

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.01.002

新型GIS局部放电柔性内置阿基米德螺旋天线研究

张国治^{1,2,3}, 张 硕¹, 张晓星¹, 陈 康¹, 韩景琦¹, 刘健犇⁴

(1. 湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 武汉 430068; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 3. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072; 4. 中国电力科学研究院有限公司电网环境保护国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 针对气体绝缘组合电器(GIS)内置式特高频(UHF)传感器空间利用率低、尺寸较大并且可能破坏GIS内部电场分布的问题,文中设计了一种新型柔性内置阿基米德螺旋天线。利用振幅随幅角线性增加的正弦波加载方式对天线本体进行小型化处理,使天线径向尺寸缩小57.8%,并对背馈巴伦进行曲折小型化,使巴伦长度减小56.4%。设计的柔性天线本体直径146 mm,厚度0.27 mm。有限元仿真和实物测试结果显示,柔性天线在弯曲半径为0、250、350 mm时,在720 MHz~3 GHz频段内驻波比 $VSWR \leq 5$;在1.02~3 GHz频段内 $VSWR \leq 2$;在工作频段内具有良好的全向辐射特性。搭建局部放电试验平台对天线性能进行分析,结果表明文中设计的柔性天线在弯曲形变前后均可检测到放电量20 pC以下的PD辐射电磁波信号。

关键词: GIS; 局部放电; 柔性天线; 小型化; 曲折化巴伦

Research on Flexible Built-in Archimedes Spiral Antenna for Partial Discharge in New Type of GIS

ZHANG Guozhi^{1,2,3}, ZHANG Shuo¹, ZHANG Xiaoxing¹, CHEN Kang¹, HAN Jingqi¹, LIU Jianben⁴

(1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nanrui Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems of low space utilization, large size and possible damage to the internal electric field distribution of in-built ultra high frequency(UHF) sensor for gas insulated switchgear(GIS), a new type of flexible built-in spiral antenna is designed in this paper. The antenna proper is miniaturized by using the sine wave loading mode in which the amplitude increases linearly with the argument angle so that the radial size of the antenna is reduced by 57.8%, and the back fed balun is meandering miniaturized so that the balun length is reduced by 56.4%. The designed flexible antenna body has a diameter of 144 mm and a thickness of 0.27 mm. The results of finite element simulation and physical test show that when the bending radius of flexible antenna is 0 mm, 250 mm and 350 mm, voltage standing wave ratio($VSWR$) is ≤ 5 in 720 MHz ~ 3 GHz frequency band; and is ≤ 2 in 1.02 GHz ~ 3 GHz frequency band. It has good omnidirectional radiation characteristics in the working frequency band. The partial discharge test platform is set up to analyze the antenna performance. The results show that the PD radiated electromagnetic wave signal with discharge less than 20 pC can be detected before and after bending deformation.

Key words: GIS; partial discharge detection; flexible antenna; miniaturization; tortuosity balun

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated substation,

GIS)具有占地面积小、可靠性高等优点广泛地应用于电力系统中^[1-2]。局部放电(partial discharge, PD)是由于绝缘体内部或其表面局部电场畸变引起的电

收稿日期:2023-10-10; 修回日期:2023-12-26

基金项目:电网环境保护国家重点实验室开放基金资助(GYW51202101362)。

Project Supported by the Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection(GYW51202101362).

气现象,同时也是是诱发GIS设备绝缘性能恶化的主要因素^[3],在绝缘系统中素有“恶性肿瘤”之称。PD发生时会产生一系列光、声、电流、电磁波等特征信号,利用传感器检测这些特征信号可实现对PD源的有效监测,为GIS运行状态的有效评估预警提供依据^[4-9]。特高频(ultra-high frequency, UHF)法利用天线传感器检测 300 MHz~3 GHz 频带内PD辐射电磁波信号的同时可有效避开电力现场 300 MHz 以下电晕干扰,广泛用于GIS PD绝缘状态监测中^[10-12]。

按照安装方式的不同,现有的UHF天线传感器可分为外置式和内置式两种类型。外置式UHF天线传感器安装在GIS的盆式绝缘子浇筑孔处,优点是便于安装检测,不影响设备内部电场,但其抗干扰能力弱、灵敏度不足。文[13]研制了一种外置式四频段微带单极子天线,提高了天线检测PD信号的响应速率。文[14]研制了一种外置式新型对拓Vivaldi天线,扩大了Vivaldi天线工作带宽,更好的适用于UHF PD检测。内置式UHF天线传感器一般通过在GIS开孔加装法兰盘的形式放置于GIS腔体内部,内置式UHF法虽然只能在GIS制造过程中实现内置,但其抗干扰能力强、检测灵敏度高,目前中国 220 kV 以上GIS出厂前都必须安装内置式UHF传感器。文[15]设计研制了一种内置式等角螺旋天线传感器,可以有效接收PD信号,为内置式UHF传感器规范化设计和利用提供参考;文[16]分析了内置式圆板型天线驻波比影响因素,并对其进行优化设计,提高了圆板型内置天线检测性能。但是目前研究的内置式UHF传感器大多为刚性基底,在安装时不能与GIS弧形外壳共形,空间利用率低且存在破坏GIS内部电场分布的危险^[17],这些缺点一定程度上阻碍了UHF检测法的发展和应用。

针对刚性基底内置式UHF天线传感器存在的问题,文中提出了新型GIS局部放电柔性内置阿基米德螺旋天线的研究,采用柔性材料聚酰亚胺(polyetherimide, PI)作为天线基底,利用振幅随幅角线性增加的正弦波加载方式对天线进行小型化设计,然后利用Ansoft HFSS建立天线三维模型,通过多尺寸参量联合优化法对天线辐射面及其馈电巴伦进行结构参数优化,最后对设计的天线进行实物试制并利用搭建的局放模拟实验平台对天线性能进行实测。

1 阿基米德螺旋天线原理

阿基米德螺旋天线具有圆极化、非频变等优点^[18],广泛地应用于通信、卫星定位等领域。天线由中心

对称的两条臂组成,其中一条臂由内外侧两条起始半径不同的阿基米德螺旋线构成,内外侧阿基米德螺旋线的极坐标方程分别为:

$$r_{in} = r_0 + a\varphi \quad (1)$$

$$r_{out} = (r_0 + d) + a\varphi \quad (2)$$

式(1)、(2)中: r_0 为内侧螺旋线起始半径; $(r_0 + d)$ 为外侧螺旋线起始半径; d 为内外侧两条螺旋线间距即天线臂宽; a 为螺旋增长率; φ 为角度; (r_{in}, φ) 、 (r_{out}, φ) 分别为内外侧螺旋线上一点的极坐标。

