

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.08.017

GIS局部放电光、电信号传播特性对比研究

庞先海¹, 顾朝敏¹, 路士杰¹, 董 驰¹, 李天辉¹, 韩旭涛²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: GIS局部放电是造成绝缘材料劣化、电气设备故障的主要原因,检测GIS腔体内部的局部放电情况,有助于保证电力系统的安全可靠运行。然而在实际工程中,GIS内部结构较为复杂,不同弯角和绝缘子结构必然会对电磁波和光信号的传播特性产生一定的影响。文中根据252 kV GIS的结构尺寸,建立仿真模型,研究不同距离、不同弯角结构、不同绝缘子下电磁波和光信号传播特性的差异,得到电磁波和光信号在设备腔体内部的变化规律。仿真结果表明,随着与放电源距离的增大,电磁波信号在400 mm以外电场强度幅值近似呈线性衰减趋势,光信号强度整体呈指数衰减的趋势;L型、T型弯角结构对电磁波和光信号均有较强的衰减,但电磁波在弯角结构中反射严重,原始波与反射波叠加会造成信号强度增加;放电信号在经过不同绝缘子结构时,光信号的衰减远大于电磁波信号,盆式绝缘子比圆盘式对电磁波信号的衰减作用更大,光信号的传播依赖于开孔的大小。文中的研究为实际特高频、光传感器的安置提供一定的理论指导。

关键词: GIS; 局部放电; 特高频法; 光检测法; 传播特性

Comparative Study on Propagation Characteristics of Optical and Electrical Signals During Partial Discharge in GIS

PANG Xianhai¹, GU Chaomin¹, LU Shijie¹, DONG Chi¹, LI Tianhui¹, HAN Xutao²

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Partial discharge of GIS is the main cause of degradation of insulation material and fault of electrical equipment. Detection of partial discharge inside the GIS compartment is helpful to ensure safe and reliable operation of power system. However, in practical project, the internal structure of GIS is more complex, and different bending angles and insulator structures will inevitably have a certain impact on the propagation characteristics of electromagnetic waves and optical signals. In this paper, according to the structure size of 252 kV GIS, a simulation model is set up to study the difference of electromagnetic wave and optical signal propagation characteristics under different distances, different corner structures and different insulators, and the variation of electromagnetic wave and optical signal inside the equipment compartment is obtained. The simulation results show that with the increase of the distance from the discharge source, the amplitude of the electric field intensity of the electromagnetic wave signal away from 400 mm is approximately linearly attenuated and the intensity of the optical signal is exponentially attenuated. The L-shaped and T-shaped corner structures have strong attenuation to electromagnetic wave and optical signal, but the electromagnetic wave is seriously reflected in the corner structure, and the superposition of the original wave and the reflected wave will cause the signal intensity to increase. When the discharge signal passes through different structures of insulators, the attenuation of optical signal is much greater than that of electromagnetic wave signal. The attenuation effect of spacer insulator to electromagnetic wave signal is greater than that of disc insulator, and the propagation of optical signal depends on the size of opening. The research in this paper provides some theoret-

收稿日期:2023-03-19; 修回日期:2023-05-21

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2022-063)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.(kj2022-063).

ical guidance for the placement of actual UHF and optical sensors.

Key words: GIS; partial discharge; ultra-high frequency method; optical detection method; propagation characteristics

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)具有运行可靠、检修时间长、占地面积小、绝缘性能高等优点,极大程度上缓解了由于传统电气设备体积大而占用城市建设用地的状况^[1-3]。自60年代问世以来,GIS发展迅速,被应用于全国的电力系统^[4-6]。与此同时,由GIS电气设备引起的电力绝缘故障也随之增加^[7-10]。局部放电是造成绝缘材料劣化、电气设备故障的重要征兆和表现形式,检测GIS腔体内部的局部放电情况,能有效反映GIS电气设备内部诸多的潜在缺陷和绝缘故障^[11-18]。

随着学者们对于局部放电机理的深入研究,目前应用于实际工程的局部放电检测手段众多,例如脉冲电流法、特高频法、超声波法、化学检测法和光测法。特高频法可避开现场低频的电磁干扰信号,抗干扰能力强,灵敏度高;光测法具有较高的灵敏度,且不受电磁干扰的影响,不影响电气设备的运行,非常适合用于电气设备的在线监测,拥有广阔的应用前景^[19-20]。

