

一种应用于GIS内部局部放电检测的新型光学传感系统*

沈 龙¹, 钱国超¹, 周仿荣¹, 彭兆裕¹, 马御棠¹, 代维菊¹, 夏昌杰^{2**}

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘 要:设计了一种适用于GIS内部局部放电检测的新型SiPM传感系统,具有驱动电压低、体积小、光子转化率高明显优势。通过局部放电光-电联合检测试验验证了新型SiPM传感系统与光电倍增管(PMT)及高频线圈(HFCT)对局部放电检测结果的一致性,也证明了局部放电相位分析法对SiPM检测结果分析的有效性。在此基础上对SiPM现场安装方式进行了研究和试验,结果表明SiPM传感系统在现场应用中也能取得优异的检测效果,能够为光测法的现场应用提供有效的技术支持。

关键词: 气体绝缘组合电器设备;局部放电;光测法;硅光电倍增器;局部放电相位分析

中图分类号: TN366 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0258-07

A Novel Optical Sensor System for Internal Partial Discharge Detection in Gas Insulation Switchgear

SHEN Long¹, QIAN Guochao¹, ZHOU Fangrong¹, PENG Zhaoyu¹, MA Yutang¹, DAI Weiju¹,
XIA Changjie^{2**}

(1. Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, CHN; 2. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, CHN)

Abstract: A novel SiPM sensor system suitable for internal PD detection in GIS was designed, which had obvious advantages such as low drive voltage, small volume and high photon conversion rate. The consistency of the new SiPM sensor system, photomultiplier tube (PMT) and high frequency current transformer (HFCT) of pulse current detection device for PD detection was verified through the PD light-electric joint test, and the validity of phase resolved partial discharge method on SiPM detection results was also proved. On this basis, the field installation mode of SiPM was studied and tested. The results showed that the SiPM sensor system could achieve excellent detection effect in the field application and provide technical support for the field application of optical measure-

收稿日期:2020-06-29

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51877171);南方电网科技项目(YNKJXM20180015)

作者简介:沈 龙(1974—),男,硕士,高级工程师,从事高压绝缘技术方面的研究工作;

钱国超(1981—),男,硕士,教授级高级工程师,从事高压绝缘技术、高压电器方面的研究工作;

彭兆裕(1986—),男,硕士,高级工程师,从事高压绝缘技术、高压电器方面的研究工作;

** 通讯作者:夏昌杰(1996—),男,博士研究生,从事高电压绝缘技术、电力设备在线监测技术方面的研究。

(E-mail:xcj19960521@stu.xjtu.edu.cn)

ment method.

Key words: gas insulated switchgear; partial discharge; optical measurement method; silicon photomultiplier; phase resolved partial discharge

引 言

气体绝缘组合电器设备(Gas Insulated Switchgear, GIS)是一种由封闭在金属接地外壳中的断路器、隔离开关、互感器、避雷器、母线等一、二次电力设备共同构成的组合电器设备,金属接地外壳内部用具有优异绝缘性能和灭弧性能的SF₆气体作为绝缘介质。由于具有结构紧凑、可靠性高、安全性强、维护工作量小等优势, GIS已经广泛应用于电力系统中^[1]。然而GIS在生产、运输、装配及运行中会不可避免地形成诸如导体尖端划伤、悬浮电位或绝缘子表面异常等绝缘缺陷,一方面在电场作用下绝缘缺陷将引起局部放电,另一方面局部放电又将加剧绝缘的劣化程度,甚至造成绝缘贯穿性击穿引发严重事故,因此开展局部放电检测对保障设备安全可靠运行具有显著意义^[2-3]。

