

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.006

# 紫外成像法的 GIS 盆式绝缘子局部放电研究

王鹏皓<sup>1</sup>, 闫杰<sup>2</sup>, 王天正<sup>2</sup>

(1. 国网太原供电公司, 太原 030012; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

**摘要:** 气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)在电力系统中占有重要地位,盆式绝缘子是 GIS 内部重要的部件,其表面放电是影响 GIS 安全运行的重要因素,文中在盆式绝缘子表面设置了典型的绝缘缺陷模型,利用紫外成像仪记录了其表面放电引起紫外光子发射的整个过程,分析了典型放电缺陷模型下的放电电压与光子数之间的关系,对绝缘子表面放电进行了探索,取得的结论:①表面放电紫外光子数随着缺陷尺寸的增大有增大趋势,但是多次重复性实验表明存在饱和特性;②当模拟的同一种绝缘缺陷位于盆式绝缘子不同位置的时候,放电初始电压不同,相同电压下的光子数目也存在较大差异;③当绝缘缺陷距离导杆距离大于 6 cm 时,在相同电压下的放电明显减弱,产生的紫外光子数也明显减少。这些结论有助于后续对盆式绝缘子表面电荷特性的深入研究,同时也为现场检测 GIS 局部放电提供了依据。

**关键词:** 气体绝缘组合电器; 局部放电; 光子数; 紫外成像

## Research on Partial Discharge Characteristics of GIS Insulating Spacers Based on UV Imaging Method

WANG Penghao<sup>1</sup>, YAN Jie<sup>2</sup>, WANG Tianzheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Taiyuan Power Supply Company, Taiyuan 030012, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute of Shanxi Province Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** Gas insulated switchgears (GIS) occupy an important position in the power system. Discharge on insulating spacer surface is an important factor influencing the safe operation of GIS. The authors set up different insulation defect models on insulating spacer surface and use UV camera to observe the surface discharge phenomena. Conclusions are drawn that: ① The ultraviolet photon number increases with the increasing length of the insulation defect models, however, saturation characteristic is observed in repetitive experiments; ② The initial discharge voltage and the photon number under certain voltage significantly depend on the position of an insulation defect; ③ When the distance between an insulation defect and the guide bar is more than 6 cm, the discharge weakens obviously under the same voltage, and the corresponding ultraviolet photon number reduces significantly. These conclusions are helpful to the further study on the characteristics of insulator surface charge, and to the on-site detection of GIS partial discharge.

**Key words:** gas insulated switchgears(GIS); partial discharge(PD); photon numbers; UV imaging

## 0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)

在电力系统中占有重要地位,然而,GIS 内部会出现由于绝缘缺陷引起的局部放电(partial discharge, PD),PD 长时间发展会导致 GIS 绝缘损害,对 PD 进行检测显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。对 PD 进行检测,主要是检

收稿日期:2015-01-22; 修回日期:2015-02-26

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2011AA05A121);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13ZD14)。

Project Supported by National High-tech R & D Program(863 Program)(2011AA05A121), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13ZD14).

测由其造成的二次物理化学特征,包括声、光、电磁波和气体分解产物等。目前现场主要采用超声波法和超高频法对 GIS 局部放电进行检测,超声测试法由于干扰(主要是机械振动)的影响,对于判定放电是否有无,存在一定盲区,需要配合其他手段来综合确认,同时超声波是机械波,所测信号是非电信号,对后续的处理不方便;超高频法测量的是电磁波,抗干扰能力强,但是超高频电磁波在腔体内的传播特性复杂,且无法实现量化,无论是超声波还是超高频电磁波,测量的目标量都是在腔体里面经过一系列折反射后取得的一维信号,受周围环境和检测设备的影响,目前只是用于定位和简单的模式识别,并不能够从本质上反映放电的机理<sup>[4-7]</sup>。根据气体放电理论,在放电局部分区域会出现大量带电粒子,存在复合等过程,会产生光子发射现象,这是反映 GIS 局部放电最核心的过程,而紫外成像仪(UV Camera)能够拍摄到放电过程中产生的紫外光子,并且能够实现量化。因此,文中利用紫外成像仪对 GIS 盆式绝缘子表面放电过程进行了连续记录,结合分析,对 GIS 盆式绝缘子表面放电进行了研究。