国内外学者围绕GIS局部放电的特高频和光检测法开展了大量研究,然而在实际工程中,GIS内部结构较为复杂,不同弯角和绝缘子结构必然会对电磁波和光信号的传播特性产生一定的影响。基于以上情况,文中根据252 kV GIS的结构尺寸,建立仿真模型,研究不同距离、不同弯角结构、不同绝缘子下电磁波和光信号传播特性的差异,得到电磁波和光信号在设备腔体内部的变化规律,为传感器的安置提供一定的理论指导。

1 GIS局部放电特高频法与光测法

1.1 特高频法

绝缘材料在产生放电时,往往伴随着电磁波信号的发出,电磁波沿着外壳和主导体形成的同轴结构进行传播,且电磁波信号中包含的频率分量丰富,频率可达数GHz^[21-23]。因此,工程中常利用内置或外置的特高频传感器来检测局部放电的电磁波信号,进而判断电力设备的绝缘状态。

经过30多年的发展,国内外学者对于特高频信号产生的原理、传播特性、各种传感器的开发、故障

源的定位等方面进行了充分的研究,取得了丰富的成果。20世纪80年代初,英国PEARSON和HAMPTON等人将特高频传感器置于GIS设备内部,并对420 kV实体GIS开展局部放电监测系统的试验研究,试验结果表明内置式特高频传感器具有较高的检测灵敏度^[24]。德国斯图加特大学KURRER等人对GIS腔体内局部放电特性进行了试验研究,结果表明电磁波信号在GIS腔体中传播时绝缘子结构相较于弯角结构对信号的传播具有更强的衰减作用^[25]。

西安交通大学邱毓昌等人对GIS放电脉冲的不同电磁分量在同轴结构中的传播特性进行了仿真和试验研究,试验结果表明脉冲信号在同轴结构中不但能激发横电磁波,而且还能激发横磁波、横电波以及彼此的高次模波,横磁波和横电波可在GIS腔体中相互作用产生谐振,谐振的持续时间比脉冲信号的持续时间长得多;通过仿真发现利用不同位置电磁波的传播时间不同可对局部放电的故障源进行定位,且准确度较高,为后续故障源定位的研究打下理论基础^[26]。

1.2 光测法

当电力设备内部发生局部放电时,气体分子在高场强作用下发生电离,电离产生的光子在设备内部进行传播,就形成了光信号。因此,通过光检测法对电气设备内光信号进行收集和分析,便可实现对局部放电情况的监测^[27]。由于不受现场电磁、振动信号的影响,光测法有较强的抗干扰能力和较高的灵敏度,非常适合用于电气设备的在线监测,拥有广阔的应用前景。

加拿大学者BAMJI S S等人利用光测法对聚乙烯的老化绝缘放电进行试验分析,结果表明电场作用下材料的绝缘特性会发生突变,当试验所加电压高于材料发生起始放电电压时,绝缘材料开始劣化,材料的绝缘性能逐渐下降^[28]。1984年,日本秋田大学YOSHIMURA N等人利用光测法对有机绝缘材料的放电状况进行了试验,并对材料放电所发出的光信号进行光谱分析,试验表明电晕放电产生的光谱主要集中在400 nm以下范围,结合气体放电分析指出,该谱线是由空气中氮分子的能量转换产生的,且材料的分子结构会对电晕放电所发出的光谱分布产生影响^[29]。

清华大学魏念荣等人自主设计了多种类型的光纤传感器,并基于此搭建了局部放电光信号检测装置,对高压电机中绝缘放电故障进行检测,试验结果表明光纤传感器输出信号的频率和幅值可在一定程度上反映电机中局部放电的强弱,且光纤传感器对定子中绝缘材料放电程度的检测具有较高灵敏度^[20]。西安交通大学韩旭涛等人实现了光纤传感器与内置特高频传感器的结合,并基于此开展实体GIS局部放电检测试验,试验结果表明荧光光纤的信号幅值与缺陷的放电呈线性关系,且在同轴结构中光信号幅值呈现每厘米约2.2%的衰减^[30]。