阿基米德螺旋天线原理图可近似为两条中心对称的阿基米德螺旋线,见图1。

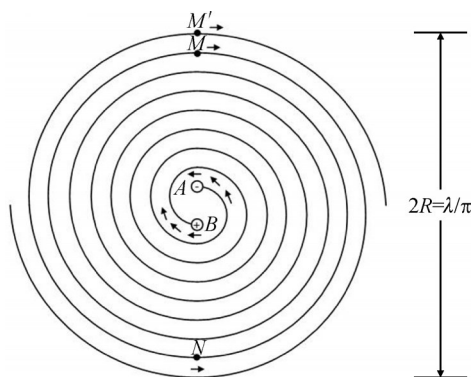


图1 阿基米德螺旋天线原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Archimedes spiral antenna

在A、B处施加大小相等、相位相反的平衡馈电,并在螺旋线上对称位置取M、N两点,使得 $\overline{AM}$ 与 $\overline{BN}$ 满足

$$|\overline{AM}| = |\overline{BN}| = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3)$$

式(3)中, λ 为一个电磁波波长。此时M、N两点的电流相位相反,在M相邻的螺旋线上取点M',当螺旋增长率 a 较小时,可认为M、M'两点电流相位相同,当天线相邻两臂电流相位相同时,会在垂直于天线辐射面的方向形成最强辐射,即当螺旋线最外圈周长约等于 λ 时,阿基米德螺旋天线处于有效辐射区内。

螺旋线外径 r_w 与天线最低工作频率 f_{min} 所对应的波长 λ_L 有关,一般应使螺旋线外径

$$2\pi r_w \geq 1.25\lambda_L \quad (4)$$

螺旋线内径 r_n 与天线最高工作频率 f_{max} 所对应的波长 λ_H 有关,在设计天线内径时,还应考虑天线馈电装置与天线辐射面接口的尺寸,一般取内径

$$2r_n \leq \lambda_H \quad (5)$$

除此之外,螺旋增长率 a 也是影响螺旋天线性能的关键参数。当螺旋线外径 r_w 不变时,随着螺旋增长率 a 的减小和天线电流流经长度增加,辐射能量增多,天线驻波特性和变好。但是,当 a 过小时,金属螺旋线上损耗增大,会导致低频段的驻波特性和

化^[19]。为实现天线在工作频段内具有良好辐射性能的目的,一般使螺旋增长率 a 满足

$$a = \frac{r_w - r_n}{2\pi n} \quad (6)$$

式(6)中, n 为螺旋线的圈数。

2 新型柔性阿基米德螺旋天线特性

2.1 天线主体结构设计

文中设计的新柔性阿基米德螺旋天线的工作频段为 700 MHz~3 GHz,最高工作频率对应的波长 $\lambda_H=100$ mm,最低工作频率对应的波长 $\lambda_L=428.6$ mm。由式(4)计算得 $2r_w=170.6$ mm,此时天线尺寸较大。文中采用振幅随幅角线性增加的正弦波加载方式对天线两臂进行曲折化处理,同时设计了一种曲折化巴伦对天线进行馈电,有效缩小了天线径向以及剖面尺寸。

2.1.1 小型化螺旋天线设计

对天线两臂进行曲折臂加载,可以在给定工作频段的前提下,延长天线电流流经长度,从而缩小有效辐射区面积。而且由于天线两臂同时进行相同形式的曲折臂加载,并不改变两臂上相邻两点电流相位特性,因此天线方向图、增益特性基本不变^[20]。文[21]采用方波形曲折臂对平面螺旋天线进行加载,使天线辐射面半径缩小了 15%,口径面积缩小了 27%。

而与方波、三角波的加载方式相比,正弦波加载方式可以在相同的周期和振幅下获得更长的曲线长度,同时正弦波曲折臂电流路径相对平滑,因此正弦波加载方式可以最大程度减小曲折臂加载带来的性能恶化。

正弦波加载是将阿基米德螺旋线方程与正弦波方程 $b\sin(n\varphi)$ 进行加减运算,其中: b 表示正弦波振幅; n 表示每圈螺旋线所含的正弦波周期数。当 b 固定不变时,正弦波曲折臂方程可用参数方程可以表示为

$$\begin{cases} X(\varphi)=[r_0+a\varphi\pm b\sin(n\varphi)]\cos(\varphi) \\ Y(\varphi)=[r_0+a\varphi\pm b\sin(n\varphi)]\sin(\varphi) \end{cases} \quad (7)$$

为了最大程度增加电流流经长度,文中采用振幅随幅角线性增加的正弦波对天线进行加载,参数方程为

$$\begin{cases} X(\varphi)=[r_0+a\varphi\pm c\varphi\sin(n\varphi)]\cos(\varphi) \\ Y(\varphi)=[r_0+a\varphi\pm c\varphi\sin(n\varphi)]\sin(\varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, c 为振幅变化系数。对比参数方程(7)、(8)可知,振幅随幅角线性增加的正弦波加载方式相比于传统正弦波加载方式天线电流流经路径更长。

为了使天线工作频带平滑的向低频段过渡,文中设计的小型化天线内 7.5 圈仍采用传统形式的阿基米德螺旋线,从第 7.5 圈开始进行正弦波加载,天线辐射面见图 2,其各项参数取值见表 1。



图 2 小型化天线辐射面结构图

Fig. 2 Structure diagram of miniaturized antenna radiation surface

表 1 小型化天线辐射面参数

Table 1 Parameters of miniaturized antenna radiation surface

参数	数值
螺旋内径/mm	2
螺旋外径/mm	72
螺旋圈数	24
螺旋增长率/(mm·rad ⁻¹)	0.828
臂宽/mm	1.4
馈电点间距/mm	4
正弦波振幅参数	0.025
正弦波周期数	40

2.1.2 曲折化巴伦设计

文中设计的天线需要施加等幅反相的平衡馈电,而实际馈电采用 SMA 或 BNC 同轴线为非平衡馈电。仿真结果显示,文中设计的天线输入阻抗为 150 Ω ,而 SMA 或 BNC 同轴线特性阻抗为 50 Ω 或 75 Ω ,因此需要解决平衡馈电和阻抗匹配的问题。

为解决该问题,文中采用指数渐变巴伦馈电结构。馈电线和地线均通过指数渐变方程将同轴线 50 Ω 特性阻抗与天线 150 Ω 输入阻抗相匹配。结合宽带匹配理论,为使指数渐变线的反射系数最小并且频带极宽^[19],一般使巴伦总长度 L 与天线最低工作频率所对应的波长 λ_L 满足关系式

$$L \geq 0.25\lambda_L \quad (9)$$

文中设计的天线工作频段为 700 MHz~3 GHz,若采用传统指数渐变巴伦馈电,由式(9)计算可得巴伦长度 $L=107$ mm。此时天线整体剖面高度较高,空

间利用率低,因此需要对巴伦进行曲折化设计。

巴伦曲折化有多种方式,文[21]对巴伦馈电线和地线同时进行一次阿基米德螺旋变形,减小了巴伦尺寸。文[22]在阿基米德螺旋线起始部分接入一段等角螺旋线,降低了天线本身输入阻抗,进而将巴伦长度缩短到22.5 mm。文中利用弯曲微带线的方式对巴伦进行曲折化处理,在巴伦弯折处保持宽度不变,利用4个半圆环同时对馈电线和地线进行两次180°弯折,利用4个1/4圆环以及4个1/4圆分别对馈电线和地线进行4次90°弯折,曲折化巴伦结构见图3。为了防止馈电线上产生共模电流^[23],进而导致天线方向图恶化,在巴伦曲折化时应保证馈电线和地线对称弯曲。