## 1 实验系统及实验方法

### 1.1 搭建实验系统

为了研究盆式绝缘子表面放电特性,搭建的实验系统采用自行设计的设备,在窗口上安装了紫外玻璃,腔体和盆式绝缘子尺寸以及绝缘能力均按照现场运行指标生产,见图 1。

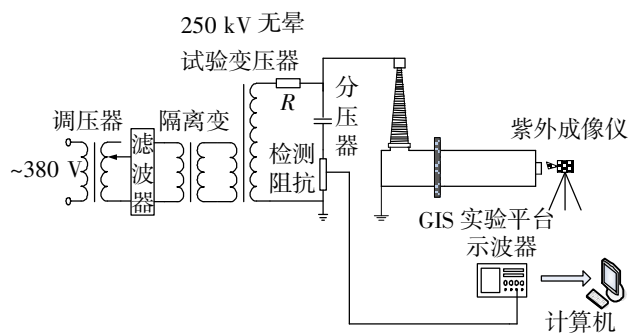


图 1 实验布置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement diagram

紫外成像仪为南非产的 CoroCAM504 日盲型,所测波段为 240~280 nm,可以有效避开日光中的紫外干扰。

### 1.2 缺陷模型及实验方法

引起盆式绝缘子表面放电的主要是固定金属颗粒,根据现场和文[8-15]中有相关研究,结合研究目的,在盆式绝缘子表面设置的绝缘缺陷模型如下:

1)设置长度为 5、8、10、15、20 mm,直径为 0.4 mm

的铝丝,用于研究不同长度的缺陷对放电的影响;

2)由于盆式绝缘子的爬电距离较短,为了实验的科学性,经过多次对比实验后,选择长度为 10 mm 的铝丝,将其分别放置于距离高压导杆为 2、4、6、8、10 cm 处进行绝缘缺陷位于盆式绝缘子不同位置的对比实验;

3)为研究不同的绝缘缺陷形状对放电特性的影响,通过多次重复性试验,选择了直径为 15 mm,厚度为 0.4 mm 的圆形螺母垫片、直径为 2 mm,长度为 15 mm 的螺丝钉以及尺寸为 10 mm×10 mm,厚度为 0.1 mm 的方形铜片,将这些试品放置在距离导杆为 4 cm 处进行实验。

这些缺陷一方面满足了实验要求,另一方面更加接近现场故障缺陷,设置的绝缘缺陷模型实物图见图 2。



图 2 绝缘子表面固定金属微粒模型

Fig. 2 Insulator surface fixed metal particle model

按照设计的电路接好线路后,按如下步骤进行实验:

1)缓慢升压,直至出现局部放电,保持电压值 90 s,如果放电稳定,则记录此时的电压值、紫外图谱和脉冲电压波形;

2)继续缓慢加压,仔细观察各个设备上的数据变化,当某一个数据出现较大变化时,停止加压,记录此时的电压值和各个测试数据;

3)紫外成像仪可以显示放电的强度和放电点,通过反复的实验证明,当紫外成像仪显示的光斑呈现一个饱和的圆形时,并且随电压的升高而没有明显变化的时候,预示着即将发生闪络,此时停止加压。

## 2 实验数据及分析

用紫外成像仪对整个放电过程进行了连续记录,图 3 为整个实验的不同放电阶段。其中图 3(a)为加压前的情况,图中显示光子数为“0”,即表示在实验现场没有干扰;图 3(b)为加压到 50 kV 时的光斑图谱,这时开始有微弱的放电,光子数为 71 个,多次

实验证明,这时所加的电压即为放电起始电压;图 3(c)为加压到 65 kV 时的情况,此时放电已经比较剧烈,光子数已经达到了 142 个,图中显示的白色光斑也十分明显;图 3(d)为加压到 70 kV 时的情况,此时放电光斑继续增加,且可听到“滋滋”声。