2 模型设置

2.1 模型结构

参照252 kV的GIS直筒型结构,用三维仿真软件CREO6.0构建两节导通圆柱体组合成模型,内导杆的直径为100 mm,外壳导体的直径为500 mm,壳厚度为10 mm,腔体长度为3 000 mm,模型以模拟较长GIS结构中的一部分,见图1。

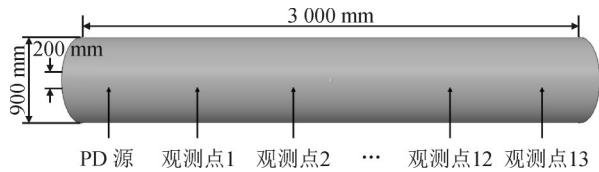


图1 直筒型GIS仿真模型及尺寸

Fig. 1 Simulation model and size of straight cylinder GIS

在GIS腔体内部存在有诸多弯角结构。L型和T型分支结构便是典型的弯角结构。当GIS发生局部放电时,产生电磁波光信号经过弯角结构后,由于弯曲处的反射严重,传播信号必然会受到衰减。为探究弯角结构对GIS中放电信号传播衰减特性的影响,文中设计了L型、T型分支结构,见图2。

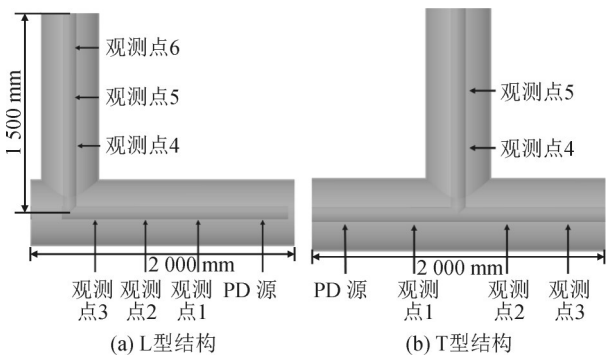


图2 GIS弯角结构仿真模型

Fig. 2 GIS corner structure simulation model

作为GIS结构的重要部分,绝缘子通常由环氧树脂制成,起到支撑和绝缘的作用。电磁波在GIS传播过程中,可以穿过绝缘子投射到绝缘子另一端

的空间中,然而光信号经过绝缘子后信号幅值便会受到大幅衰减。为探究绝缘子结构对GIS中放电信号传播衰减特性的影响,文中设计了圆盘式绝缘子和盆式绝缘子结构,见图3。

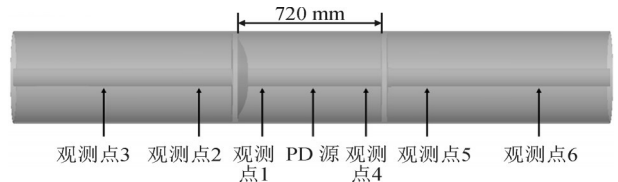


图3 GIS绝缘子结构仿真模型

Fig. 3 GIS insulator structure simulation model

2.2 仿真设置

文中基于时域有限差分(finite differential in time domain, FDTD)法对局部放电产生的电磁波信号在GIS内的传播特性展开研究,采用有限元法对局部放电光信号的传播特性进行计算,并对电磁波和光信号在设备腔体内部的变化规律进行对比分析。

FDTD计算电磁波信号特性时,将模型的导杆、外壳均设置为良导体材质,边界条件设置为完美匹配层(perfectly matched layer, PML),吸收边界设为7层,绝缘子相对介电常数设为3.8,电导率设为0,将网格尺寸剖分为10 mm×10 mm×10 mm。在内导体外壁上设置探针天线,作为模拟的局部放电源。探针长度保证与网格尺寸宽度相同,方向为由内导体指向外壳,并靠近内导体。理想高斯脉冲作为天线的激励源,模拟局部放电的发生,理想高斯脉冲的脉宽为1 ns、幅值为1 A。为了模拟较长GIS结构中的一部分,腔体两端设为开通。理想高斯脉冲时域、频域波形图见图4。