局部放电过程伴随着电荷移动、电磁波传播、声波传播、光辐射等多种物理现象,对应形成了脉冲电流法^[4]、超(特)高频法^[5]、地电波法^[6-7]、超声法^[8]和光测法^[9]等检测方法。然而电力设备实际运行工况中经常伴随着不定期的电磁和噪声干扰,这对以电磁波和声波为对象的检测方法带来了巨大的挑战^[10]。光测法是一种以放电光辐射为检测对象的方法,由于光辐射发生在放电发展中场致发射、电离、附着、复合和消散的全过程^[11],因此光测法作为一种本征和直观的表征手段在局部放电检测中具有独特的技术优势:①光传播和耦合过程几乎不受电磁波和声波干扰影响,测量结果具有极高的置信度;②局部放电光谱能够反映电子温度、激发截面和发展模态等微观信息^[12],可利用光谱特征对放电机制和绝缘劣化程度进行深入分析;③将放电统计信息和光谱信息相结合^[13-14],不但能判断放电类型,还能反映放电强弱(能量)。鉴于光学检测手段在抗干扰性、表征能力及置信度方面的优点,可以借助其对GIS内部的局部放电实现有效监测和精细化诊断。

然而,已有研究表明GIS中局部放电光辐射量较低且持续时间极短(ps~ns),因此对光学检测系统的要求较高。对于常见的光学检测系统来说,荧光光纤、声光干涉、电磁光干涉等系统由于组成复杂、体积较大、驱动电压较高、光转化率低和光谱检

测范围与局部放电光信号不匹配等原因,难以满足GIS设备内部局部放电检测的需求;光电倍增管(PMT)虽然对局部放电光信号有着良好的检测效果,但受制于最小电子加速行程和最低阴极电势,其尺寸(~10 cm)和外驱动电压(~kV)都难以降低且工作寿命有限,所以PMT大多用于实验室研究,难以实际应用于电力设备内部局部放电检测。因此,设计能够满足GIS内部局部放电检测需求的光学检测系统具有重要的意义。

文中首先设计了一种基于硅光电倍增器(SiPM)的新型局部放电弱光检测传感系统;然后在局部放电光-电联合检测试验中使用局部放电相位分析(PRPD)方法对比了SiPM系统, PMT和 高频线圈(HFCT)对局部放电的检测结果,并引入偏斜度和陡峭度作为统计算子对上述三种传感系统的检测结果开展一致性分析。最后,文章对SiPM新型局部放电弱光检测传感系统在实际GIS设备中的应用方式做了初步探索和验证。

1 SiPM局部放电光学检测传感器

1.1 SiPM单元简介

SiPM是一种在mm²级尺度上集成了数千个由雪崩二极管(SPAD)和串联电阻构成的微结构单元的固体光子计数器^[15],其结构及检测光子原理如图1所示。在SiPM器件两端施加30 V左右的反向电压将使SPAD工作在“盖革模式”中,当入射光子进入微结构单元时,SPAD内部将引发自持电荷雪崩,产生的光电流流过串联电阻时通过无源淬灭可将

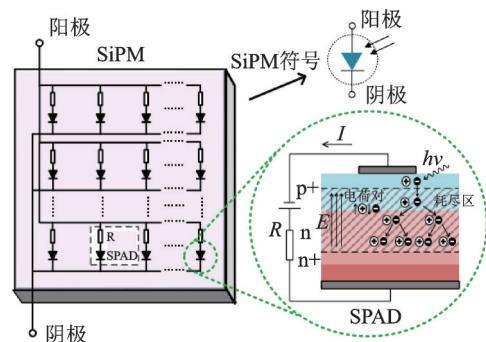


图1 SiPM单元基本结构

Fig.1 Basic structure of SiPM unit

SPAD两端的反向电压降低至击穿电压值以下。随后内部的SPAD两端再次充电回到雪崩偏压值以上,可以再次检测后续入射的光子。通过“雪崩-淬灭-充电”的循环过程,SiPM的微结构单元可以在“状态0”和“状态1”之间切换。盖革雪崩发生的区域仅限于接收到光子的微结构单元,在雪崩过程中未接收到光子的单元仍将处于完全充电状态,即“状态0”。因此所有集成在SiPM中的微结构单元的“状态1”和“状态0”的数字化信号总和构成一种准模拟信号输出,具有提供瞬时光通量大小信息的能力。

与PMT相比,SiPM在具备与PMT相当的弱光探测能力的同时,又兼具固态传感器的诸多优点,例如外施偏执电压低、尺寸微小、抗电磁干扰强以及成本低廉等^[16]。表1为目前常用弱光探测传感器的性能比较,SiPM在与以PIN光电二极管、雪崩光电二极管APD以及PMT为代表的传统光学检测器件相比有着更加优秀的性能。