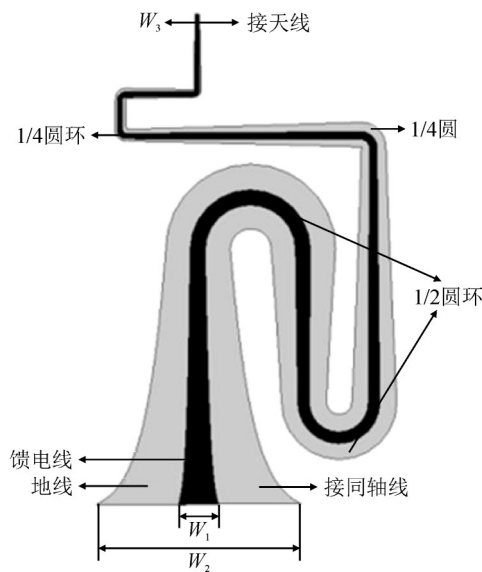


图3 曲折化巴伦结构图

Fig. 3 Structure diagram of tortuosity Balun

文中设计的曲折化巴伦印制在2 mm厚的FR-4介质底板上,底板介电常数4.4,损耗正切角0.026。曲折化巴伦结构参数见表2,与曲折化处理前相比,巴伦长度缩小56.4%。

表2 曲折化巴伦参数

Table 2 Parameters of tortuosity balun		mm
参数类型	参数大小	
馈电线首端宽度	4.00	
地线首端宽度	20.00	
馈电线/地线末端宽度	0.42	
曲折化巴伦长度	46.60	
曲折化巴伦宽度	30.00	

为验证曲折化巴伦阻抗匹配性能,文中利用Ansys HFSS有限元仿真软件,在巴伦末端添加150 Ω 阻抗边界条件,在首端添加50 Ω 集总端口激励,对比了巴伦曲折化前后阻抗匹配性能,结果见图4。

仿真结果显示,在92%的仿真频段(500 MHz~3 GHz)内,曲折化巴伦电压驻波比VSWR(voltage standing wave ratio)小于1.8,具有良好的宽带特性,达到了比较理想的性能指标。对曲折化巴伦进行制作,实物见图5。

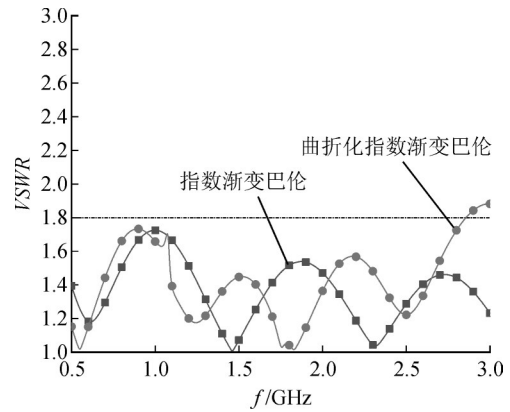


图4 巴伦曲折化前后VSWR对比图

Fig. 4 Comparison of VSWR before and after Balun tortuosity

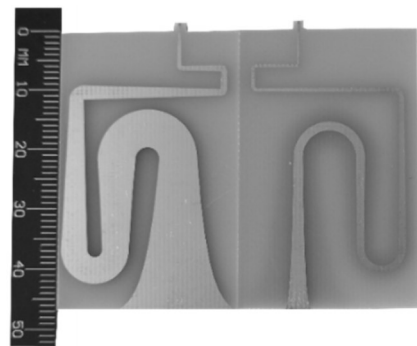


图5 曲折化巴伦实物地线(左)、馈电线(右)

Fig. 5 Tortuosity Balun ground wire(left), feeder(right)

2.1.3 天线柔性化

针对刚性基底内置式传感器的不足,文中引入柔性材料PI替换原来的刚性基底材料。目前研究的柔性材料主要有PDMS(polydimethylsiloxane,聚二甲基硅氧烷)^[24]、PI (polyetherimide,聚酰亚胺)^[25]、LCP (liquid crystal polymer,液晶高分子聚合物)^[26]等。在柔性材料中,PI具有较低的介电常数($\epsilon_r=3.5$)以及损耗正切角($\tan\delta=0.008$),用做介质底板材料可以保证天线拥有较高的信号传输速度以及辐射效率。同时其优良的电绝缘性、稳定的化学性能以及较强的机械性能更加适合内置式传感器使用场景。

文中将设计的天线印制在厚度均匀的圆形PI柔性介质板上,介质底板直径146 mm,厚度0.27 mm。将制作的小型化螺旋天线辐射面与曲折化巴伦连接,采用射频连接器SMA-KE插座连接SMA同轴馈电线进行馈电,天线整体实物见图6。



图6 柔性天线实物

Fig. 6 Object of flexible antenna

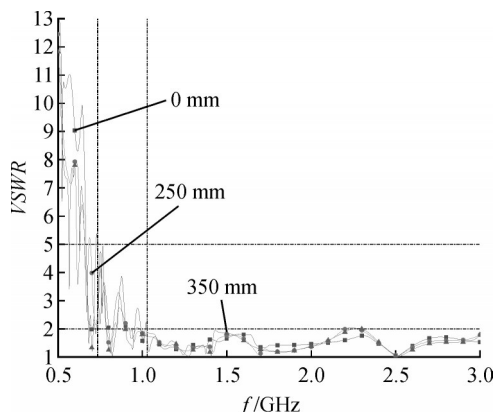
2.2 天线性能仿真

2.2.1 电压驻波比

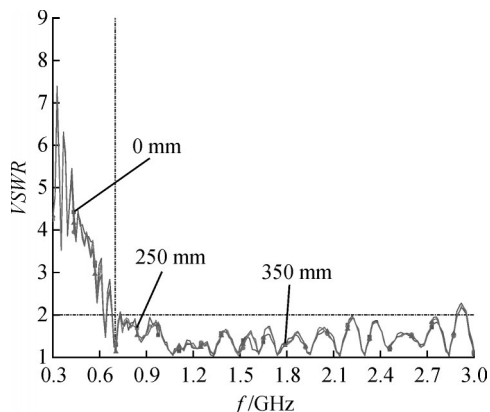
电压驻波比 $VSWR$ 是波腹和波节电压的比值, 最佳的比例为 1:1, 即天线的输入阻抗等于馈电线的特性阻抗, 用公式表示为

$$VSWR = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (10)$$

式(10)中, Γ 为天线输入端反射系数, 表示反射波电压 u_{ref} 和入射波电压 u_{in} 之比。当 $VSWR=1$, 即 $\Gamma=0$ 时, 天线反射波电压为 0, 天线无反射, 为理想的匹配状态; 当 $VSWR=\infty$, 即 $\Gamma=1$ 时, 天线反射波电压等于入射波电压, 呈现全反射, 为失配状态。GIS 内部空间狭小, 内置式传感器距离放电源较近, 接收 PD 信号较强, 一般认为当 $VSWR \leq 5$ 即为 GIS PD 检测带宽^[17]。由于实际 GIS 设备的外壳多为筒装结构, 根据其电压等级与制造工艺的不同, 外壳弯曲半径一般在 150~500 mm 之间, 所以文中仿真了柔性天线在不弯曲时 (0 mm) 以及弯曲半径为 250 mm 和 350 mm 时的 $VSWR$, 结果见图 7。由图 7 可以看出, 文中设计的柔性天线未发生形变时, 在 720 MHz~3 GHz 频段内 $VSWR \leq 5$, 在 1.02~3 GHz 频段内 $VSWR \leq 2$ 。弯曲形变后天线 $VSWR$ 会有微小的波动, 但整体变化趋势未发生变化。