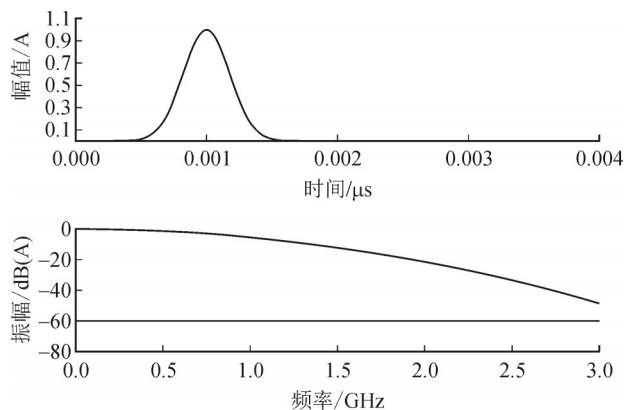


图4 理想高斯脉冲时域、频域波形图

Fig. 4 Time domain and frequency domain waveforms of ideal Gaussian pulse

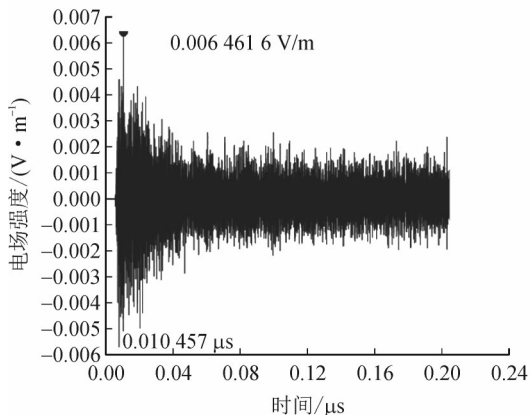
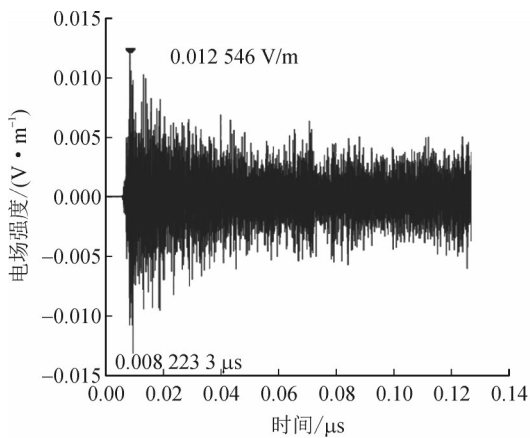
有限元法计算光信号特性时,在内导体处设置脉冲形式的点光源,以模拟局部放电发生时光信号的传播。仿真中设置模拟点光源以球面形式均匀向外界发射光子,光子数为1 000个,光子在碰撞外

壳后发生漫反射。根据文献, GIS 不同类型缺陷局部放电产生的光信号波长一般集中在 300~500 nm 范围内, 因此设定光信号波长为 400 nm。沿轴向等距离放置圆面以模拟光传感器, 记录不同光传感器接收到的总光子数以及光子在腔体内的运动轨迹。

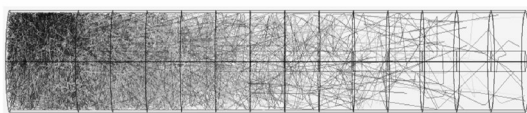
3 电磁波与光信号传播特性对比分析

3.1 直筒型结构

在轴线方向上等距离放置特高频与光信号传感器, 以接收放电电源产生的信号, 其中电磁波信号通过外壳上的天线进行接收, 光信号通过等距离的圆面捕获光子。局部放电信号沿轴向传播情况见图 5。通过检测得到的电场强度幅值与光子数分别表征电磁波信号与光信号的强弱, 进而探究轴向距离对电磁波、光信号传播特性的影响, 不同观测点接收到的放电信号强度见图 6。



