能力,提升电网设备安全水平。

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“超/特高压 GIS 设备内置式局部放电监测装置性能评估关键技术研究”(52199723001A)

特高频局部放电在线监测根据其传感器安装位置可分为外置式和内置式两种方案。其中,内置式方案的局部放电特高频传感器与气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal enclosed switchgear, GIS)主体同步设计生产安装,具有抗干扰性能好、监测灵敏度高等优点,适用于大规模长时监测,是实现在线监测的主要手段,但内置式方案对盆式绝缘子、外露绝缘件等带电检测测点采取了全屏蔽措施,内置传感器成为局部放电特高频检测唯一通道^[1]。因此,必须在 GIS 设备交接试验前,对内置传感器开展响应特性和检测灵敏度试验,避免因传感器性能不足、监测点位设置不合理等问题导致局部放电异常监测

灵敏度降低、出现监测盲区,甚至引发设备故障被迫停运的事故^[2-4]。

下面对近期四川电网内新建 1000 kV 及 500 kV 输变电工程使用的 665 只内置传感器开展响应特性和检测灵敏度试验。

1 传感器响应特性试验

1.1 传感器响应特性

特高频传感器在给定频率下的电压响应幅值和安装位置入射电场强度的比值被定义为传感器的有效高度,一般用传感器在工作频率范围内各频点有效高度的算术平均值,即平均有效高度来评价传感器频率响应特性。

吉赫兹横电磁波(gigahertz transverse electromagnetic, GTEM)室采用非对称矩形传输线原理,通过同轴输入端向小室注入陡脉冲激励信号,在中心导体和底板之间形成相对均匀的电磁场,并在后壁使用锥形吸波材料消除后端反射,具有工作频段宽、内部场强均匀、屏蔽性能好等特点,可用于开展特高频传感器频率响应特性试验^[5]。

所开展试验要求传感器在 300~2000 MHz 工作频率范围内平均有效高度不小于 8 mm,最小有效高度不小于 3 mm,同时考察传感器有效高度不小于 6 mm 时的有效工作频段。

1.2 传感器响应特性试验方法

根据第 1.1 节给出的传感器平均有效高度定义,需在各频率点同步测量传感器安装位置的入射电场强度 E_i 和电压响应幅值,计算得到平均有效高度。但是测量入射电场强度存在困难:一方面引入电场测量系统会造成测量位置电场畸变,无法直接测量;另一方面则因为 GTEM 小室内部电场分布并不是完全均匀的,无法根据其他位置场强间接推算。因此,为避免误差风险,所开展试验采用基于标准传感器响应特性的时域参考测量法^[5-7],检测系统如图 1 所示。

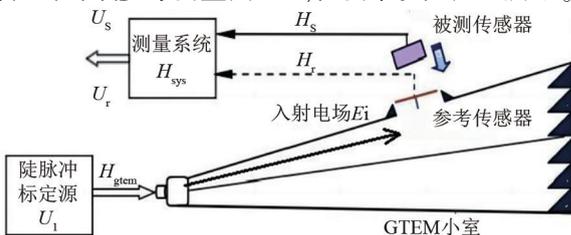


图 1 时域参考法检测系统

GTEM 小室、标准传感器、被测传感器和测量系统的传递函数分别为 H_{gtem} 、 H_r 、 H_s 和 H_{sys} ,激励信号 U_1 注入后,被测传感器和参考传感器在 GTEM 试验平台的响应 U_r 和 U_s 为

$$\begin{cases} U_r = U_1 \cdot H_{gtem} \cdot H_r \cdot H_{sys} \\ U_s = U_1 \cdot H_{gtem} \cdot H_s \cdot H_{sys} \end{cases} \quad (1)$$

标准传感器的传递函数 H_r 和响应特性 U_r 已知,被测传感器响应 U_s 可以通过测量系统检测,由此,根据式(1)可以计算得到被测传感器传递函数 H_s 。

$$H_s = \frac{U_s}{U_r} H_r \quad (2)$$

1.3 传感器响应特性试验平台

试验平台由脉冲标定源、GTEM 小室、标准传感器和测量系统组成。陡脉冲标定源、GTEM 小室技术参数如表 1、表 2 所示。

表 1 脉冲标定源参数

参数	性能指标
输出电压波形	双指数充放电波形 上升沿时间(20%~80%) ≤ 300 ps 下降沿时间 4.5~5.5 ns
输出电压幅值	电压输出 0~200 V,连续调节步长 0.1 V,幅值误差 ≤ ±5%