1.2 SiPM 传感器阵列设计

选取 SensL 公司型号为 MicroFJ-30035-TSV 的 SiPM 单元作为接收局部放电光信号的耦合器,

表 1 常用弱光探测传感器的性能对比

Tab.1 Performance comparison of common low light detection sensors

	PIN	PMT	APD	SiPM
增益	1	$\geq 10^6$	10^2	$\geq 10^6$
运行电压/V	5	~ 1000	$1\sim 1000$	30
温度敏感性	低	低	高	低
机械鲁棒性	高	低	中	高
传感器一致性	良好	差	差	优异
成本	低	高	高	低
抗电磁干扰能力	强	弱	强	强
噪声	低	低	中	低
响应时间	快	快	慢	快

如图2(a)所示。在传感器检测光子的有效区域内,每平方毫米集成了1300个微结构单元。针对MicroFJ-30035-TSV,设计了16通道SiPM阵列供电及信号读出电路,如图2(b)(c)所示,电路整体分为供电, $I-U$ 转换电路及放大电路。供电部分的电容对施加在SiPM两端的电压起到滤波作用,从而减少引入到SiPM中的噪声。安装后SiPM局部放电传感器如图2(d)所示。

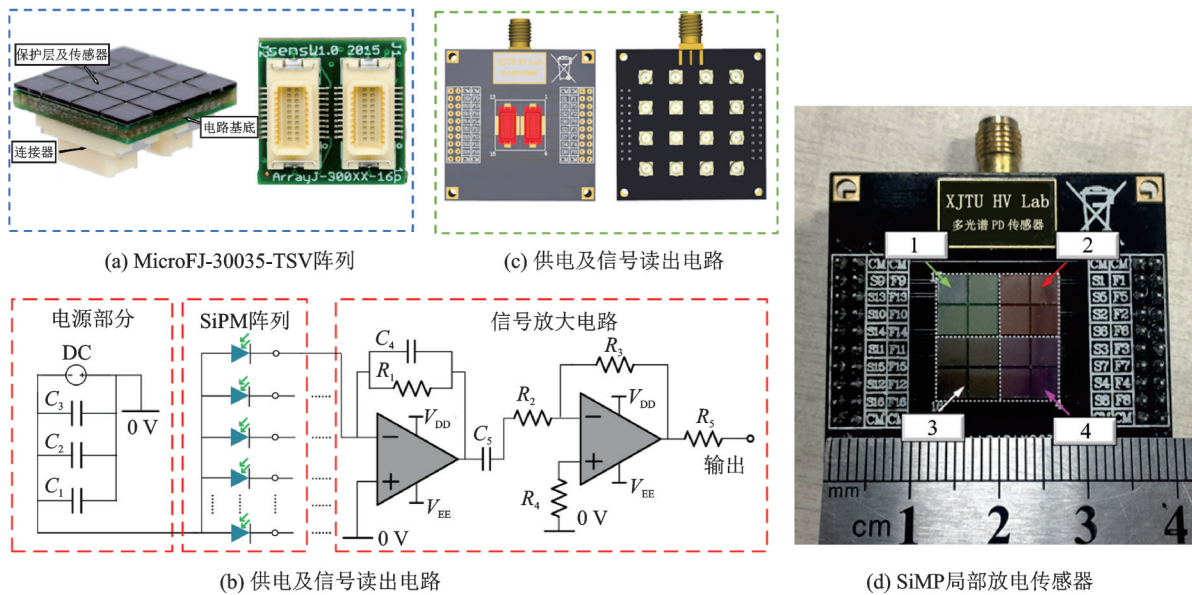


图 2 SiPM 阵列局部放电传感器设计

Fig.2 Design of SiPM array PD sensor

2 SiPM 局部放电传感系统性能测试试验

2.1 GIS 局部放电光-电联合检测试验平台

为了验证 SiPM 传感系统对局部放电检测的有

效性,在实验室中搭建了一套 GIS 局部放电光-电联合检测平台,如图 3 所示。试验平台由变压器、局部放电测试回路、GIS 模拟腔体、SF₆ 充气设备、模拟缺陷及信号测量系统等构成,可实现对 GIS 设备内部环境的模拟以及对电信号的光-电同步测量。信号测量系统中同时安装有 SiPM、PMT 以及高频线