图7 仿真 $VSWR$ 曲线Fig. 7 Simulated $VSWR$

利用矢量网络分析仪测试天线实物 $VSWR$, 结果见图 8。由图 8 可知, 文中设计的天线在 700 MHz~3 GHz 频段内 $VSWR \leq 2$, 天线弯曲形变 $VSWR$ 基本不变。对比实测与仿真数据发现, 实测 $VSWR$ 在低频段好于仿真, 在高频段出现震荡, 整体效果符合工程要求。

图8 实测 $VSWR$ Fig. 8 Measured $VSWR$

2.2.2 方向图

方向图是表示在距离天线一定距离内, 不同方向上天线辐射场的相对场强和性能变化的图形, 通常由极坐标绘制。文中设计的柔性天线在 (1、1.5、2、2.5 GHz) 4 个频点下, 不同弯曲半径时天线 E 面和 H 面的方向图见图 9、10。由图 9、10 可知, 天线在 4 个频点下, E 面和 H 面方向图均成倒“8”字型, 天线可双向辐射或者接收电磁波。

3 柔性天线性能试验验证

3.1 PD 检测试验平台搭建

为验证所研发柔性天线 PD 检测性能, 在实验室搭建了工频无局放高压试验平台, 试验电路见图 11。在 GIS 模拟罐内充入 SF_6 气体, 并在其内部放置针—板模型来模拟金属突出物缺陷放电。针—板模型均为钢质材料, 钢针尖端与钢板平面距离 1 cm。在 GIS 模拟腔体罐石英玻璃开口处放置两种 UHF 检测天线进行 PD 检测性能对比。信号采集设备使用泰克高性能数字示波器 (Tektronix*MS044) 四通道均可提供 1.5 GHz 带宽以及 6.25 GS/s 采样频率。

3.2 PD 检测性能对比试验

文中使用柔性天线与文[27]设计的对距 Vivaldi 天线进行 PD 检测性能对比实验。针—板放电模型击穿电压为 17 kV。在电压 14~15.6 kV 范围内进行了多次 PD 对比实验, 数据见图 12。由图 12 可知, 在多次 PD 对比实验中, 两种 UHF 传感器均可检测到 PD 信号。PD 信号幅值在 5~25 mV 范围内, 幅值对应的时间在 0~30 ns 范围内。

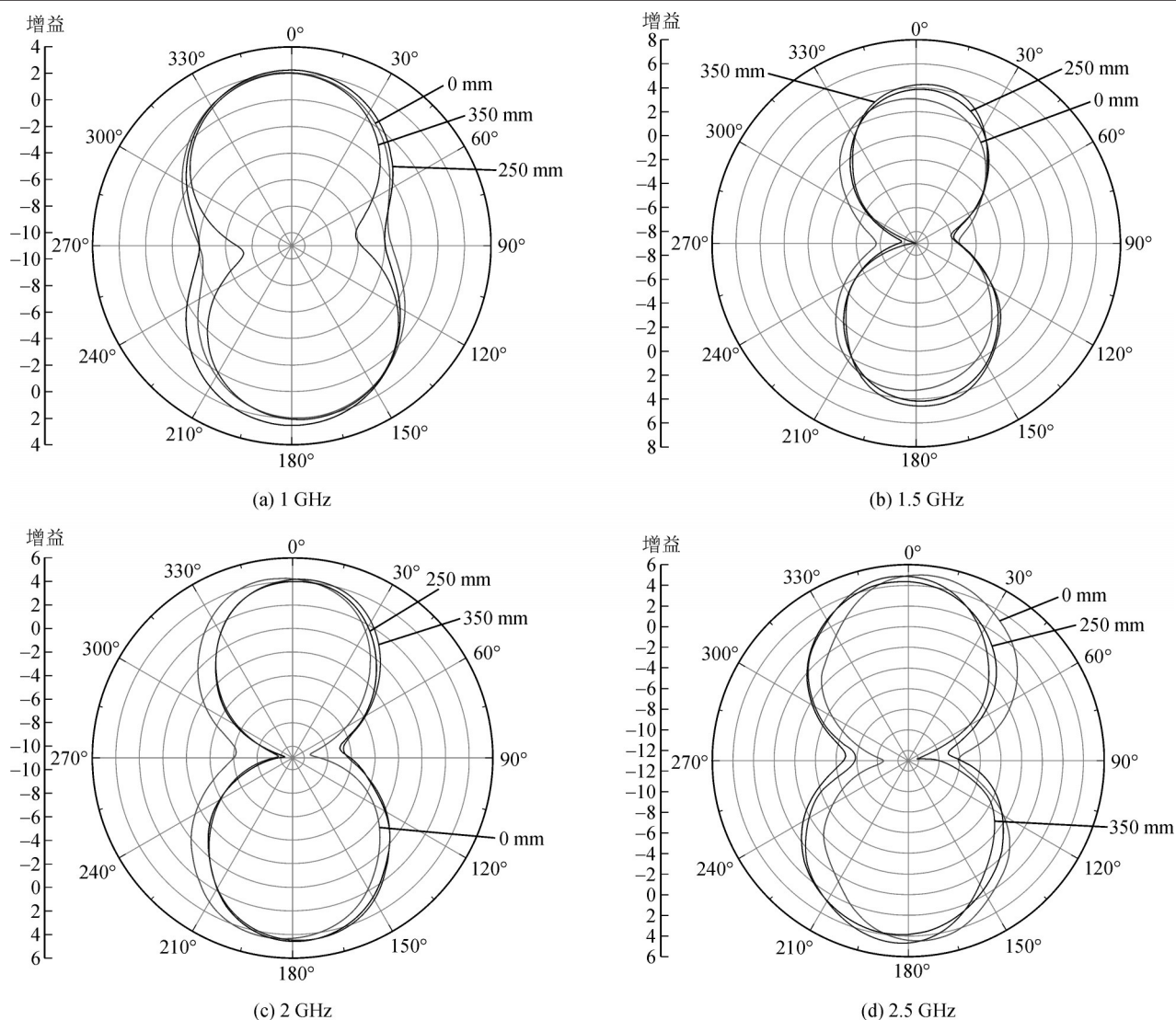


图9 不同频点下E面方向图

Fig. 9 E-plane patterns at different frequencies

加压 14 kV, 放电量为 12.5 pC 时两种 UHF 传感器检测到的 PD 信号波形见图 13。与成熟 UHF PD 检测天线对比结果表明, 文中设计的柔性天线可有效检测到 PD 信号。