表 2 GTEM 小室参数(校准值)

参数	性能指标
尺寸(长×宽×高)/m	4.2×2.2×1.5
频带	DC 至 3 GHz
最大电压驻波比	1.37(2000 MHz)
最大输入阻抗/Ω	50.6(2000 MHz)

标准传感器为 25 mm 单极探针,探针实测高度(校准值)与理论高度对比如表 3 所示。

表 3 单极标准探针有效高度数据

频率/MHz	理论高度/mm	实测高度/mm
300	0.6	0.57
500	1.1	1.11
800	1.7	1.72
1200	2.8	2.78
1500	4.0	3.96
1700	5.0	4.95

1.4 传感器响应特性试验

为叙述方便,统一使用型号代码表示被测的 3 类原理 5 个型号传感器,传感器信息如表 4 所示。

试验得到各型号传感器平均有效高度、有效工作频段等响应特性如表 5 所示。

“1”型传感器响应特性如图 2 所示,传感器采

表 4 被测传感器信息

型号代码	安装位置	传感器原理	数量/只
1	500 kV 母线手孔	单极子天线	344
	500 kV 断路器盖板		
2	500 kV 断路器盖板	电容耦合天线	51
3-1	1000 kV 断路器盖板	圆盘天线	9
3-2	1000 kV 母线手孔	圆盘天线	196
3-3	1000 kV 分支母线手孔	圆盘天线	65

表 5 被测传感器响应特性

型号	平均有效高度 /mm		≥ 3 mm 频率/MHz	截止频率/MHz	
	最大值	最小值		下限	上限
1	14.950	10.050	467.9	499.9	1 567.8
2	9.289	8.568	189.0	321.9	1 403.8
3-1	13.520	13.060	325.9	377.9	1 819.8
3-2	11.880	11.060	88.0	116.0	1 221.8
3-3	11.440	10.930	253.0	279.1	1 409.8

用单极子天线原理。通过试验结果可以看出,传感器低频有效高度不满足要求。结合其天线类型和安装位置初步分析,传感器为满足 GIS 设备安装要求而采取小型化设计,单极子天线的天线辐射体长度和半径尺寸主要限制了低频响应特性^[8],因此传感器低频响应特性差。在现场监测中,对于放电能量主要集中在中低频段的缺陷,如固体绝缘气隙、沿面等系统,可能存在监测灵敏度不足的情况。实际应用中应当针对性地设计更高的低频段动态增益并且分段调整信号阈值,以保证监测效果。

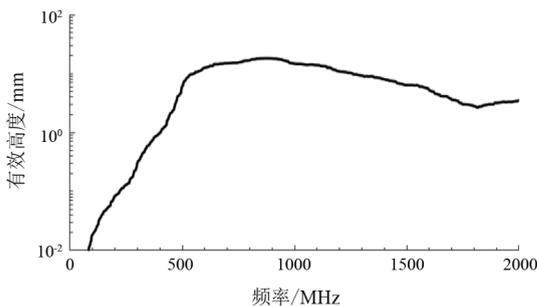


图 2 “1”型传感器响应曲线

“2”型传感器响应特性如图 3 所示,传感器采用电容式天线原理。从表 5 可以看出,“2”型传感器在更高频段仍然能够保持有效高度不小于 5 mm,响应特性良好。

“3”型传感器响应特性如图 4 所示。“3”型传感器采用圆盘天线原理,天线的谐振频率和工作带宽与圆盘等效半径、介质层介电常数相关,圆盘等效半径越大、介电常数越大,得到的传感器谐振频率越低,但介电常数增大会缩窄传感器工作带宽。所有

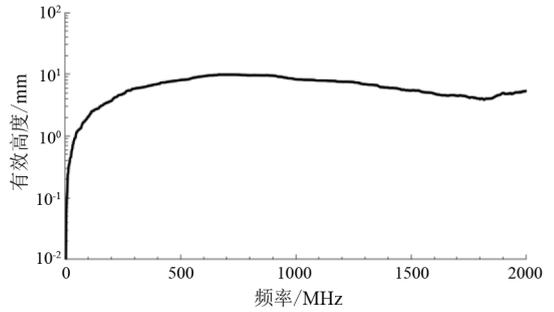


图 3 “2”型传感器响应曲线

传感器中,“3-1”型传感器圆盘等效半径和介电常数最小,因此传感器低频段特性最差而工作频带最宽;部分传感器在低于 300 MHz 频段仍然保持较高的有效高度,由于该频段还包含空气电晕、电机等其他现场电气噪声,因此在实际应用中应设计合理的滤波器来降低系统噪声风险,以保证监测效果。

