

DOI: 10.7652/xjtuxb201806019

GIS 中局部放电光信号传播特性仿真研究

韩旭涛¹, 刘泽辉¹, 张亮¹, 李军浩¹, 杨景刚²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 210003, 南京)

摘要: 为了探究传播距离、结构、接收角度、部件等因素对气体绝缘组合电器(GIS)局部放电光信号传播特性的影响规律,根据实际 GIS 结构尺寸,建立仿真模型。研究了不同距离、不同 GIS 结构、不同放电源位置以及存在带通气孔绝缘子的条件下,光学传感器接收光子数和光通量的变化规律。结果表明:传感器接收的总光子数和最大光通量随着光信号传播距离的增加而减小;传播距离相同时,L 型结构中传感器接收的光子数和光通量约为直线型结构的 55%,T 型结构约为直线型结构的 35%;放电源位于导杆四周不同位置时,传感器正对放电源时检测到的总光子数和最大光通量最大,其他角度下检测结果相似,放电源位于外壳四周时,传感器检测到的光信号相差不大;光信号通过带通气孔的盆式绝缘子时,相同距离下传感器接收的光子数仅为不存在绝缘子时的 14%,光信号明显减弱。

关键词: 气体绝缘组合电器;局部放电;光学传感器;光通量

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)06-0128-07

Simulation for Propagation Characteristics of Optical Signals Excited by Partial Discharge in GIS

HAN Xutao¹, LIU Zehui¹, ZHANG Liang¹, LI Junhao¹, YANG Jinggang²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A simulation model is constructed according to the real size and structure of a physical GIS (gas insulator switchgear) to analyze the effects of propagation distance, structure, receiving angle and component on the characteristics of optical signals excited by partial discharge in GIS. The photon amount and luminous flux detected by optical sensor under the conditions of different distance, different GIS structure types, different positions of discharge source and existing insulator with air hole are investigated. It is found that the photon amount and luminous flux decrease with the increasing distance between optical sensor and discharge source. The photon amount and luminous flux detected by the sensor in the L type GIS reach 55% and 35% in the T type GIS of that in the line type GIS. The photon amount and luminous flux detected by the sensor both are the largest when the discharge source directly faces the sensor. The results are similar when the discharge source is at the other positions. When light signal propagates through the insulator with air hole, the photon amount is only 14% of that through one without insulator.

Keywords: gas insulator switchgear; partial discharge; optical sensor; luminous flux

收稿日期: 2017-09-18。 作者简介: 韩旭涛(1991—),男,博士生;李军浩(通信作者),男,副教授。

网络出版时间: 2018-02-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180202.1838.004.html>

当电力设备内部存在绝缘缺陷时,由于电场的局部畸变,会在局部发生击穿,产生局部放电信号。局部放电既是引起绝缘劣化的主要原因,也是绝缘劣化的重要征兆。所以,通过检测或监测电力设备中的局部放电信号,可以及时发现其内部绝缘缺陷,避免发生故障,保证电力设备安全运行^[1-3]。当电力设备内部发生局部放电时,会向外辐射光信号,光检测法通过检测光信号而达到检测局部放电的目的。局部放电光测法作为一种非电量检测方法,不受电气信号干扰,拥有广阔的应用前景。气体绝缘组合电器(GIS)为完全密封结构,所以光测法非常适用于其内部的局部放电检测。

通过光测法检测 GIS 中的局部放电,首先需要将光传感器安全地植入 GIS 内部。将光传感器和 GIS 内置特高频传感器相结合可有效解决这一难题^[4]。目前,关于光测法大多为实验室的研究,随着光学传感器的发展以及传感器植入设备内部难题的解决,推动了光测法的现场应用。针对光测法的研究主要集中在光学传感器研制^[5-8]、缺陷模型光脉冲检测^[9-13]、光电信号关系分析^[14-15]、光学检测结果分析^[16]以及局部放电光谱分析等方面^[17-18],而对于 GIS 中光信号的传播特性仍未有相关研究。