3.3 弯曲形变 PD 检测试验

为验证弯曲形变后文中设计天线的 PD 检测性能, 在 20 pC 以内 3 个放电等级下 (13、15、18 pC) 分别对柔性天线进行不同弯曲半径 (0、250、350 mm) PD 检测性能验证。实验时将 3 种不同弯曲半径的天线同时置于 GIS 模拟腔体罐外, 当加压至 14.5、14.9、15.3 kV 时, 3 种弯曲程度的柔性天线采集的 PD 信号波形见图 14。

从图 14 中可以看出, 在放电量为 13 pC 时, 弯曲半径为 0、250、350 mm 的柔性天线采集到信号幅值分别为 11.4、11.6、11.8 mV; 在放电量为 15 pC 时, 3 种弯曲半径的柔性天线采集到信号幅值分别为 17.4、15、11.0 mV; 在放电量为 18 pC 时, 3 种弯曲半

径的柔性天线采集到 PD 信号幅值分别为 17.4、20.6、20.2 mV。实验表明, 3 种弯曲程度的柔性天线在同一放电等级下均可采集到 PD 信号, 弯曲形变不影响柔性天线 PD 检测性能。在 20 pC 以内 3 种不同放电等级下, 柔性天线均可检测到 PD 信号, 满足 Q/GDW 11304.8.4—2015 电力设备带电检测仪器技术规范中对 UHF PD 检测传感器的技术要求^[28]。

4 柔性天线内置测试

4.1 刚性/柔性基底天线内置对 GIS 内部电场分布影响

为了分析刚性基底和柔性基底天线内置对 GIS 内部电场分布的影响, 利用 Comsol Multiphysics 软件搭建了 GIS 刚性基底和柔性基底内置天线简化模型。对于刚性基底内置天线, 实际安装时需对 GIS 法兰盘进行结构改造, 简化模型结构图见图 15 (左)。模型中对 GIS 高压导杆 (弯曲半径 30 mm) 施加

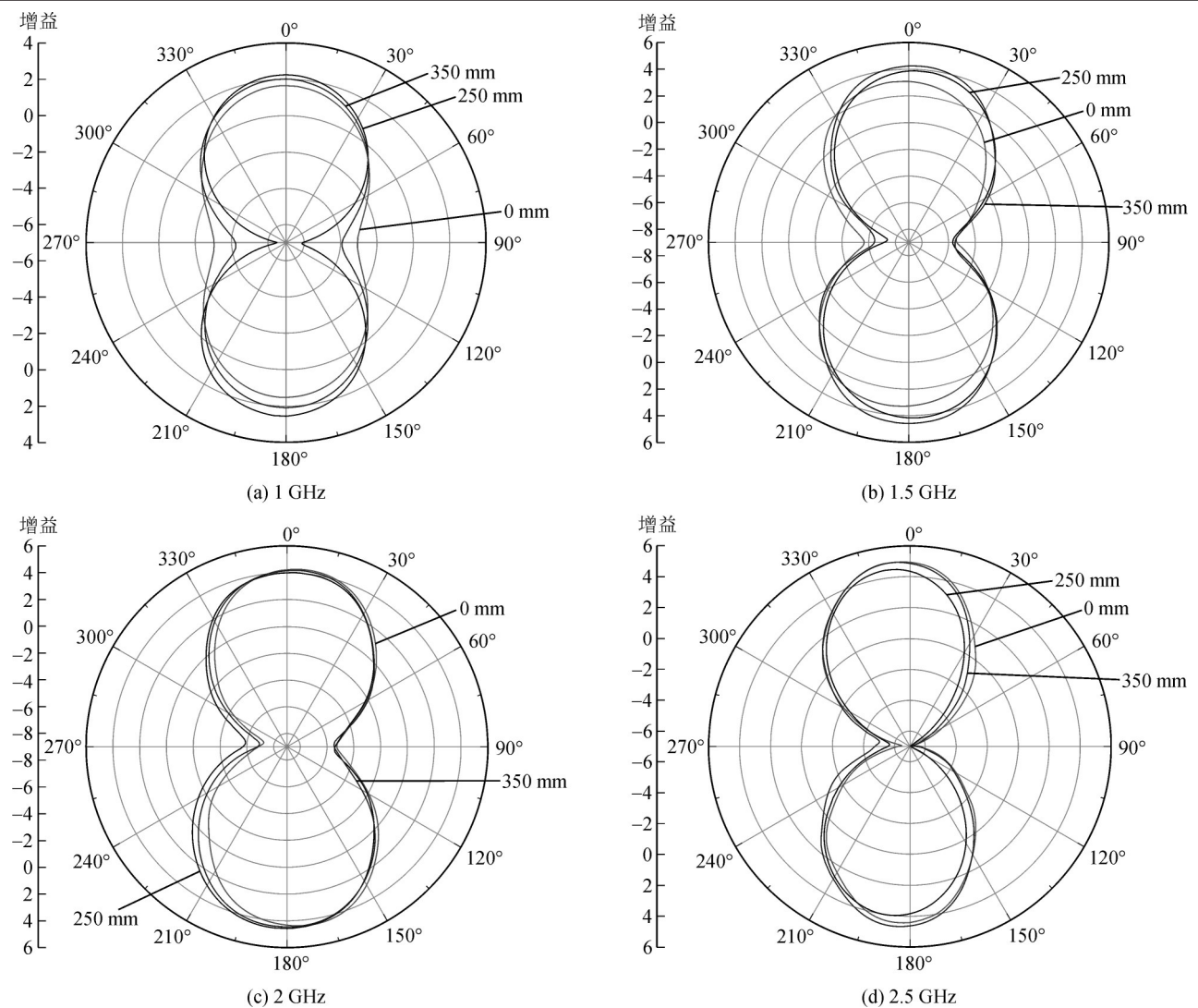


图 10 不同频点下H面方向图

Fig. 10 H-plane patterns at different frequencies

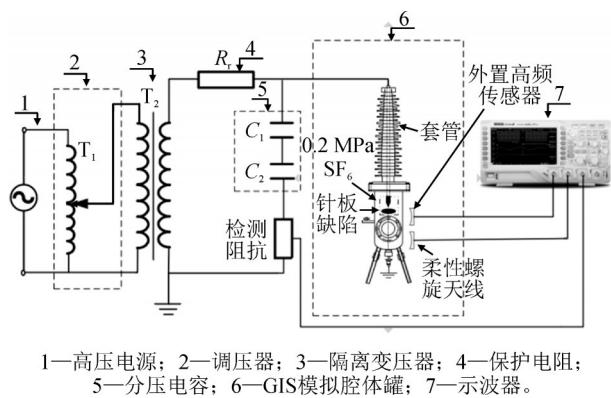


图 11 PD 试验电路图

Fig. 11 PD test circuit diagram

15 kV 电压, GIS 外壳(弯曲半径 140 mm)设置为接地。刚性基底内置天线为 FR-4 基底(厚度 2mm)以及表面铜层(厚度 0.1 mm)组合的简化模型。建模时使法兰盘向外伸出 60 mm, 天线模型位于法兰盘前端 30 mm 处。对于柔性基底内置天线, 实际安装时