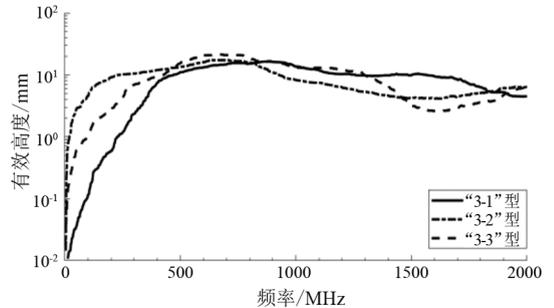


图 4 “3”型传感器响应曲线

1.5 传感器响应特性试验总结

使用 GTEM 试验平台开展 3 种不同原理内置特高频传感器响应特性试验,所有传感器总体响应特性满足要求,但是由于天线原理和结构特性限制,部分天线存在低频段响应特性差的情况。

2 传感器检测灵敏度试验

2.1 传感器检测灵敏度试验方法

使用 CIGRE TF 15/33.03.05 工作组推荐的等效脉冲注入检验方法^[9]现场开展传感器检测灵敏度试验,试验方法如图 5 所示。

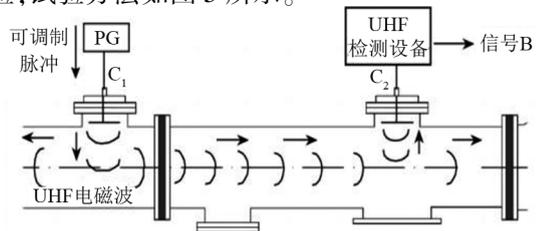


图 5 等效脉冲注入检验方法

试验时,通过内置传感器 C_1 注入调制脉冲电压信号,脉冲电压联合传感器天线在设备中建立起与局部放电激发特高频信号等效的电磁波信号传输,在相邻传感器 C_2 位置检测响应情况,以确定检测系统相邻传感器能够检测到 GIS 内部任一位置的局部放电信号。

2.2 注入脉冲信号等效性确认

脉冲电压联合天线产生的特高频信号与缺陷局部放电激发的特高频信号之间的等效性,是等效脉冲注入检验方法成功的关键。所开展注入脉冲信号等效性试验方法为:使用高压针尖模型模拟 GIS 导体上的毛刺放电缺陷,注入传感器 C_1 和监测传感器 C_2 均使用“1”型传感器,使用 WR8254M 高速示波器监视采集特高频信号,前置增益设置为 20 dB。

试验过程为:1) 外施交流电压,交流电压在毛刺放电缺陷位置激发局部放电,使用脉冲电流法在试验平台校验螺杆位置测量局部放电视在放电量,在监测传感器 C_2 监视并采集特高频信号 UHF1; 2) 停止升压并充分放电后,在注入传感器 C_1 注入脉冲信号,在监测传感器 C_2 监视并采集特高频信号 UHF2; 3) 比较 UHF1 与 UHF2 时频特性,验证脉冲注入信号等效性; 4) 调整脉冲源参数并重复以上步骤,得到满足等效性要求的脉冲信号。

验证试验中,在监测传感器 C_2 能够稳定触发检测的局部放电视在放电量为 10 pC,由此确定的脉冲电压上升沿为 615 ps,减去前置增益后的脉冲幅值为 32 mV。缺陷激发特高频信号和脉冲响应特高频信号时域波形对比如图 6 所示,其频域波形对比如图 7 所示。

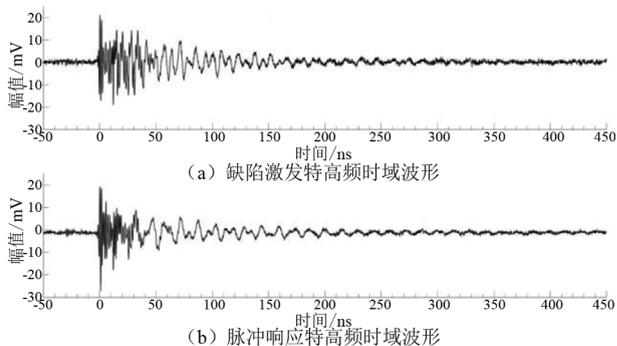


图 6 缺陷激发与脉冲响应特高频信号时域波形对比

时域特性方面:放电激发特高频信号峰峰值为 38 mV,信号持续时间约 190 ns,但是信号振荡衰减过程比较长;脉冲响应特高频信号峰峰值为 39 mV,信号持续时间约 175 ns,信号振荡衰减过程比较短。