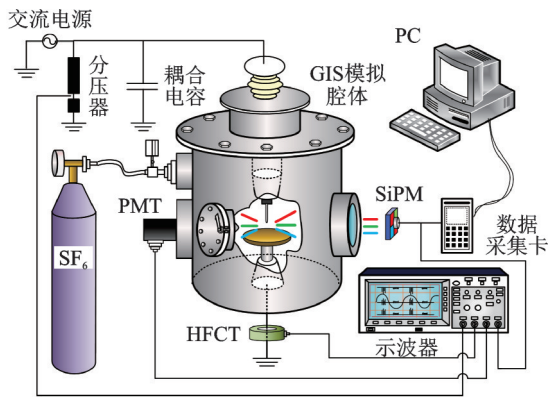


图3 GIS局部放电光-电联合检测试验平台

Fig.3 GIS optical-electric joint testing platform for partial discharge

圈(HFCT),分别应用光测法和脉冲电流法对局部放电信号进行同步测量,其中SiPM与PMT距放电缺陷距离均为20 cm。试验中保持罐体内部试验温度为20℃,相对湿度为5%。此外,为了减少空间中电磁干扰的影响,系统中的信号连接线和高压连接线分别进行了屏蔽和防电晕处理。

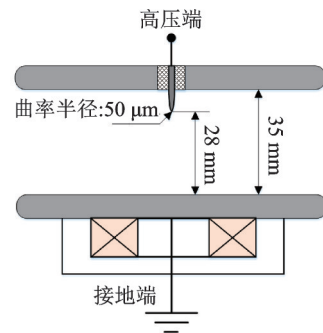
2.2 绝缘缺陷模型

根据GIS中缺陷表面电子发射和放电机理,在实验室中设计和制作了三种典型的放电缺陷模型:金属尖端放电模型、金属悬浮电位模型及绝缘子沿面放电模型(强垂直分量)。

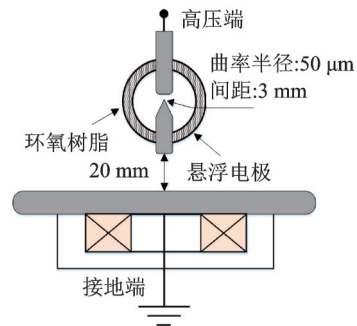
图4(a)为金属尖端放电模型,将针电极嵌套在上下板电极之间,板电极提供均匀背景电场,针电极使之产生极不均匀场;针电极与罐体上下板电极均采用黄铜制作,上下极板间距离为35 mm,针电极与下极板间距为28 mm。针电极采用双曲面型,其等效曲率半径为50 μm。

图4(b)为悬浮放电模型,采用圆柱形的环氧树脂材料将高压电极与悬浮金属尖端电极通过螺纹固定在一起。圆柱侧面镂空处理,减少对放电造成的遮挡,有利于对光脉冲信号的探测。悬浮电极尖端曲率半径为50 μm,下端为平面,且距下极板20 mm。高压电极采用棒电极,与悬浮电极尖端相距2 mm。

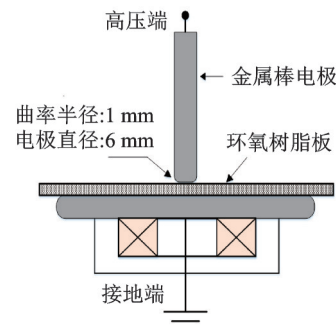
图4(c)为沿面放电(强垂直分量)模型。整体结构为高压棒电极紧贴环氧树脂圆形板并紧放在下极板上。棒电极与下极板间产生了强烈的与环氧树脂板面垂直的电场,进而形成强垂直分量的沿面放电。金属棒电极直径为6 mm,圆柱边沿曲率半径为1 mm。