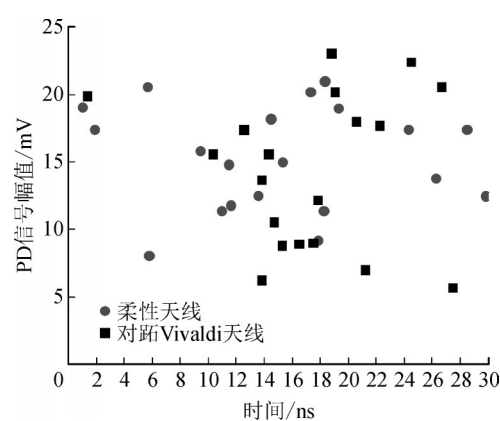


图 12 对比实验数据统计图

Fig. 12 Statistical chart of comparative experimental data

可以与 GIS 外壳共形, 简化模型结构图见图 15(右)。模型中高压导杆、GIS 外壳以及所施加电压与刚性基底模型保持一致。柔性基底内置天线为 PI 基底(模型中 PI 基底厚度为 1 mm, 实际柔性天线 PI 基底厚度为 0.27 mm, 这是因为增加基底厚度可以放大

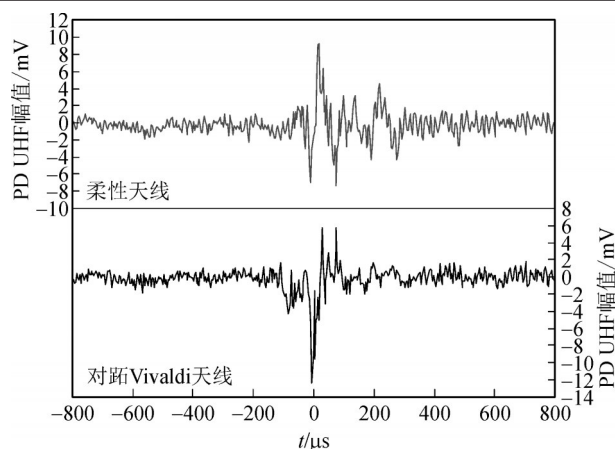


图13 两种UHF传感器PD检测性能对比

Fig. 13 Comparison of PD detection performance of two UHF Sensors

柔性天线内置后对GIS场强分布的影响,从而便于与刚性基底天线进行对比)以及表面铜层(厚度0.1 mm)组合的简化模型。

仿真了距离高压导杆轴线0~200 mm范围内两种模型GIS内部电场分布,同时仿真了无内置天线时GIS内部电场分布以便分析两种材质基底对电场分布的影响,仿真结果见图16。

由仿真结果可知,对于刚性基底天线,在仿真范围(0~200 mm)内,刚性基底天线GIS内部场强小于未放置天线时的场强,在刚性基底区域(171~173 mm)内电场小于25 kV/m。对于柔性基底天线,在距离高压导杆轴线0~117 mm范围内,柔性基底天线GIS内部场强与未放置天线时内部电场分布相同,在柔性基底区域(139~140 mm)处场强小于未放置天线时的场强。在建模过程中,为了更好的观察柔性基底对GIS内部电场分布的影响,柔性基底天线简化模型参数(PI厚度1 mm,表面铜层厚度0.1 mm)要大于柔性天线实际参数(PI厚度0.27 mm,表面铜层厚度0.018 mm),因此实际可认为柔性基底对GIS内部电场分布影响可以忽略。总体上,从图16可以看出,柔性基底天线内置保持GIS内部电场分布规律几乎没有变化,造成的影响远小于刚性基底天线内置对GIS内部电场分布造成的影响。

4.2 天线内置PD检测试验

将设计的柔性天线内置于GIS模拟腔体罐内以验证内置PD检测性能。由于实验所采用的GIS模拟腔体罐在设计时没有考虑内置天线的实验需求,将柔性天线贴合GIS模拟腔体罐内壁后无法对其进行完全密封,因此在GIS模拟腔体罐内填充0.1 MPa的空气进行内置PD检测实验,天线安装示意图见图17。

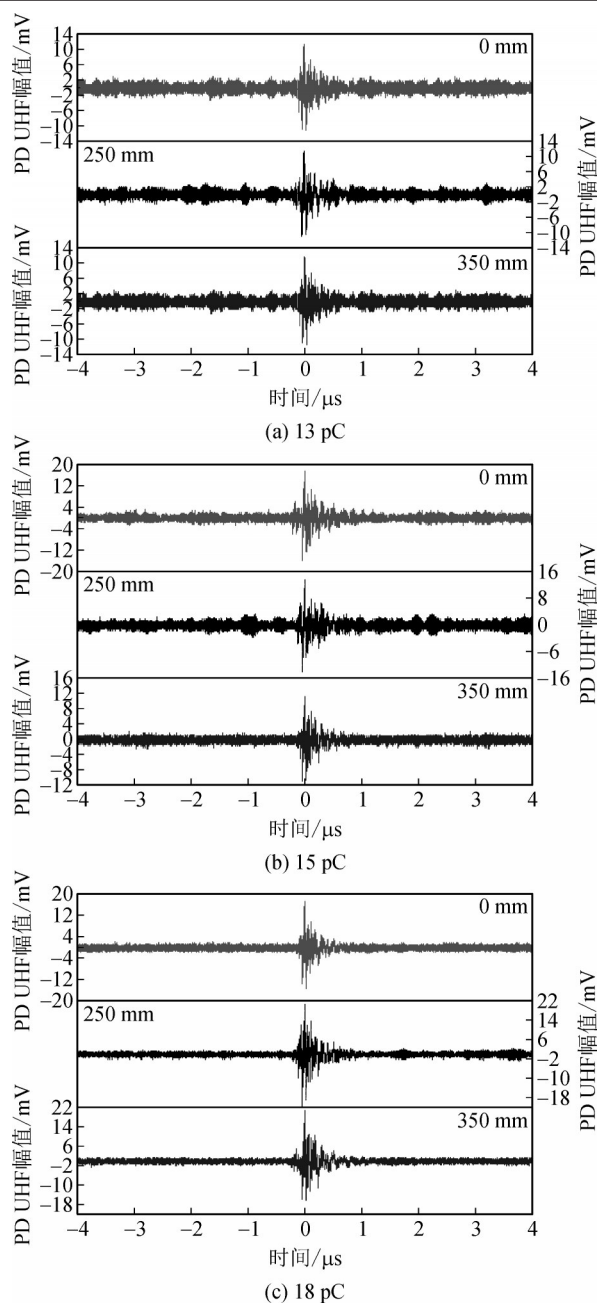


图14 3种PD等级下不同弯曲半径柔性天线采集信号波形图

Fig. 14 Different bending radius at three PD levels signal waveform collected by flexible antenna