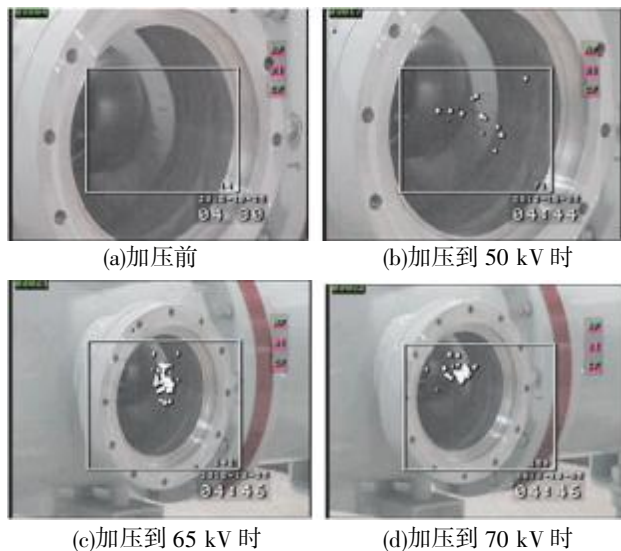


图 3 放电发展过程

Fig. 3 The process of discharge

## 2.1 缺陷长度与放电光子数的关系

沿盆式绝缘子表面距离高压导杆为 40 mm 处分别布置长度为 5、8、10、15、20 mm, 直径为 0.4 mm 的铝丝作为绝缘缺陷, 实验获取的数据见表 1。

表 1 光子数随绝缘缺陷长度变化统计表

Table 1 Statistics of the photon numbers changed with discharge defect length 个

| 长度/mm | 0 kV | 50 kV | 65 kV | 70 kV |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 5     | 0    | 12    | 21    | 30    |
| 8     | 0    | 14    | 120   | 122   |
| 10    | 0    | 58    | 142   | 28    |
| 15    | 0    | 60    | 38    | 137   |
| 20    | 0    | 71    | 143   | 169   |

将表 1 中数据制作成曲线, 见图 4。根据表 1 和图 4, 可以得出结论:

1) 随着电压值的增加, 不同缺陷长度下的光子数都有增加的趋势;

2) 同一个电压值下, 光子数随着缺陷长度的增加而增加, 但 10、15 mm 长的缺陷曲线几乎重合, 说明了这两个长度下的光子数差异不大, 通过实验, 表明长度大于一定值之后, 所测到的光子数变化不大;

3) 当模型的长度为 5、8 mm, 电压不超过 50 kV 时, 两条曲线几乎重合, 说明在低于 50 kV 电压的情况下, 这两种长度下放电强度没有明显变化。

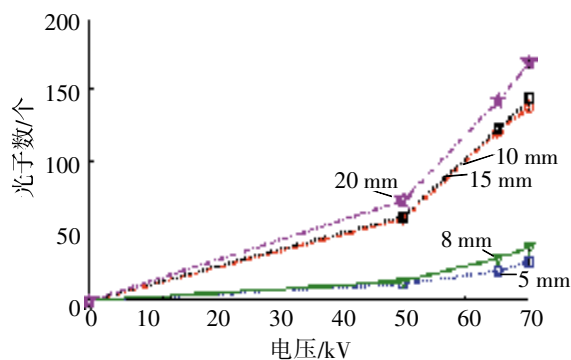


图 4 光子数随电压和缺陷长度的变化曲线

Fig. 4 The curves of photon number along with the voltage and the length of the defect

## 2.2 缺陷在不同位置对放电光子数的影响

由于盆式绝缘子的爬电距离较短, 为了研究缺陷位置对放电的影响, 选择了长度为 10 mm、直径为 0.4 mm 的铝丝, 将其分别放置于距离高压导杆为 2、4、6、8、10 cm 处在相同的环境下进行实验, 实验数据见表 2。

表 2 光子数随放电模型位置变化

Table 2 Photon number varies with discharge model location 个

| 位置/mm | 0 kV | 50 kV | 65 kV | 70 kV |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 2     | 0    | 80    | 152   | 178   |
| 4     | 0    | 70    | 140   | 168   |
| 6     | 0    | 34    | 78    | 101   |
| 8     | 0    | 12    | 18    | 25    |
| 10    | 0    | 2     | 6     | 13    |

将表 2 的数据作图, 得到了图 5 所示不同电压下, 模拟绝缘缺陷位置和光子数的关系。

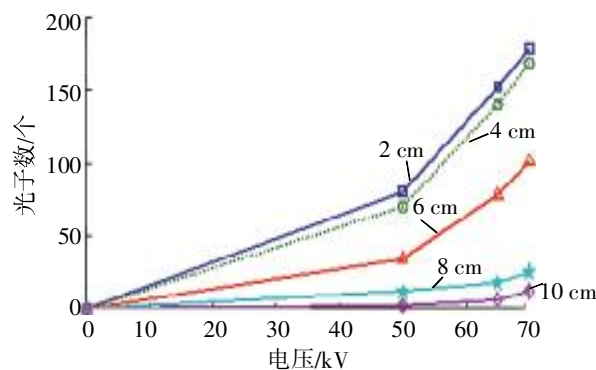


图 5 不同位置对光子数的影响

Fig. 5 The influence of different location to photon number

由图 5 可以得出结论:

1) 随着电压值的增加, 不同位置下测得的光子数都呈现出增加的趋势;

2) 由图 5 还可以看出, 2、4 cm 情况下两条曲线很接近; 同样, 8、10 cm 情况下的两条曲线也很接

近,这两种情况下的曲线分布都与 6 cm 时的存在较大的分离度,通过大量的特性实验也验证了其特性,当绝缘缺陷距离导杆距离大于 6 cm 时,相同电压下放电明显减弱,产生的紫外光子数明显减少。

### 2.3 不同放电缺陷形状和放电光子数的关系

由于现场 GIS 中金属颗粒形状具有多种,为了对不同形状下放电的光子特性进行探索,通过试验,最终选择了直径为 15 mm、厚度为 0.4 mm 的圆形螺母垫片、直径为 2 mm、长度为 15 mm 的螺丝钉以及尺寸为 10 mm×10 mm,厚度为 0.1 mm 的方形铝片作为试品,将这些试品放置在距离导杆为 4 cm 处进行实验,获取的实验数据见表 3。

表 3 光子数随不同模型变化统计表  
Table 3 Statistics of the photon number  
vary with different models 个

| 模型   | 0 kV | 50 kV | 65 kV | 70 kV |
|------|------|-------|-------|-------|
| 螺母   | 0    | 1     | 8     | 14    |
| 螺丝钉  | 0    | 65    | 142   | 161   |
| 方形铝片 | 0    | 21    | 57    | 96    |

由表 3 得到的不同形状绝缘缺陷下,光子数随电压的变化关系见图 6。

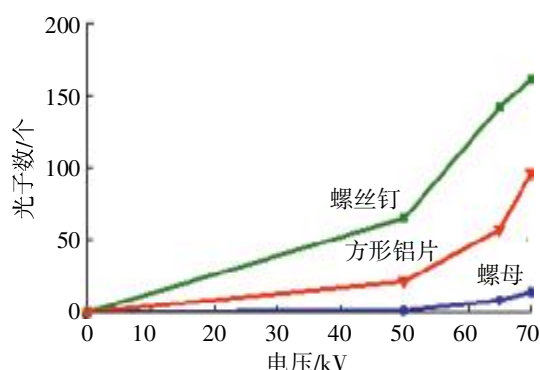


图 6 不同形状对光学特性的影响

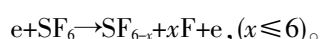
Fig. 6 The influence of different shapes to optical properties

由图 6 可以得出结论:

1)随着电压值的增加,不同形状下测得的光子数都呈现增加的趋势;

2)螺母缺陷,光子数增加极其缓慢,几乎没有变化;方形铝片下的放电光子数,随着电压增加有一定的增加;而螺丝钉缺陷下,光子数随电压的增加非常明显。

通过上述典型绝缘缺陷的模拟和电压—光子数的关系获取,表明了各个模型下的放电特性存在着差异。 $\text{SF}_6$  是一种电负性很强的气体,其分子比较大,产生局部放电时, $\text{SF}_6$  气体会分解,主要产物是  $\text{SF}_5$ 、 $\text{SF}_4$ 、 $\text{SF}_2$ ,电子引起的反应式<sup>[18-19]</sup>



在  $\text{SF}_6$  气体中极不均匀电场的场强计算<sup>[20]</sup>

$$\frac{E_b}{p} = \left(\frac{E}{p}\right)_0 + \frac{K}{27.7(pd)}。 \quad (1)$$

式(1)中: $E_b$  为击穿电压; $d$  为气隙长度; $p$  为气压值; $(E/p)_0=0.885 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$ ;  $K$  为常数。结合上面的实验数据,由光辐射机理可以得到,只要绝缘子缺陷的尺寸和形状对电场强度畸变作用越大,局部场强越大,所产生的光辐射能量就越大。