(a) 金属尖端放电模型



(b) 金属悬浮电位放电模型



(c) 沿面放电模型

图4 绝缘缺陷模型

Fig.4 Models of artificial insulation defect

3 PRPD统计分析对比

局部放电相位分析(Phase Resolved Partial Discharge, PRPD)是将发生在不同周期内的局部放电信号进行整合,根据局部放电发生时的工频交流电压相位叠加在同一个工频交流电压周期内,进而研究叠加周期内放电谱图的分析方法。本章应用PRPD法对在上述三种缺陷模型下的检测结果进行了分析,并且对比了不同放电起始电压(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)倍数下的局部放电检测结果。图5(a)~(c)分别为金属尖端放电、金属悬浮电位放电、沿面放电检测的PRPD图谱,其中由于PMT和SiPM两端均施加了单极性正电压,因此放电信号响应均为正值。

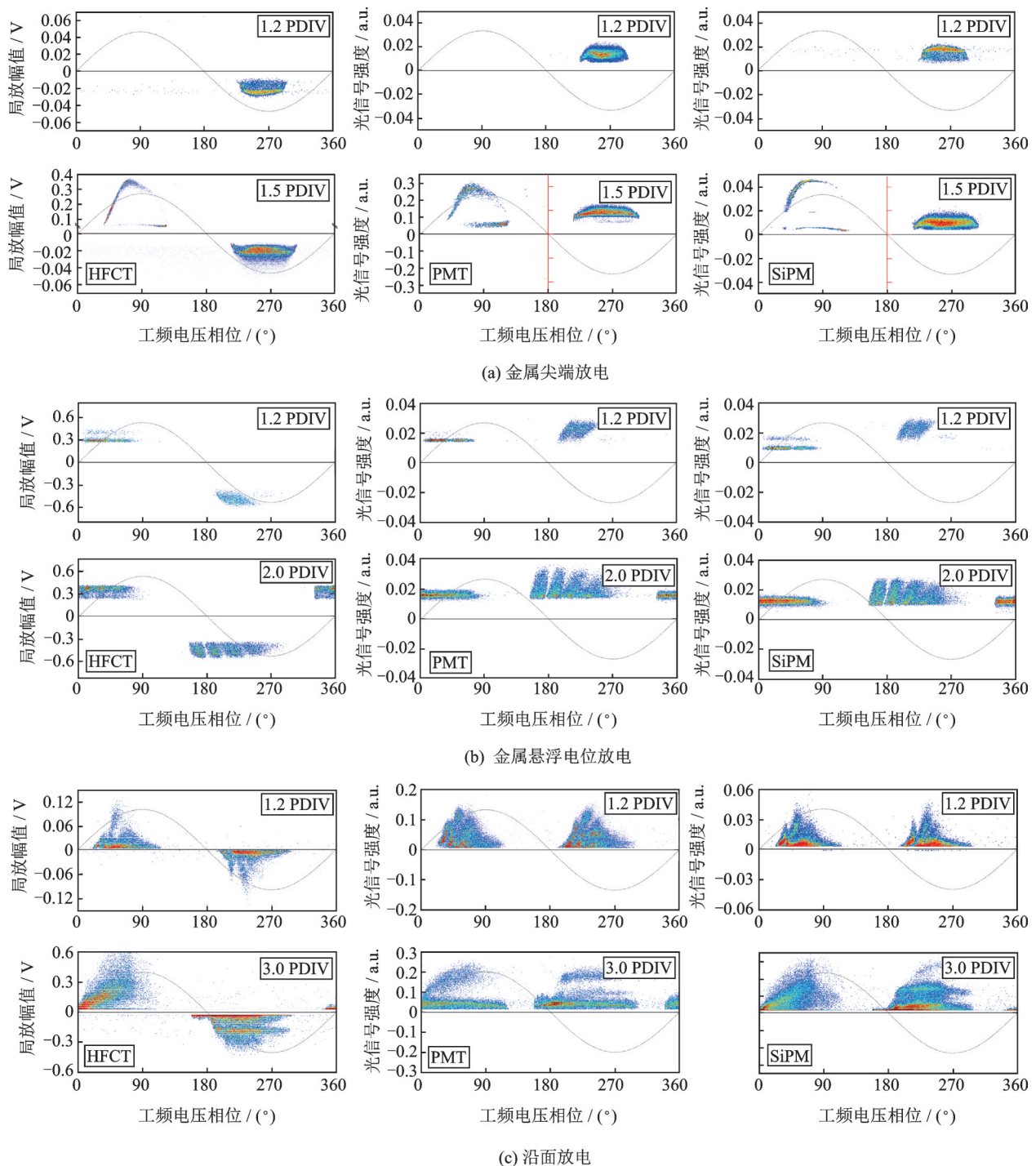


图5 三种缺陷下PRPD谱图

Fig.5 PRPD spectra with three defects

由图5所示, HFCT、SiPM以及PMT三种检测传感器在同一缺陷类型和同一外施电压下采集到的PRPD谱图在形态上具有一致性, 在响应幅值上均随外施电压的升高而显著增强。三种检测手段均能有效检测到局部放电信号并且反映放电的剧烈程度。