研究局部放电产生的光信号在 GIS 中的传播规律,对于现场光测法的应用以及结果分析有着重要的意义。本文根据实际 GIS 结构尺寸建立模型,研究了不同距离、不同结构、不同放电源位置以及存在带通气孔的绝缘子条件下,光学传感器处接收光信号的变化规律。

1 GIS 中局部放电光测法

1.1 局部放电产生的光信号

局部放电的产生和发展极快,伴随放电产生的光、电、声等物理信号均为脉冲信号。同时,局部放电只发生在绝缘缺陷附近极小的空间内,因此局部放电产生的光信号可以认为是由点光源发出的。所以,仿真时可以用脉冲点光源模拟产生光信号的放电源。本文仿真设置的光源为同一时刻以球状均匀向外辐射 1 000 个光子的点光源。

SF₆ 气体放电产生的光信号波长分布在 200~800 nm 范围内,集中在 300~500 nm 范围内,主要为紫外和可见光^[19],而 SF₆ 气体的吸收光谱为红外范围^[20-21],所以局部放电产生的光信号在 SF₆ 气体中传播不会因吸收而发生衰减。

1.2 局部放电光测法的检测量

光测法通过检测局部放电产生的光信号来实现局部放电的检测,但在实际中,最终测量和记录的信号是经过光电转换后的电信号。光电转换是利用光电效应,通过光电转换器件(常用光电倍增管)将光子转换为电子,并最终形成电流信号的过程。所以,转化过程存在如下对应关系

$$Q = kQ_v \quad (1)$$

式中: Q 为电荷量,和电子数目相关; Q_v 为光量,当光子波长一定时,仅和光子数目相关; k 为光电转化系数。式(1)两边同时对 t 求导,可得到如下关系式

$$I = \frac{dQ}{dt} = k \frac{dQ_v}{dt} = k\Phi_v \quad (2)$$

式中: I 为电流; Φ_v 为光通量,单位为 lm。式(2)表明光测法中测量的电流主要与光信号的光通量相关,所以本文分析了光传感器处接收到的光信号的光通量大小。

1.3 光测法的光传感器

通过光测法检测 GIS 中局部放电时,需要将光探测器(传感器)植入 GIS 内部,目前已有的方法是将光传感器和特高频传感器相结合,该方法在不影响 GIS 内部电场分布的条件下实现了光探测器的植入,为解决光传感器的植入提供了思路^[4]。根据该传感器的形状尺寸,设置圆盘形装置来模拟光传感器,圆盘安装于 GIS 内部并在仿真过程中保持位置不变。

2 GIS 中光信号传播特性的仿真

由于 GIS 导杆、外壳、绝缘盆子等部件的线度远大于所要研究的局部放电光信号的波长,所以仿真时不考虑光信号的波动特性,仅基于几何光学对光信号的传播特性进行仿真。本文利用 COMSOL 软件建立模型,对 GIS 中局部放电光信号的传播特性进行了仿真。

2.1 距离对光信号传播特性的影响

如图 1 所示,建立直线型 GIS 仿真模型,外壳直径为 34 cm,导杆直径为 10.8 cm,在导杆上设置 5 个放电源,两两间隔为 25 cm,如图 1 中点 $a \sim e$ 所示。光传感器的直径为 30 cm,高度为 2 cm,内表面与 GIS 的内壁相齐平。仿真中设置光信号在绝缘子和外壳处发生漫反射。