(a) 轴向测得电磁波信号的传播场强时域图



(b) 轴向测得光信号的传播轨迹图

图 5 局部放电信号沿轴向传播情况

Fig. 5 The propagation of partial discharge signal along the axial direction

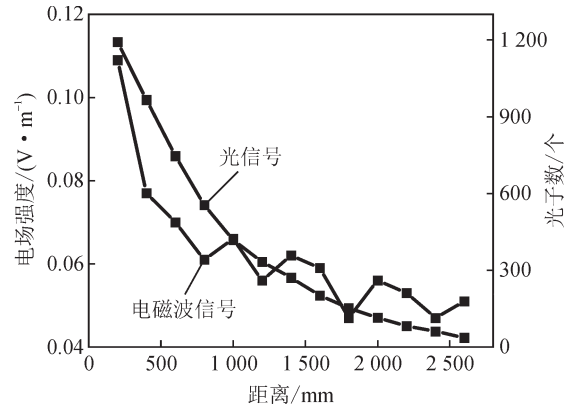


图 6 不同观测点放电信号随距离变化曲线

Fig. 6 The curve of discharge signal with distance at different observation points

当放电源位置固定时, 在直筒型 GIS 结构传播时, 不同轴向的传感器接收到的放电信号强度有明显的不同。对于电磁波信号, 随着距离的增大, 电场强度幅值逐渐衰减, 且电磁波信号在距离放电源近的地方衰减迅速, 在 400 mm 以外, 电场强度幅值近似呈线性衰减趋势。由于最终波形是由 GIS 腔体中的原波和反射波叠加而成, 因此电磁波信号在 GIS 传播中的电场强度最大值并不总是减少, 而是呈现振荡衰减的过程。对于光信号, 随着与放电源距离的增加, 光传感器接收到的光子数逐渐减少, 且光信号在靠近光传感器的位置衰减较大, 光信号强度整体呈指数衰减趋势。对比电磁波、光信号的变化趋势, 可以发现两种信号在轴向上的衰减趋势略有差异, 在距离放电源 1 000 mm 以内的位置时电磁波信号的衰减强度大于电磁波信号, 在较远位置时光信号衰减较多。

3.2 L型弯角结构

为了探究 L 型弯角结构对 GIS 中电磁波、光信号传播衰减特性的影响, 文中基于 L 型分支结构模型, 将一端设为封闭, 如图 2(a) 设置放电源激励与传感器的相对位置, 根据各观测点的电场强度时域波形图和光子捕获图, 统计各观测点测得的电场强度幅值和总光子数, 不同观测点接收到的放电信号强度见图 7。

由图可知, 经过 L 型弯角结构对电磁波和光信号均有较强的衰减。对比电磁波、光信号的变化趋势, 可以发现光信号衰减强度始终大于电磁波信号, 光信号在经过 L 型分支结构后衰减了 65.7%, 电磁波信号在经过 L 型分支结构后衰减了 58.6%。

在经过 L 型弯角结构之前的测量点 3 处的电场强度较高, 这是因为在测量点 3 处内部结构复杂, 原始电磁波和电磁波在该点周围边界反射的波叠加, 使得测得的电场强度比原电场强度大。

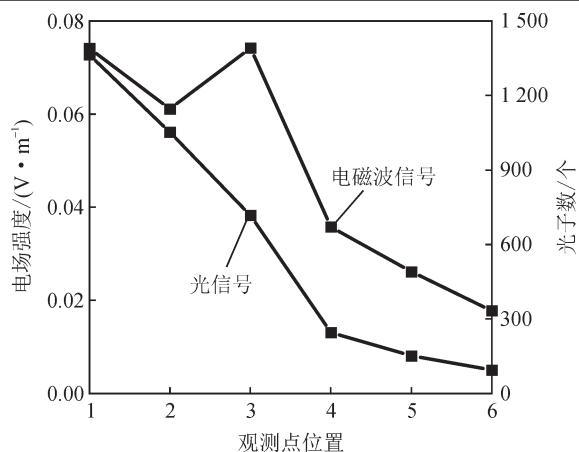


图7 L型结构中各观测点场强变化曲线

Fig. 7 The change curve of discharge signal intensity at each observation point in L-shaped structure

3.3 T型弯角结构

T型分支结构由一条直臂和一条垂直支臂组成,当GIS发生局部放电时,产生的放电信号经过T型结构,由于弯曲处的反射严重,传播到直臂一端和垂直臂一端上的信号可能会产生不同程度的衰减。为了探究T型弯角结构对GIS中电磁波、光信号传播衰减特性的影响,文中基于T型分支结构模型,将两端口设为开通,如图2(b)设置放电源激励与传感器的相对位置,根据各观测点的电场强度时域波形图和光子捕获图,统计各观测点测得的电场强度幅值和总光子数,不同观测点接收到的放电信号强度见图8。