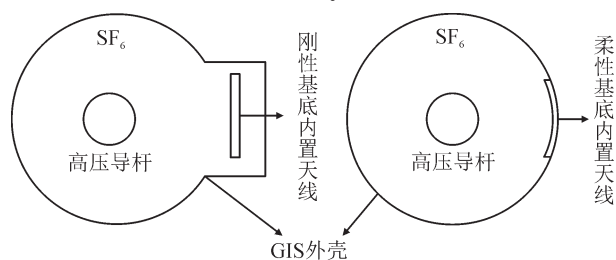


图15 简化模型结构图

Fig. 15 Simplified model structure diagram

当放电量为19.2 pC时,内置柔性天线测得的PD波形见图18。

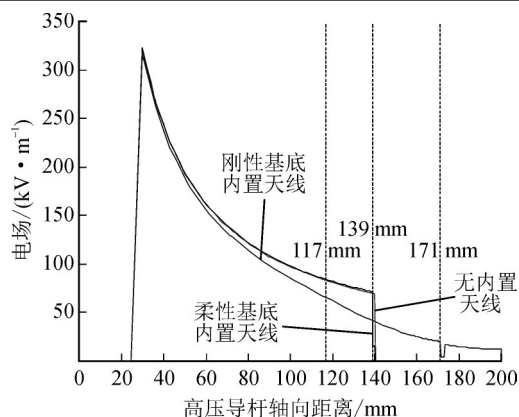


图16 GIS内部电场分布仿真

Fig. 16 Simulation of electric field distribution in GIS

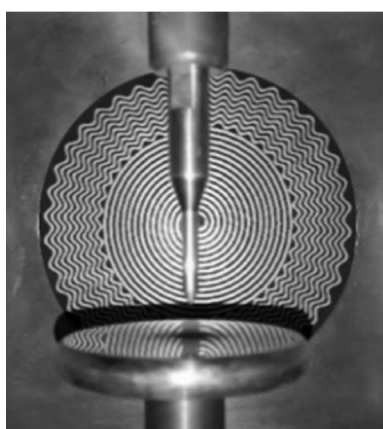


图17 内置实验天线安装示意图

Fig. 17 Installation diagram of built-in experimental antenna

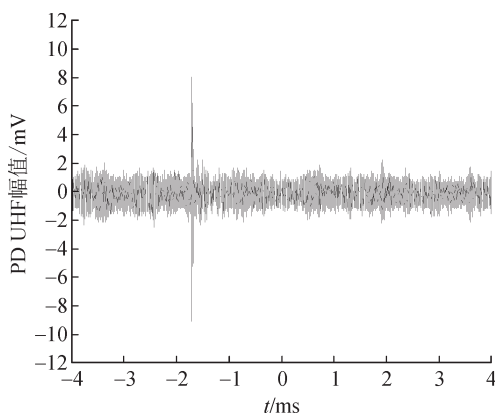


图18 内置实验PD波形图

Fig. 18 PD waveform of built-in experiment

从图18中可以看出,文中所设计柔性天线在内置后可有效实现PD信号的检测。另外,对比图14和图18可以看出,由于天线内置于GIS模拟腔体罐内部,对外部电磁干扰具有一定屏蔽作用,因此内置实验天线信噪比较高。

5 结论

针对现有GIS PD检测用刚性基底内置式天线

传感器的不足,文中开展新型GIS局部放电柔性内置阿基米德螺旋天线研究,引入PI柔性材料作为天线基底,采用幅值随幅角线性增加的正弦波加载方式以及曲折化巴伦对天线进行小型化处理,并通过实验对柔性天线PD检测性能进行验证,得出的结论如下:

1)在720 MHz~3 GHz频段内,采用幅值随幅角线性增加的正弦波加载方式对天线进行小型化,使天线径向长度缩小57.8%;采用曲折化巴伦对天线进行馈电,使巴伦长度缩小56.4%。仿真和实测结果表明,设计的柔性天线在不同弯曲程度下在720 MHz~3 GHz频段内 $VSWR \leq 5$;在1.02~3 GHz频段内 $VSWR \leq 2$;具有良好的双向辐射特性。

2)利用搭建的PD检测平台对柔性天线进行多项测试,测试结果表明,柔性天线在弯曲形变前后均可以明显检测到PD信号,证明了柔性天线进行PD检测的可行性。

参考文献:

- [1] 汪 帆,梁芳蔚,钟理鹏,等. 基于X射线短时照射的高压直流GIS/GIL绝缘子表面电荷主动消散方法[J]. 电工技术学报,2020,35(14):3147-3151.
WANG Feng, LIANG Fangwei, ZHONG Lipeng, et al. Active charge dissipation method for surface charge on the surface of dc GIS/GIL insulator based on short-time X-ray irradiation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3147-3151.
- [2] TUYET-DOAN V N, DO T D, TRAN-THI N D, et al. One-shot learning for partial discharge diagnosis using ultra-high-frequency sensor in gas-insulated switchgear[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5562.
- [3] 徐 洋,周电波,丁登伟,等. GIS盆式绝缘子表面缺陷的局部放电检测[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 101-106.
XU Yang, ZHOU Dianbo, DING Dengwei, et al. Detection of partial discharge induced by surface defect of GIS basin insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 101-106.
- [4] HAN Xutao, GUO Ruochen, SHEN Shuhang, et al. Study on the combined characteristics of UHF and optical signals induced by partial discharge at spacer surface in GIS[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(16): 3332-3337.
- [5] 杨 勇,邵先军,金涌涛,等. GIS盆式绝缘子结构对局部放电电高频信号泄漏特性的影响研究[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 95-101.
YANG Yong, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Influence of spacers structure on ultra-high frequency partial discharge signal leakage characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 95-101.