以图中 a 点和 d 点为例,20 ns 内到达传感器处的光子分布如图 2 所示。图中,每个点代表一个光子,点颜色的深浅表示光子从光源开始到达圆盘光

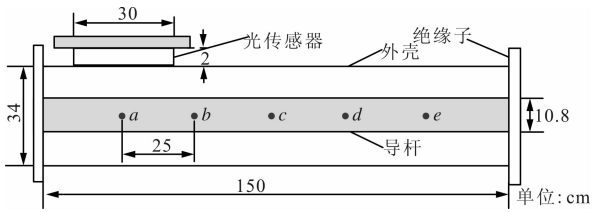
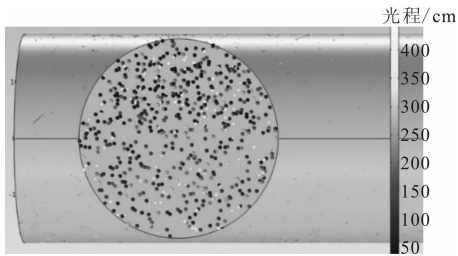
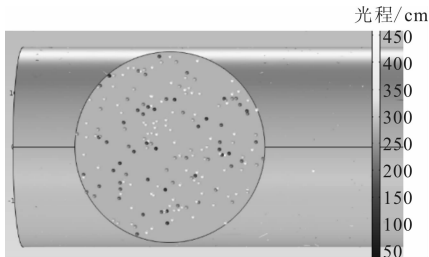


图 1 GIS 光信号传播特性仿真模型

程的长短,单位为 cm。从图中可以看出,光子在圆盘上的分布比较均匀,所以无论实际中光探测器具有何种形状结构,可以认为最终接收到的光信号与圆盘整个面接收到的光信号呈正比例关系。对比不同位置的检测结果可以看出,光源位于 *a* 处时,最终到达圆盘上的光子更多,且具有更短的光程。



(a)放电源 *a* 处



(b)放电源 *d* 处

图 2 光传感器处光子分布

当光源位于导杆上不同位置时,到达传感器处的光子数和光通量会有明显的差别,光子数和光通量随时间的变化规律如图 3、图 4 所示。

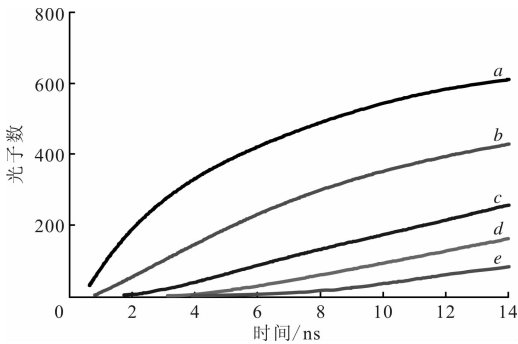


图 3 光传感器处接收的光子数

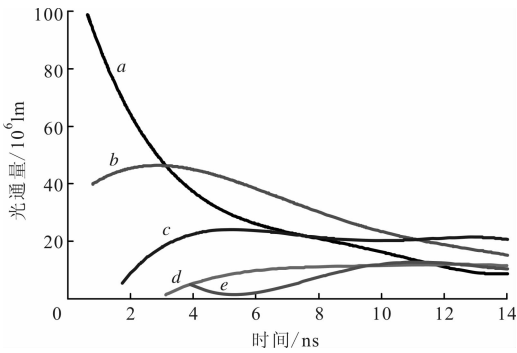


图 4 光传感器处接收的光通量

从图 3 可以看出,随着时间的增加,到达传感器处的光子数逐渐增加,随着光源距离的增加,到达光传感器处的光子数明显减小。从图 4 可以看出,当光源距离光传感器不同时,光传感器接收到的光通量不同,随着距离的增加,光传感器处检测到的最大光通量逐渐减小。

统计放电源位于点 *a*~*e* 时光传感器处接收到的总光子数和最大光通量,结果如图 5 所示,图中的距离表示放电源到光传感器中心的距离。从图中可以看出,随着距离的增加,光传感器接收到的光子数和最大光通量都在减小。