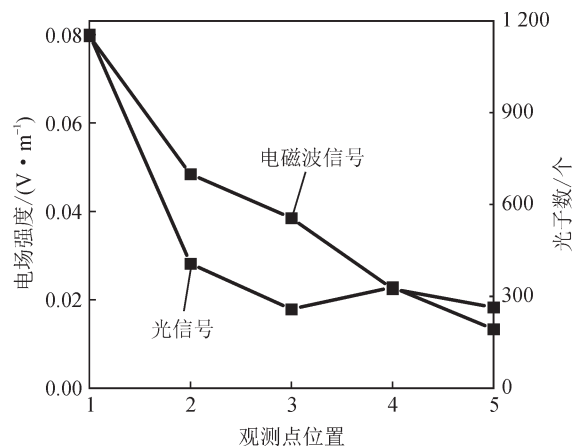


图8 T型结构中各观测点放电信号强度变化曲线

Fig. 8 The change curve of discharge signal intensity at each observation point in T-shaped structure

由图8可知,经过T型弯角结构对电磁波和光信号均有较强的衰减。对于电磁波信号,在经过T型弯角结构后,传播到直臂另一端场强幅值减少了39.2%,传播到垂直臂场强幅值减少了71.8%;对于

光信号,在经过T型弯角结构后,传播到直臂另一端场强幅值减少了64.7%,传播到垂直臂场强幅值减少了71.4%。由此可知,放电信号在经过T型弯角结构时,电磁波信号传播至垂直臂上的衰减比传播至直臂另一端上的衰减大得多,这是因为T型弯角结构垂直臂的上端存在有一定的封闭结构,电磁波在此处发生反射、叠加,使得该处衰减较直臂小。而光信号传播至垂直臂上的衰减与传播至直臂另一端上的衰减大致相同。上述仿真结果表明电磁波信号在腔体内折、反射作用更为严重,距离是光信号强度衰减的主要因素。

3.4 绝缘子结构

对于GIS内部的绝缘子,电磁波在传播过程中可以穿过绝缘子投射到另一端的空间中,而光信号的光子只能穿过带有气孔的绝缘子。根据实际工程,目前GIS实体多采用圆盘式绝缘子,对于252 kV以上的GIS一般采用盆式绝缘子。由于构造上的不同,不同类型的绝缘子对于电磁波、光信号在电气设备中的传播造成不同的干扰。文中通过分别构造了厚度、直径均相同的带有气孔的圆盘式绝缘子和盆式绝缘子,将两个绝缘子置于同一个GIS的腔体不同位置,如图3设置放电源激励与传感器的相对位置,根据各观测点的电场强度时域波形图和光子捕获图,统计各观测点测得的电场强度幅值和总光子数,不同观测点接收到的放电信号强度见图9。

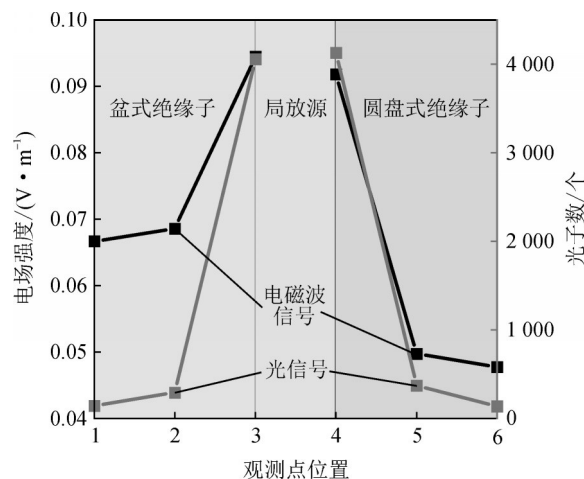


图9 绝缘子结构中各观测点放电信号强度变化曲线

Fig. 9 The change curve of discharge signal intensity at each observation point in insulator structure