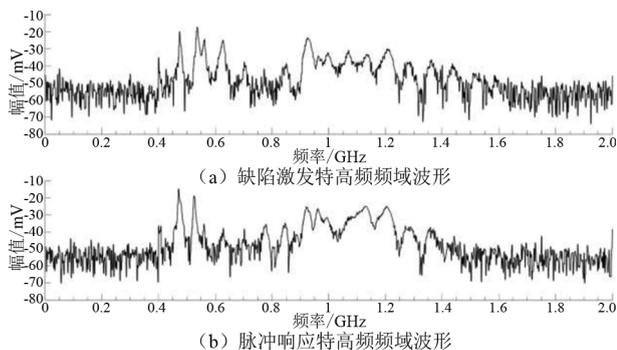


图 7 缺陷激发与脉冲响应特高频信号频域波形对比

频域特性方面:放电激发特高频信号与脉冲响应特高频信号频谱分布特性基本一致,脉冲响应特高频信号仅在 600~650 MHz 范围内缺少一个能量尖峰。

2.3 传感器灵敏度现场试验

以安装有“1”型内置传感器的某 500 kV GIS 设备为试验对象,试验时以断路器、分支母线、主母线气室的内置传感器作为注入测点 C_1 ,再选取与之相邻的内置传感器作为响应测点 C_2 ,按照第 2.1 节给出的试验方法,在 C_1 注入脉冲信号,同时监视注入测点与响应测点,若在 C_2 能够检测到明显信号响应,则根据注入的脉冲幅值推算两个测点之间局部放电检测灵敏度。

注入测点和响应测点设置如表 6 所示。

表 6 检测灵敏度试验测点设置

C_1	C_2	测点之间结构特性
断路器	断路器	断路器、隔离开关均合闸:间距 11.8 m、2 个盆子、3 个拐角、没有断口
		断路器合闸、隔离开关分闸:间距 11.8 m、2 个盆子、3 个拐角、2 个断口
断路器	分支母线	断路器、隔离开关均分闸:间距 11.8 m、2 个盆子、4 个断口、3 个拐角
		最长的分支母线:间距 36.0 m、3 个盆子、4 个拐角
断路器	主母线	最短的分支母线:间距 12.5 m、2 个盆子、3 个拐角
		间距 18.8 m、2 个盆子、2 个拐角
主母线	主母线	间距 20.6 m、2 个盆子、没有拐角

2.3.1 断路器-断路器

当测点之间的断路器、隔离开关均为合闸状态时,监测得到的注入信号与响应信号如图 8 所示,此时注入脉冲幅值 42 mV,计算得到局部放电检测灵敏度约为 13 pC。

当测点之间的断路器、隔离开关均为分闸状态时,监测得到的注入信号与响应信号如图 9 所示,此时触发采集得到的两簇激励与响应信号,从时延判断两簇信号具有一致性,此时注入脉冲幅值 49 mV,

计算得到局部放电检测灵敏度约为 16 pC。

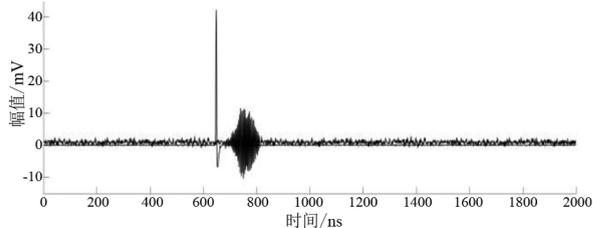


图 8 断路器-隔离开关合闸灵敏度试验波形

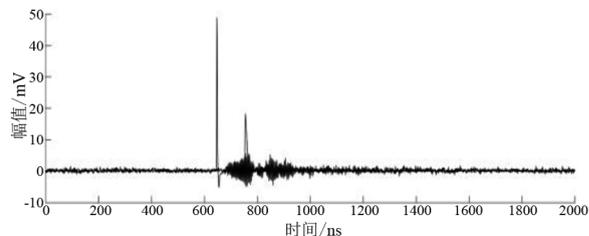


图 9 断路器-隔离开关分闸灵敏度试验波形

当测点之间的断路器为合闸、隔离开关为分闸状态时,监测得到的注入信号与响应信号如图 10 所示,此时注入脉冲幅值 44 mV,计算得到局部放电检测灵敏度约为 14 pC。