为了进一步定量对比SiPM与另外两种传感器的检测效果, 文中引入了偏斜度 Sk 和陡峭度 Ku 两

种统计算子, 在PRPD检测的基础上提取统计特征量, 定量说明三种传感器检测结果的一致性。

斜度 Sk 度量的是统计数据分布偏斜方向及程度, 是对统计数据频数分布对称性的考量, 计算公式如式(1)所示:

$$Sk = \frac{\sum_n (x_i - \mu)^3}{\sigma^3 \cdot n} \quad (1)$$

陡峭度 Ku 用来描述随机变量分布相对于正态

分布的平坦程度,计算公式如式(2)所示:

$$Ku = \frac{\sum_n (x_i - \mu)^4}{\sigma^4 \cdot n} - 3 \quad (2)$$

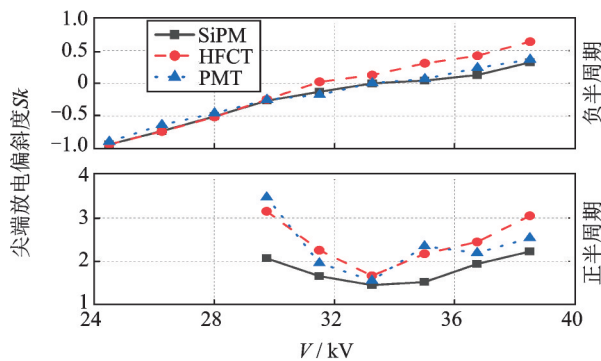
式中: x_i 为放电光脉冲幅值,单位为V; μ 为放电光脉冲幅值的平均值,单位为V; n 为光辐射脉冲数量; σ 为标准差,单位为V。

图6为0.3 MPa气压下SF₆气体中金属尖端放电、金属悬浮电位放电以及沿面(强垂直分量)放电中HFCT、SiPM以及PMT三种传感器所获取的PRPD图谱在工频电压正半周期和负半周期的偏斜度Sk和陡峭度Ku计算结果。

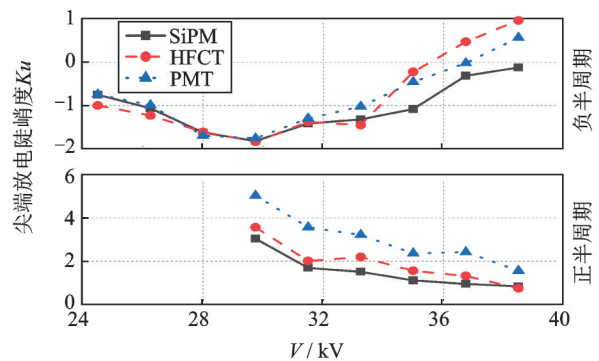
图6(a)为尖端放电正负半周期偏斜度,正半周期呈现正偏,负半周期由负偏逐渐变为正偏。图6