由图9可知,两种类型绝缘子对电磁波和光信号均有较强的衰减,且衰减幅度远大于弯角结构。

对于电磁波信号,在经过圆盘式绝缘子后,场强幅值减少了27.4%;在经过盆式绝缘子后,场强幅值减少了45.8%。对于光信号,在经过圆盘式绝缘子后,总光子数减少了92.8%;在经过盆式绝缘子后,总光子数减少了91.0%。由此可知,放电信号在经过绝缘子结构时,光信号的衰减远大于电磁波信号。电磁波信号在经过相同厚度、材料、不同构造的绝缘子时,盆式绝缘子比圆盘式绝缘子对电磁波信号的衰减作用更大。光信号在经过相同厚度、材料、开孔,不同构造的绝缘子时,二者衰减作用相差不大,考虑是因为光信号的传播依赖于开孔的大小,绝缘子构造的差异对光子的反射和传播影响较小。

4 结论

文中基于实体252 kV GIS的结构尺寸,建立仿真模型,研究不同距离、不同弯角结构、不同绝缘子结构下电磁波和光信号传播特性的差异,得到电磁波和光信号在设备腔体内部的变化规律,得出以下结论:

1)随着与放电源距离的增大,电磁波、光信号强度逐渐衰减,且在放电源附近的地方衰减迅速。对于电磁波信号,在400 mm以外电场强度幅值近似呈线性衰减趋势;对于光信号,总光子数整体呈指数衰减的趋势。在距离放电源1 000 mm以内的位置时,电磁波信号的衰减强度大于光信号,在较远位置时光信号衰减较多。

2)L型弯角结构对电磁波和光信号均有较强的衰减。光信号衰减强度始终大于电磁波信号,光信号在经过L型分支结构后衰减了65.7%,电磁波信号在经过L型分支结构后衰减了58.6%。电磁波在弯角结构中反射严重,原始波与反射波叠加造成信号强度增加。

3)T型弯角结构对电磁波和光信号均有较强的衰减。电磁波信号传播至垂直臂上的衰减比传播至直臂另一端上的衰减大得多,而光信号传播至垂直臂上的衰减与传播至直臂另一端上的衰减大致相同。

4)放电信号在经过绝缘子结构时,光信号的衰减远大于电磁波信号。电磁波信号在经过相同厚度、材料、不同构造的绝缘子时,盆式绝缘子比圆盘

式绝缘子对电磁波信号的衰减作用更大。光信号在经过相同厚度、材料、开孔,不同构造的绝缘子时,二者衰减作用相差不大,证明光信号的传播依赖于开孔的大小。

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] 陈飞. GIS设备的发展和应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
CHEN Fei. Research on the development and application of GIS equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [3] 汪 飒,邱毓昌. 气体绝缘开关装置(GIS)的近期发展动向[J]. 电网技术,2003,27(2):54-57.
WANG Feng, QIU Yuchang. Recent development trend of gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 54-57.
- [4] 翁利民,顾振江. SF₆气体绝缘全封闭组合电器的结构与应用[J]. 江苏电器,2003(4):22-25.
WENG Limin, GU Zhenjiang. The structure, design and application of SF₆ GIS[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2003(4): 22-25.
- [5] 黄训诚,和 萍,崔光照,等. 中国智能电网发展述评、展望与建议[J]. 轻工学报,2016,31(2):54-65.
HUANG Xuncheng, HE Ping, CUI Guangzhao, et al. Review, prospect and suggestions on the development of smart grid in China[J]. Light Industry Journal, 2016, 31(2): 54-65.
- [6] 王海斌,张文兵. 紧凑型成套开关设备国内外发展水平[J]. 高压电器,2012,48(6):103-108.
WANG Haibin, ZHANG Wenbing. Overview on development of compact switchgear assemblies at home and abroad [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 103-108.
- [7] 王艳新,闫 静,王建华,等. 基于域对抗迁移卷积神经网络的小样本GIS绝缘缺陷智能诊断方法[J]. 电工技术学报,2022,37(9):2150-2160.
WANG Yanxin, YAN Jing, WANG Jianhua, et al. Intelligent diagnosis for GIS with small samples using a novel adversarial transfer learning in convolutional neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,