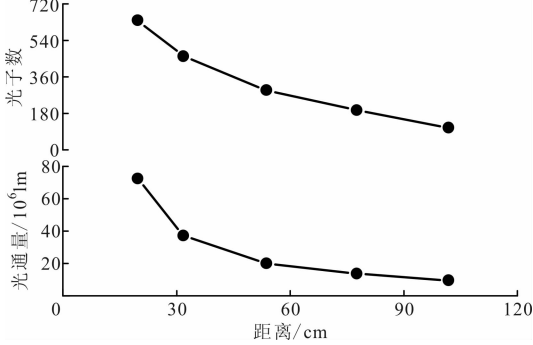


图 5 不同距离下的最大光通量和总光子数

2.2 GIS 结构对光信号传播特性的影响

建立 L 型结构仿真模型如图 6 所示,横向气室长 110 cm,纵向气室长 100 cm,导杆和外壳直径和图 1 相同,光传感器安装于纵向气室的中部,在横向气室的导杆上每间隔 10 cm 设置放电源。

放电源位于不同位置时,传感器接收到的总的光子数和最大光通量如图 7 所示,图中距离为放电源与光传感器表面的水平距离。可以看出,虽然随着距离的增加,光传感器接收到的总光子数有所减少,但是光传感器处的光通量比较相近,最大值在 *i* 处,为 13.7×10^{-6} lm。

对比图 6 中 *j* 处和图 1 中 *d* 处的结果,位于两点的放电源和传感器距离相同,图 6 中 *j* 处检测到

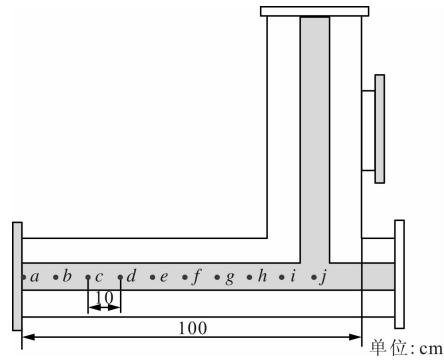


图 6 L 型结构模型示意图

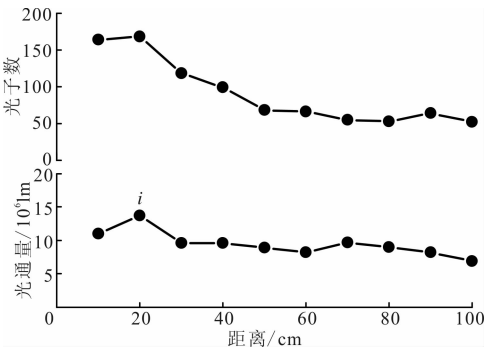


图 7 L 型结构下光传感器处接收的光子数和光通量

的光子数和最大光通量为 164 和 11.0×10^{-6} lm,而图 1 中 *d* 处的结果为 294 和 19.9×10^{-6} lm,L 型结构下的检测结果仅为直线型结构下的 55.78%和 55.28%,可以看出,由于 L 型结构的影响,检测到的光子数和最大光通量都明显减小。

如图 8 所示,建立 T 型结构仿真模型,设置 GIS 横向气室长 180 cm,纵向气室长 100 cm,传感器位于纵向气室中部。在横向气室上从左到右布置光源,每隔 10 cm 设置一放电源,至横向气室中部,仿真计算检测传感器处接收到的光信号的特征量。

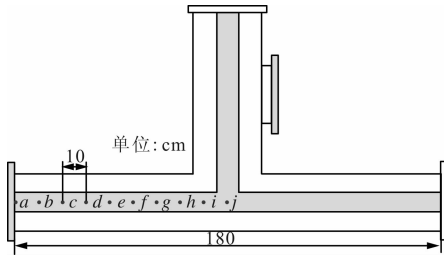


图 8 T 型结构模型示意图

T 型结构中,当光源位于不同位置时,传感器测量得到的总光子数和最大光通量如图 9 所示。从图中可以看出,随着距离的增加,到达光传感器处的总光子数减少。当放电源位于 *g* 处时,光子数发生了突变,这是因为此时从放电源到传感器基本已经不