(b)为尖端放电正负半周期的陡峭度,正半周期随电压升高逐渐变陡峭,负半周期逐渐变平坦,且三种检测手段检测结果及变化趋势相近。

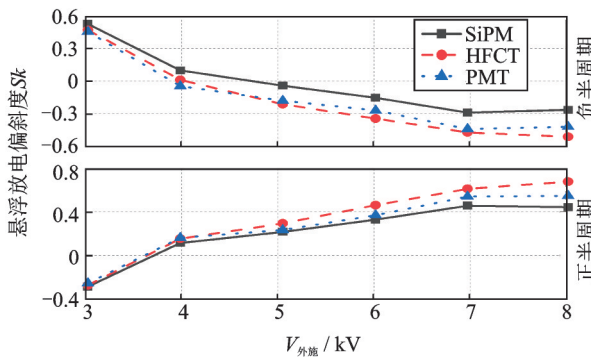
图6(c)为悬浮放电正负半周期偏斜度,从图中可以看出,随着外施电压的增高,在正负半周三种检测手段获取的统计算子绝对值均增大,即PRPD谱图整体正偏趋势更大,并且三种检测手段检测得到偏斜度从数值及变化规律上也基本一致。图6(d)为悬浮放电正负半周期的陡峭度,对于悬浮放电来说,随着电压的升高,悬浮放电的陡峭度减小,PRPD谱图呈现出更平坦的趋势,且三种检测手段结果接近。



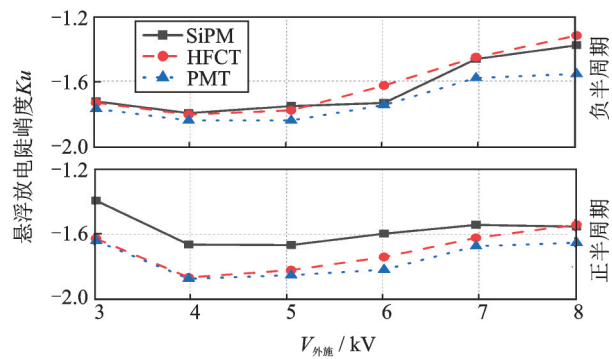
(a) 尖端放电偏斜度Sk



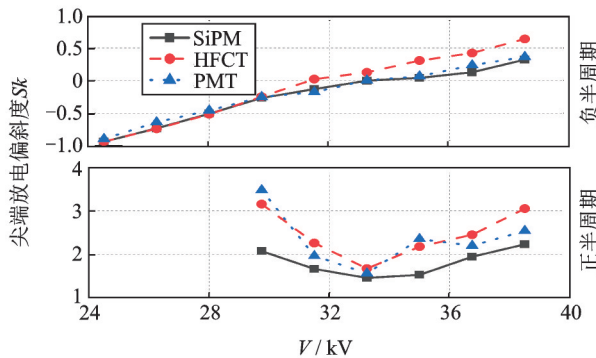
(b) 尖端放电陡峭度Ku



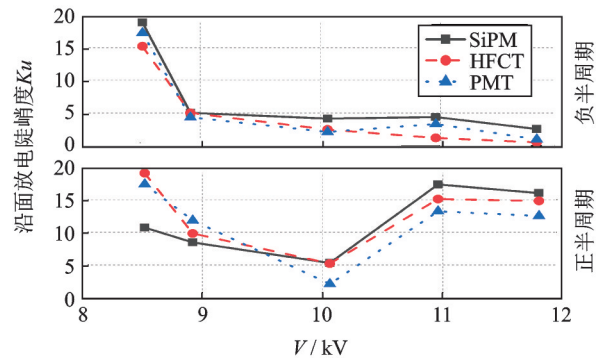
(c) 悬浮电位放电偏斜度Sk



(d) 悬浮电位放电陡峭度Ku



(e) 沿面放电偏斜度Sk



(f) 沿面放电陡峭度Ku

图6 不同放电类型的统计算子(以SF₆气压为0.3 MPa为例)

Fig.6 Statistical operators of different discharge types (the pressure of SF₆ is 0.3 MPa)

图 6(e)为沿面放电正负半周期内的偏斜度,正负半周期内也均呈现正偏,且正半周期正偏程度较负半周期更大。图 6(f)为沿面放电正负半周期内的陡峭度,与前两种放电比,沿面放电 PRPD 谱图形态更为陡峭,且三种检测手段检测结果及趋势相近。

SiPM 与 HFCT 和 PMT 检测结果的统计算子所得结果大小相近,且变化趋势一致。统计谱图的一致性建立在线性度一致、分辨率相似的基础上,因此文章所设计的 SiPM 局部放电传感器与 PMT 和 HFCT 等传统检测手段有着相近甚至更优异的局部放电检测能力,同时说明现有应用于 PMT 和 HFCT 检测结果的 PRPD 法同样适用于 SiPM 的检测结果。