### 3 结语

通过在盆式绝缘子表面设置典型的绝缘缺陷模型,采用紫外成像仪记录了其表面放电产生的发光过程,对 GIS 盆式绝缘子表面放电做了相应的研究,取得了如下结论:

1)随着电压值的增加,不同放电缺陷下的光子数都有增加的趋势;同一个电压值下,光子数随着缺陷长度的增加而增加;缺陷模型在形状上对放电的影响表现为模型半径曲率越大,在相同电压下的紫外光子数越少;

2)通过大量的重复性实验验证了当绝缘缺陷距离导杆距离大于 6 cm 时,相同电压下放电明显减弱,产生的紫外光子数明显减少;

3)由于  $\text{SF}_6$  分子大,具有极强的电负性,当场强达到一定值的时候,局部区域电离增强,电子附着在气体分子上的概率增加,正负离子的复合过程加剧,辐射紫外光子数增加。

### 参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友.电力设备的在线监测与故障诊断[M].北京:清华大学出版社,2006:100-201.  
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. Online monitoring and fault diagnosis of electrical equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 100-201.
- [2] 邱毓昌.GIS 装置及其绝缘技术[M].北京:水利电力出版社,1994:34-89.
- [3] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation (GIS) [C] / IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005. San Francisco, California, United States: IEEE, 2005: 920-926.
- [4] IEC 60071-2—1996 Norme internationale international standard insulation co-ordination Part 2: Application guide[S]. Switzerland: IEC Publication, 1996.
- [5] LINDSAY C, HICK M. Experience with  $\text{SF}_6$  gas-insulated substations and proposals for improved reliability [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(9): 2596-2604.

- [6] 李继胜,赵学风,杨景刚,等.GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术,2009,35(10):2440-2445.  
LI Jisheng,ZHAO Xuefeng,YANG Jinggang,et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10): 2440-2445.
- [7] 齐波,李成榕,骆立实,等.GIS中局部放电与气体分解产物关系的试验[J]. 高电压技术,2010,36(4):957-963.  
QI Bo,LI Chengrong,LUO Lishi,et al. Experiment on the correlation between partial discharge and gas decomposition products in GIS[J]. High Voltage Engineering,2010,36(4): 957-963.
- [8] 孙才新,许高峰,唐炬,等. 检测GIS局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):92-97.  
SUN Caixin,XU Gaofeng,TANG Ju,et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(8): 92-97.
- [9] 李军浩,司文荣,黎大健,等.L型及T型气体绝缘开关模型中电磁波传播特性的仿真研究[J]. 电网技术,2008,32(19):93-97.  
LI Junhao,SI Wenrong,LI Dajian,et al. Simulation study on electromagnetic wave propagation characteristics within L-type and T-type gas insulated switchgear model[J]. Power System Technology,2008,32(19): 93-97.
- [10] ZHANG Xiaoxing,LIU Wangting. JU Tang et al. Study on PD detection in SF<sub>6</sub> using multi-wall carbon nanotube films sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(3): 833-838.
- [11] 龙锦壮,王克涛,赵鑫,等. 一种工程实用的GIS定量检漏方法[J]. 电网与清洁能源,2013,29(6):67-70.  
LOMNG Jinzhuang,WANG Ketao,ZHAO Xin,et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection[J]. Power System and Clean Energy,2013,29(6):67-70.
- [12] 赵可盖,陈才明,邢云春. 充放电试验是快带检验自愈式电容器质量的有效方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(5):69-73.  
ZHAO Kegai,CHEN Caiming,XING Yunchun.Charge-discharge test is an effective way for quick detection of the self-healing type capacitor quality[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(5):69-73.
- [13] 孙才新,许高峰,唐炬,等.以盒维数和信息维数为识别特征量的GIS局部放电模式识别方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):100-104.  
SUN Caixin,XU Gaofeng,TANG Ju,et al. PD pattern recognition method using box dimension and information dimension as discriminating features in GIS [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3): 100-104.
- [14] 张晓星,唐炬,孙才新,等.一种基于线性鉴别分析的GIS局部放电模式识别[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2006,29(10):1-4.  
ZHANG Xiaoxing,TANG Ju,SUN Caixin,et al. PD pattern recognition based on linear discriminant analysis in GIS[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition),2006,29(10): 1-4.
- [15] 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 sources in GIS[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(16): 119-126.
- 王鹏皓(1988—),男,工程师,主要从事配电网管理方面的研究。