- [6] 杨帆,李雅海,卢文斌,等. 高压电气设备局部放电过程超高频信号监测方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11):55-60.
YANG Fan, LI Yahai, LU Wenbin, et al. Ultra - high frequency signal monitoring method for partial discharge process of high - voltage electrical equipment[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11):55-60.
- [7] 王赞,郑理威,陈忠贤,等. 基于光纤EFPI传感器的GIS局部放电研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 67-75.
WANG Zan, ZHENG Liwei, CHEN Zhongxian, et al. Research on partial discharge of GIS based on optical fiber EFPI sensor[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2):67-75.
- [8] 何金,陈荣,张驰,等. 基于多法向光电阵列的GIS同轴母线局部放电溯源方法及仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4):76-85.
HE Jin, CHEN Rong, ZHANG Chi, et al. Research on partial discharge tracing method and simulation of GIS coaxial bus based on multi normal photoelectric array[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4):76-85.
- [9] 韩世杰,吕泽钦,隋浩冉,等. 基于EFPI传感器的GIS局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 149-155.
HAN Shijie, LYU Zeqin, SUI Haoran, et al. Partial discharge pattern recognition in GIS based on EFPI sensor [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 149-155.
- [10] 何金,田涛,宋晓博,等. 基于特高频法的开关柜局部放电识别方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11):90-95.
HE Jin, TIAN Tao, SONG Xiaobo, et al. Research on partial discharge identification method of switchgear based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 90-95.
- [11] DARWISH A, REFAAT S S, ABU-RUB H, et al. PD signal propagation in GIS: Ultra-high frequency detection-based modeling[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9417-9426.
- [12] 辛文成,姚森敬,陈浩敏,等. 计及电磁模特高频信号的局部放电模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6):108-115.
XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6):108-115.
- [13] 谭巧,唐炬,曾福平. 检测气体绝缘组合电器局部放电的四频段微带单极子特高频天线设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 127-135.
TAN Qiao, TANG Ju, ZENG Fuping. Design of four fold-band micro - strip monopole antenna for partial discharge detection in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10):127-135.
- [14] 宁江涛. 基于对拓Vivaldi天线电力设备局部放电在线检测的一种UHF传感器研究[D]. 天津:天津大学, 2020.
NING Jiangtao. A UHF sensor for online partial discharge detection of power equipment based on antipodal Vivaldi antenna[D]. Tianjin:Tianjin University, 2020.
- [15] 李天辉,荣命哲,王小华,等. GIS内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18):5483-5493.
LI Tianhui, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Design, optimization and experiment study of internal UHF sensor for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18):5483-5493.
- [16] 陈璐,司文荣,傅晨钊,等. GIS局部放电检测用内置传感器影响因素研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11):103-108.
CHEN Lu, SI Wenrong, FU Chenzhao, et al. Study on influencing factors of inner sensors for GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):103-108.
- [17] 汲胜昌,王圆圆,李军浩,等. GIS局部放电检测用特高频天线研究现状及发展[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 163-172.
JI Shengchang, WANG Yuanyuan, LI Junhao, et al. Review of UIF antenna for detecting partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4):163-172.
- [18] 刘成,赵玉顺,罗义华,等. 局部放电检测用小型化宽带平面螺旋天线研究[J]. 南方电网技术, 2020, 14(9): 37-44.
LIU Cheng, ZHAO Yushun, LUO Yihua, et al. Miniaturization study on a wideband planar helical antenna for partial discharge detection[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(9):37-44.
- [19] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
LIN Changlu. Antenna engineering manual[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [20] LE Zuo, JIN Pan. Design of a compact broadband planar spiral antenna backed by an absorbing cavity[C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium. Singapore: PIERS-FALL, 2017:1009-1014.
- [21] 宋朝晖,李红梅,杨汉瑛,等. 曲折臂形式的阿基米德螺旋天线小型化研究[J]. 微波学报, 2009, 25(2):53-57.
SONG Chaohui, LI Hongmei, YANG Hanying, et al. Study on a miniaturized meander Archimedean spiral antenna[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2):53-57.
- [22] 王亚伟,王光明,梁建刚. 新型低剖面阿基米德螺旋天线设计[J]. 微波学报, 2012, 28(4):5-9.
WANG Yawei, WANG Guangming, LIANG Jiangang.

- on DC and AC flashover field-circuit model of ice-covered HV insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 13-19.
- [25] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.
- [26] 王 栋, 阮江军, 杜志叶, 等. 并行求解含有电位悬浮导体的静电场数值问题[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 131-136.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Parallel numerical computing of electrostatic field model of conductors with floating potential[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 131-136.
- [27] ILHAN S, OZDEMIR A, JAYARAM S H, et al. AC and transient electric field distributions along a 380 kV V-string insulator[C]//2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. USA: IEEE, 2012: 399-403.
- [28] 刘 刚, 胡倩楠, 陈锡阳. 由表面电导实现绝缘子污秽程度监测的可行性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1321-1326.
- LIU Gang, HU Qiannan, CHEN Xiyang. Feasibility analysis of monitoring the insulator surface contamination based on surface conductivity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1321-1326.
- [29] 张志劲, 程 洋, 赵佳尧, 等. XP-160绝缘子串人工与自然覆冰交流闪络特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2777-2784.
- ZHANG Zhijin, CHENG Yang, ZHAO Jiayao, et al. AC flashover performances of artificial icing and nature icing for XP-160 insulator string[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2777-2784.
- [30] GHOSH R, CHATTERJEE B, CHAKRAVORTI S. A novel leakage current index for the field monitoring of overhead insulators under harmonic voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1568-1576.
- 裴少通(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力设备智能巡检(E-mail: peishaotong@ncepu.edu.cn)。

(上接第24页)

- Design of a Archimedean spiral antenna with low-profile[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 5-9.
- [23] 杨校伟. 宽带小型化扼流结构及其天线应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- YANG Xiaowei. The study of broadband and miniaturized structure for current reduction and its antenna applications [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [24] 付靖娟, 姚 俊. 基于柔性PDMS柔性微带天线的制作与测试[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 88-90.
- FU Jingjuan, YAO Jun. Fabrication and test of flexible microstrip antenna based on flexible PDMS[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2021, 40(11): 88-90.
- [25] 郑博仁, 冯全源, 郑宗良. 一种基于聚酰亚胺的超宽带紧凑型柔性天线[J]. 应用科技, 2021, 48(3): 51-56.
- ZHENG Boren, FENG Quanyuan, ZHENG Zongliang. A novel polyimide-based compact flexible antenna for UWB applications[J]. Applied Science and Technology, 2021, 48(3): 51-56.
- [26] 杜成珠, 王 倩. 基于液晶聚合物基片的柔性双频天线[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 132-136.
- DU Chengzhu, WANG Qian. Dual-band flexible antenna based on liquid crystal polymer substrate[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 132-136.
- [27] ZHANG Guozhi, LI Cunhui, ZHANG Xiaoxing, et al. Optimized sleeve monopole antenna for detection of electrostatic charge radiation of spacecraft solar array[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(1): 015008.
- [28] 电力设备带电检测仪器技术规范第8部分: 特高频法局部放电带电检测仪器技术规范: Q/GDW 11304. 8—2015[S]. 2015.
- Technical specification for energized test device of electrical equipment part 8: Technical specifications for ultra-high frequency partial discharge: Q/GDW 11304. 8—2015[S]. 2015.
- 张国治(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备绝缘状态新型监测技术研究和相关装置的研发(E-mail: youzg@163.com)。
- 张晓星(1972—), 男, 博士, 教授, 博导, 长江学者, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断、绝缘状态评估、新型传感器技术以及SF₆替代气体等方面研究(E-mail: xiaoxing.zhang@outlook.com)。