存在直接到达的传播路径,大多数的光子经过反射才能到达传感器,衰减很大。

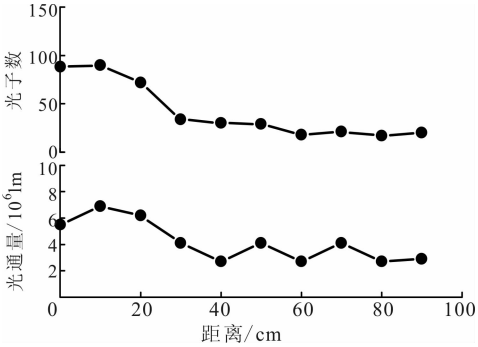


图 9 T 型结构下光传感器处接收的光子数和光通量

当放电源位于不同位置时,光传感器处测得的光通量都较小,最大值出现在放电源位于 *i* 处,仅为 6.9×10^{-6} lm。对比图 9 中的 *j* 处和图 6 中的 *j* 处的结果,T 型结构中的光子数和最大光通量分别为 88 和 5.5×10^{-6} lm,仅为直线型结构的 29.93%和 27.64%,光子数和最大光通量都明显减小,这是因为此时有一部分光子传播至 T 型结构的右端。

2.3 放电源位置对光信号传播的影响

GIS 中的缺陷除了出现在高压导杆之外,某些缺陷也会出现在外壳处,比如自由金属微粒和外壳尖刺缺陷,同时缺陷也会随机出现在导杆或者外壳的不同位置。针对于此,对放电源位于外壳和导杆不同位置的情况进行了仿真,建立的模型如图 10 所示。GIS 为直线型结构,分别设置光源位于导杆和外壳内壁的四周,仿真计算放电源位置对光信号传播的影响。其中,光源位于导杆上时,径向正对检测点;光源位于 GIS 内壁时,径向斜对检测点。