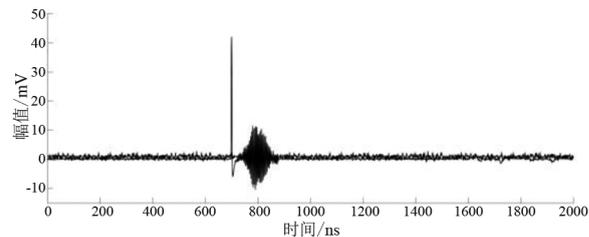


图 10 断路器合闸-隔离开关分闸灵敏度试验波形

2.3.2 断路器-分支母线

当响应测点 C_2 位于较长的分支母线出线端部(出线套管下方)时,监测得到的注入信号与响应信号如图 11 所示,检测得到的响应信号波形呈纺锤包络衰减形状且幅值不足 5 mV,此时注入脉冲幅值为 100 mV,计算得到局部放电检测灵敏度约为 32 pC。同时在注入测点 C_1 注入信号约 800 ns 后检测到反射信号,反射信号与响应信号幅值接近,表明此时检测系统存在信号混叠风险。

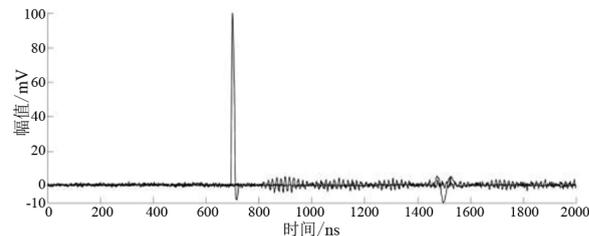


图 11 断路器-长分支母线灵敏度试验波形

当响应测点 C_2 位于较短的分支母线出线中部时,监测得到的注入信号与响应信号如图 12 所示,

此时注入脉冲幅值 41 mV,计算得到局部放电检测灵敏度约为 13 pC。

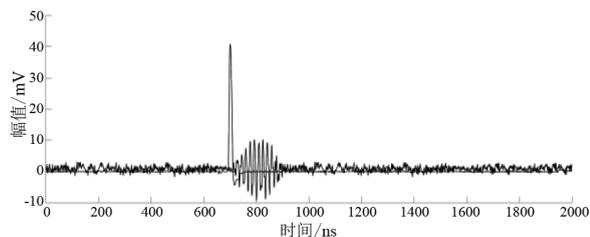


图 12 断路器-短分支母线灵敏度试验波形

2.3.3 断路器-主母线

在断路器和主母线监测得到的注入信号与响应信号如图 13 所示,响应信号波形幅值总体较小且上升沿特征不明显,并且从响应信号持续时间来看,可能存在多个响应信号叠加传输,此时注入脉冲幅值为 46 mV,计算得到局部放电检测灵敏度约为 15 pC。

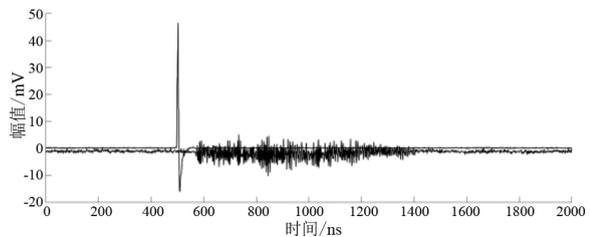


图 13 断路器-主母线灵敏度试验波形

2.3.4 主母线相邻测点

主母线相邻测点监测信号如图 14 所示,注入脉冲幅值为 45 mV 时响应端口 C_2 能够检测到响应信号,计算得到局部放电检测灵敏度约为 15 pC。

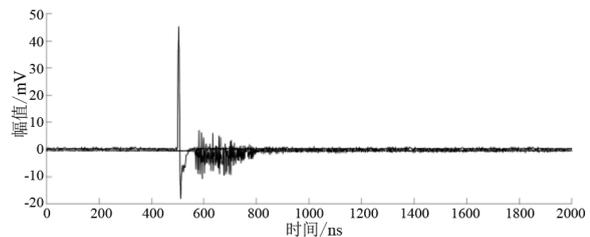


图 14 主母线-主母线灵敏度试验波形

2.4 传感器检测灵敏度试验

使用 GIS 局部放电仿真试验平台对脉冲电压信号联合天线建立的特高频信号与缺陷局部放电激发特高频信号等效性进行了验证,确定等效 10 pC 局部放电的脉冲波形,并以此为基础在安装有“1”型传感器的 500 kV GIS 设备开展了相邻传感器检验灵敏度试验。