4 SiPM 传感器现场应用方式

合理的应用方式是 SiPM 传感器应用于现场 GIS 局部放电检测的基础,需要同时满足局部放电光信号的准确采集和不同厂家及型号的 GIS 设备安装。文章提出了如图 7 所示的 SiPM 传感器安装方式。SiPM 固定在 GIS 罐体法兰处,将光感区域面向 GIS 设备内部用于放电检测,背面使用航空插头引出电信号,四周进行密封处理。

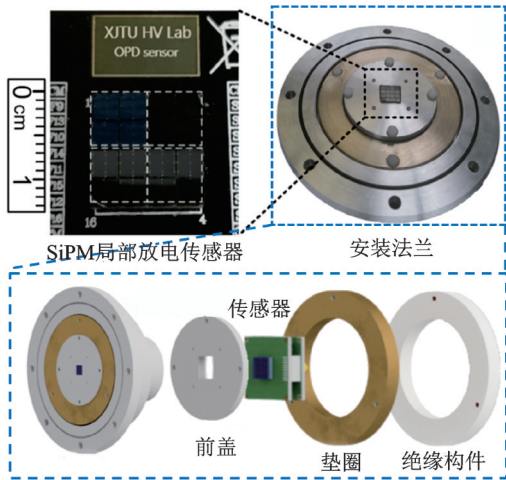
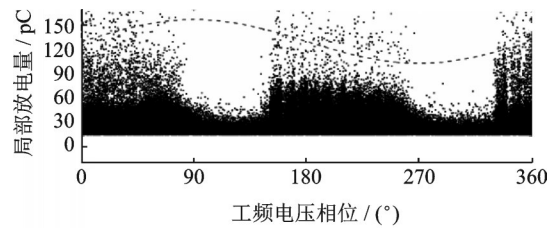


图 7 SiPM 传感器安装方式
Fig.7 SiPM sensor installation mode

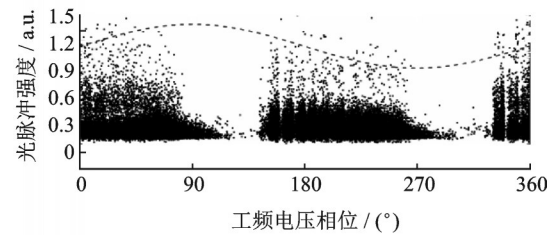
为了验证 SiPM 传感器在现场应用的有效性,以一个全尺寸 110 kV GIS 设备为试验对象,如图 8 所示。本试验中,GIS 内部设置有前述沿面放电模型和金属悬浮电位放电模型作为模拟缺陷,SF₆ 气体压力为 0.3 MPa,温度为 28 °C。采用脉冲电流法作为放电量的定量表征方法。检测结果如图 9 所示。



图 8 SiPM 现场验证试验
Fig.8 SiPM field verification test



(a) 脉冲电流法(基于HFCT)PRPD散点图



(b) 光测法(基于SiPM)PRPD散点图

图 9 SiPM 现场试验 PRPD 谱图
Fig.9 PRPD spectra of SiPM field test

如图 9 所示的检测结果表明在实际 GIS 设备中,基于上述安装方式的 SiPM 传感器对局部放电具有较高的检测灵敏度,并且检测结果与标准脉冲电流法有着较高一致性,可以认为文章设计的 SiPM 传感器在现场应用中也能取得较为优异的检测效果,能够为光测法的现场应用提供技术支持。

5 结 论

文章设计了一种适用于 GIS 内部局部放电检测的 SiPM 传感系统,并在 GIS 局部放电光-电联合检测试验的基础上,对 SiPM、PMT 与 HFCT 的局部放电检测性能进行了比较。对比结果显示,文中所设计的 SiPM 局部放电传感器与 PMT 和 HFCT 等传统检测手段有着相近甚至更优异的局部放电检测能力,同时说明现有 PRPD 分析方法同样适用于 SiPM 检测结果分析。在此基础上,文章还对 SiPM 传感器的应用方式进行了研究,(下转第 276 页)