- 37(9):2150-2160.
- [8] 王克胜,赵彦平,原 帅,等.基于电场计算及模态分析的220 kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(8):32-38.
WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 32-38.
- [9] 臧 旭,马宏忠,吴金利,等.基于振动原理的GIS母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(9):12-20.
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.
- [10] 吴旭涛,赵晋飞,马云龙,等.基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022,43(4):108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [11] 司文荣,李军浩,袁 鹏,等.气体绝缘组合电器多局部放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):119-126.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Detection and identification techniques for multi-PD source in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 袁文海,刘 彪,徐 浩,等.基于复合神经网络的GIS局放故障类型识别[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(4):157-164.
YUAN Wenhai, LIU Biao, XU Hao, et al. Partial discharge fault type identification of GIS based on composite neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 157-164.
- [15] 宋 辉,代杰杰,李 喆,等.运行条件下GIS局部放电严重程度评估方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1231-1240.
SONG Hui, DAI Jiejie, LI Zhe, et al. An assessment method of partial discharge severity for GIS in service[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1231-1240.
- [16] 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.
- [17] 陈予伦,常丁戈,杨鼎革,等.GIS中金属微粒诱发沿面局部放电发展过程的研究[J]. 电力工程技术,2021,40(3):153-158.
CHEN Yulun, CHANG Dingge, YANG Dingge, et al. PD creeping discharge development process induced by metallic particles in GIS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 153-158.
- [18] 王彦彪,陈振勇,郭文萍,等.基于双注意力机制优化CNN架构的GIS局部放电模式识别[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):22-29.
WANG Yanbiao, CHEN Zhenyong, GUO Wenping, et al. PD pattern recognition for GIS based on CNN architecture optimized by the double attention mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 22-29.
- [19] 何 平,袁 鹏,李军浩,等.电力变压器局部放电特高频检测方法的对比研究[J]. 陕西电力,2012,40(10):12-15.
HE Ping, YUAN Peng, LI Junhao, et al. Comparative study of UHF detection method for power transformer partial discharge[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(10): 12-15.
- [20] 魏念荣,张旭东,曹海翔,等.用荧光光纤技术检测局部放电信号传感器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(3):329-332.

- WEI Nianrong, ZHANG Xudong, CAO Haixiang, et al. Study of fluorescent fiber sensors for partial discharge detection[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(3): 329-332.
- [21] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA, et al. Study of partial discharge radiated electromagnetic wave propagation characteristics in an actual 154 kV model GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 8-17.
- [22] DARWISH A, REFAAT S S, TOLLYAT H A, et al. On the electromagnetic wave behavior due to partial discharge in gas insulated switchgears: State - of - art review[J]. IEEE Access, 2019(7): 75822-75836.
- [23] HIKITA M, OHTSUKA S, MATSUMOTO S. Recent trend of the partial discharge measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2007, 2(5): 504-509.
- [24] HAMPTON B F, MEATS R J. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1988, 135(2): 137-144.
- [25] KURRER R, FESER K. The application of ultra - high - frequency partial discharge measurements to gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 777-782.
- [26] 王建生, 邱毓昌, 赵有斌, 等. 气体绝缘开关中电磁波的传播特性[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 1-3.
WANG Jiansheng, QIU Yuchang, ZHAO Youbin, et al. Propagation characteristics of electromagnetic waves in GIS [J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 1-3.
- [27] MANGERET R, FARENC J, AI B, et al. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 783-789.
- [28] 徐 阳, 喻 明, 曹晓珑, 等. 局部放电光脉冲测量法及与电测法的比较[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 3-5.
XU Yang, YU Ming, CAO Xiaolong, et al. Optical pulse method for partial discharge measurement and the comparison with electrical current method[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 3-5.
- [29] YOSHIMURA N, NISHIDA M, NOTO F. Light emission from tracking discharges on organic insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, EI - 19(2): 149-155.
- [30] 韩旭涛, 刘泽辉, 李军浩, 等. 基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6760-6769.
HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Research on GIS PD detection method based on photoelectric composite sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6760-6769.

庞先海(1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力设备状态检测与评估技术(E-mail: 544165026@qq.com)。