试验发现,对于如“断路器-长分支母线”这样相邻传感器之间距离很长的情况,响应信号衰减明显并且存在激励反射信号与响应信号混合叠加的情

况,此时应在分支母线增加测点,对于如“断路器-主母线”这样距离较长且结构较复杂的情况,应考虑适当减少传感器间距。

3 结 论

上面针对近期四川电网 1000 kV 及 500 kV 输变电新建工程使用的局部放电特高频内置传感器开展了响应特性试验和检测灵敏度试验,得到以下结论:

1)所有参与试验的传感器平均有效高度均满足要求。但是部分采用单极子天线原理的内置传感器为满足 GIS 安装要求采取了小型化设计,限制了传感器低频带性能。同时,部分采用圆盘天线原理的内置传感器辐射体尺寸和介质层介电常数选择不佳,导致传感器在低频段仍然有较大的有效高度。在实际应用中,低频段有效高度不足会降低监测系统对于固体绝缘等缺陷的监测灵敏度,而低频段较大的有效高度可能会为监测系统引入空气电晕等噪声风险。

2)相邻传感器检测灵敏度试验结果表明,当相邻测点之间距离较大且设备结构比较复杂时,会降低内置传感器检测灵敏度。

在后续工作中,一是要提高等效性验证试验精细度,完成注入脉冲信号与 5 pC 视在放电量的等效性验证;二是要针对悬浮、固体绝缘、沿面等其他典型缺陷开展验证试验,完善等效脉冲注入信号模型;三是要进一步开展包含互感器、伸缩节、避雷器等设备和结构的验证试验。

(上接第 98 页)

- [5] LEUNG C M, OR S W, ZHANG S Y, et al. Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetoelectric laminate of epoxy-bonded $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$ short-fiber/ $NdFeB$ magnet magnetostrictive composite and $Pb(Zr, Ti)O_3$ piezoelectric ceramic[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(9):09D918.
- [6] LU C J, LI P, WEN Y M, et al. Zero-biased magnetoelectric composite $Fe_{73.5}Cu_{1}Nb_{3}Si_{13.5}B_9/Ni/Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ for current sensing[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 589:498-501.
- [7] GIANG D H T, TAM H A, KHANH V T N, et al. Magnetoelectric vortex magnetic field sensors based on the metglas/PZT laminates[J]. Sensors, 2020, 20(10):2810.
- [8] GUO X R, YU X J, LOU G F. A wide range DC current

参考文献

- [1] 许谱名,李欣,崔建华,等. GIS 智能在线监测系统设计与应用研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(8):102-106.
- [2] 冯新岩,孟庆承,李凯,等. GIS 特高频局部放电检测定位方法[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10):72-74.
- [3] 任志刚,李伟,徐兴全,等. 不同电压等级 GIS 局部放电 UHF 信号传播特性仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5):88-93.
- [4] 丁然,聂鹏飞,李意. 内置式特高频传感器在 GIS 设备上安装布点方案研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9):78-84.
- [5] JUDD M D, FARISH O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4):875-880.
- [6] 李兴旺,黎量,唐志国,等. 外置式 UHF 校验信号注入方法的可行性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(5):71-76.
- [7] 王异凡,龚金龙,蒋建玲,等. 基于 GTEM 的局部放电 UHF 标定的场强溯源研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2):61-68.
- [8] 张国治,陈康,田晗绿,等. 超小型内置柔性宽频带 UHF 单极子天线传感技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(4):1475-1485.
- [9] CIGRE JTF15/33.03.05. Partial discharge detection system for GIS: sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[R]. Electra, 1999.

作者简介:

何宇航(1990), 硕士, 工程师, 从事输变电设备状态检测工作。

(收稿日期:2024-08-20)

sensor based on disk-type magnetoelectric laminate composite with a feedback circuit [C]//2017 IEEE SENSOR, Oct.29-Nov.1, 2017, Glasgow, UK. IEEE, 2017.

- [9] LI F C, WU J G, LIU S J, et al. Magnetoelectric sensor operating in d15 thickness-shear mode for high-frequency current detection[J]. Sensors, 2024, 24:2396.

作者简介:

刘苏婕(1990), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为传感与测量技术;

莫锦涛(1998), 男, 硕士, 研究方向为磁电耦合原理的电流传感器;

吴金根(1991), 男, 博士, 副教授, 研究方向为压电器件、磁电器件;

李福超(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测量传感器技术、数字化测量技术。(收稿日期:2024-04-25)