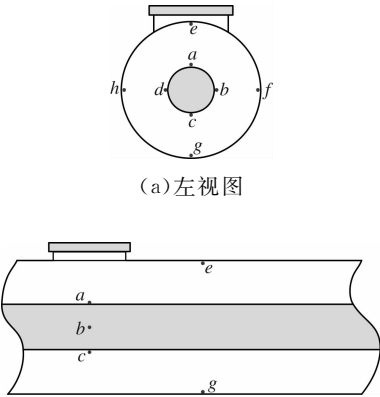


图 10 放电源位置示意图

放电源位于高压导杆四周不同位置时,传感器接收到的光子数和光通量随时间的变化曲线分别如

图 11 和图 12 所示。统计光传感器处接收到的总光子数和最大光通量如表 1 所示。

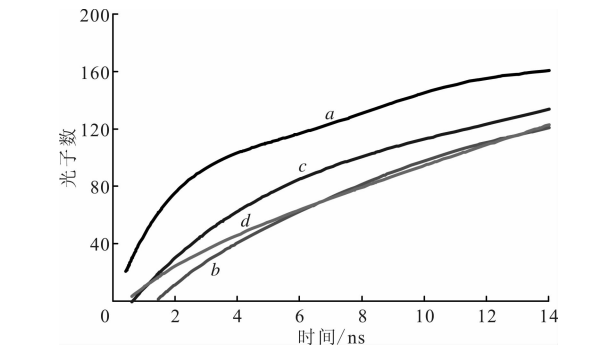


图 11 放电源位于导杆四周时光传感器处接收的光子数

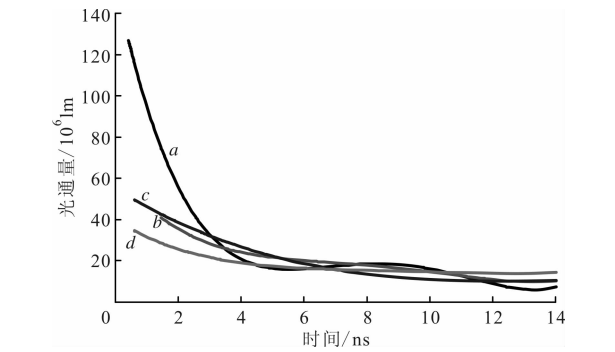


图 12 放电源位于导杆四周时光传感器处检测的光通量

表 1 放电源位于导杆四周时检测点接收到的光信号

光源位置	总光子数	光通量最大值/ 10^{-6} lm
<i>a</i>	529	129.0
<i>b</i>	414	40.9
<i>c</i>	417	49.5
<i>d</i>	439	37.5

从以上结果可以看出,当放电源位于正对光传感器的 *a* 点时,光传感器接收到的光子数最多,光通量最大,*a* 处的最大光通量约是其他各处的 3 倍多。当放电源位于 *c* 处时,接收到的光子数和最大光通量略大于 *b*、*d* 处。处于对称位置的 *b*、*d*,检测到的结果相差不大,产生差异的原因主要是因为在外壳处发生的漫反射具有随机性。

放电源位于外壳四周时,传感器处接收到的光子数和光通量如图 13、图 14 所示。统计得到不同位置的总光子数和最大光通量如表 2 所示。

由以上结果可以看出,当放电源位于 GIS 外壳不同位置时,传感器检测结果比较相似,到达传感器的光子数和光通量相差不大。这说明只要放电源至检测点距离相等时,放电源的位置对检测点接收光

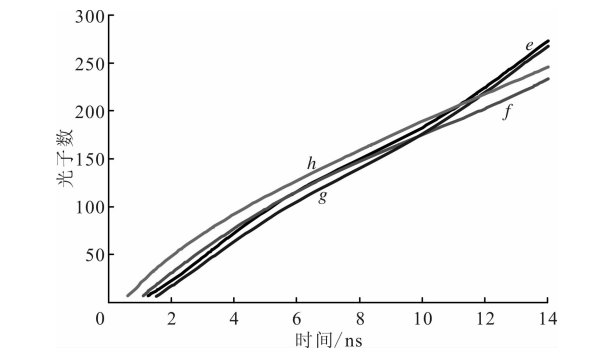


图 13 放电源位于外壳四周时光传感器处接收的光子数

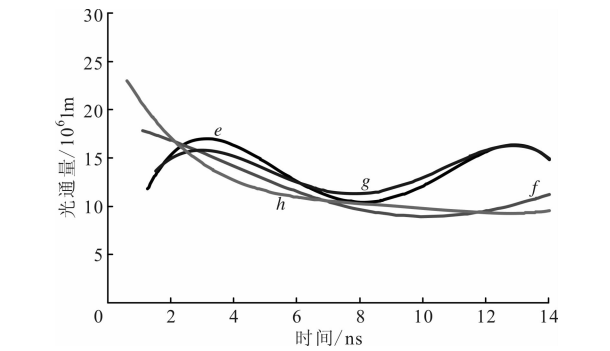


图 14 放电源位于外壳四周时光传感器处检测的光通量

表 2 光源位于 GIS 内壁四周时检测点接收到的光信号

光源位置	总光子数	光通量最大值/ 10^{-6} lm
<i>e</i>	273	17.1
<i>f</i>	231	17.8
<i>g</i>	267	16.5
<i>h</i>	245	23.1

信号并不会产生影响。

2.4 带通气孔的绝缘子对光信号传播的影响

GIS 相邻气室之间用盆式(或盘式)绝缘子隔开,绝缘子分为带通气孔绝缘子和不带通气孔绝缘子。对于不带通气孔的绝缘子,因为其完全不透光,因此不做研究,只研究带通气孔的盘式绝缘子对相邻气室光传播的影响。

如图 15 所示,设置绝缘子两侧气室长度都为 100 cm,检测点位于左侧气室中部。盆式绝缘子上均匀分布 6 个通气孔,孔直径为 6 cm,绝缘子厚为 5 cm。

设置放电源在右侧气室盆式绝缘子上(图 15 中的 *a* 处),光线的路径如图 16a 所示,经统计共有 41 个光子到达检测点,光通量最大值为 4.16×10^{-6} lm,在相同距离下,不存在绝缘子时的光子数为 295,可以看出,由于绝缘子的存在,光子数衰减为原

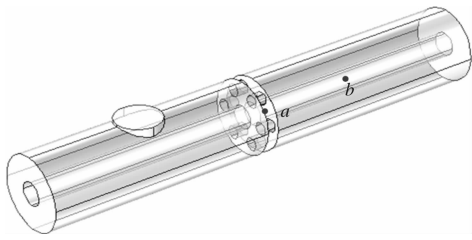


图15 带通气孔绝缘子的GIS模型示意图

来的13.90%。设置光源在右侧气室,距离绝缘子50 cm(图15中的 b 处),光线的路径如图16b所示,计算得到仅仅12个光子到达检测点,光通量最大值为 2×10^{-6} lm。

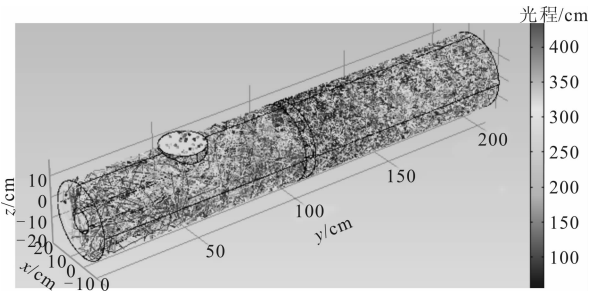
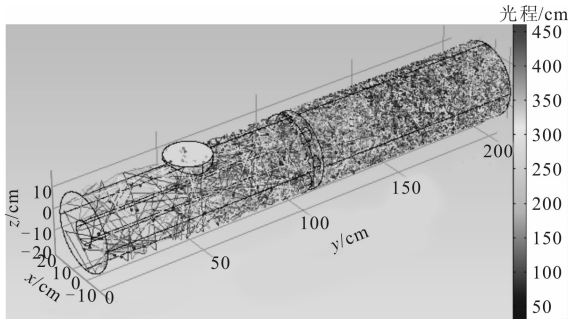
(a)放电源位于 a 处(b)放电源位于 b 处

图16 光信号路径图

检测结果表明,虽然光线可以通过带通气孔的绝缘子从相邻气室到达检测点,但是到达检测点的总光子数和光通量会大大减小,大大降低了传感器对相邻气室光信号的检测灵敏度。

3 结论

本文根据GIS中局部放电光信号的特点以及实际GIS的结构特征,建立仿真模型,研究了不同距离、不同GIS结构、不同放电源位置以及存在带通气孔绝缘子的条件下,光学传感器接收光子数和光通量的变化规律。得到以下结论。

(1)当光源至检测点距离增加时,光学传感器接收的总光子数和最大光通量均会减小。

(2)当传播距离相同时,L型结构中传感器接收的光子数和光通量约为直线型结构的55%,T型结构约为直线型结构的35%。

(3)当放电源位于导杆四周不同位置时,传感器正对放电源时检测到的总光子数和最大光通量最大,其他角度下检测结果相似;放电源位于外壳四周时,传感器检测到的光信号相差不大。

(4)当光信号通过带通气孔的盆式绝缘子时,相同距离下传感器接收的光子数仅为不存在绝缘子时的14%,光信号明显减弱。

以上结果表明,光测法的检测范围有限,受到GIS结构、距离和GIS部件影响较大。但是,光测法抗干扰能力强,灵敏度较高,在单一气室内,检测局部放电具有足够的优势。所以,现场使用光传感器对GIS中的局部放电信号进行检测或者监测时,应将其安装在关键气室的中部位置,以尽可能的提高其检测有效性。

参考文献:

- [1] 宋果,李炜,宋竹生,等. 国网公司系统组合电器运行情况 [J]. 高压电器, 2009, 45(6): 78-82.
SONG Hao, LI Wei, SONG Zhusheng, et al. Operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 78-82.
- [2] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques [J]. Transaction of China Electro Technical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [3] 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.
- [4] LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods [EB/OL]. [2017-09-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7776945/>.
- [5] BEROUAL A, BURET F. Optical detector of electrical discharges [J]. Circuits Devices & Systems IEE Proceedings: G, 1991, 138(5): 620-622.
- [6] CHIRON B. Highly efficient plastic optical fluorescent

- fibers and sensors [C]//Proceedings of SPIE: International Society for Optics and Photonics. Washington D C, USA: SPIE, 1991: 86-95.
- [7] 唐炬, 欧阳有鹏, 范敏, 等. 用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统研制 [J]. 高电压技术, 2011(5): 1129-1135.
- TANG Ju, OUYANG Youpeng, FAN Min, et al. System using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011(5): 1129-1135.
- [8] 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.
- [9] KAUFHOLD M, BAMJI S S, BULINSKI A T. Optical detection of partial discharges in gas-insulated systems [C]//Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena-CEIDP'96. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 618-622.
- [10] SCHWARZ R, MUHR M, PACK S. Partial discharge detection in oil with optical methods [C]//2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 245-248.
- [11] KATSUOSHI M. Electric-discharge sensor utilizing fluorescent optical fiber [J]. IEEE Journal of Light-wave Technol, 1989, 7(7): 1029-1032.
- [12] KUROSAWA K, SAWA T, SAWADA H, et al. Diagnostic technique for electrical power equipment using fluorescent fiber [C]//Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1991: 150-156.
- [13] EHARA Y, TSUNO M, KISHIDA H, et al. Optical and electrical detection of single pulse of partial discharge on electrical treeing [C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 639-642.
- [14] 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(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(4): 3-5.
- [15] 唐炬, 刘永刚, 裘吟君, 等. 针-板电极局部放电光测法信号一次积分值与放电量的关系 [J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 1-8.
- TANG Ju, LIU Yonggang, QIU Yinjun, et al. Relationship between first integral value of signals of the optical method and charge quantity of partial discharge from needle-plate electrode [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 1-8.
- [16] 李威, 鲁华祥, 陈天翔, 等. 采用荧光光纤检测局部放电的自适应阈值方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 59-66.
- LI Wei, LU Huaxiang, CHEN Tianxiang, et al. Adaptive threshold method for partial discharge detection by fluorescent fiber [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 1996-1998.
- [17] 赵文华, 张旭东, 姜建国, 等. 尖-板电极晕放电光谱分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2003(5): 955-957.
- ZHAO Wenhua, ZHANG Xudong, JIANG Jianguo, et al. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003(5): 955-957.
- [18] BOCZAR T, ZMARZLY D. Optical spectra of surface discharges in oil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2006, 13(3): 632-639.
- [19] 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.
- [20] FUJII K, YAMADA M, TANAKA A, et al. Emission spectrum of partial discharge light in SF₆ gas [C]//Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 332-335.
- [21] 曹通, 魏庆农, 刘世胜, 等. 基于红外光谱吸收原理的 SF₆ 浓度检测系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 1996-1998.
- CAO Tong, WEI Qinnong, LIU Shisheng, et al. Study of SF₆ concentration measurement system based on infrared spectral absorption [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9): 1996-1998.

(编辑 杜秀杰)