

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.002

# 直流 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程及严重程度评估

李建波, 高文胜, 刘卫东

(清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 直流气体绝缘线路 (gas insulated line, GIL) 绝缘子表面附着金属颗粒会显著降低绝缘子表面的闪络电压, 是 GIL 设备内一种常见的故障。为研究直流 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒所引发局部放电的发展过程并进行严重程度判断, 建立了一套 220 kV GIL 设备局部放电测试平台, 在逐步升压时利用紫外观测仪观察了绝缘子表面局部放电的整个发展过程, 对不同发展阶段局部放电脉冲电流信号的局部放电量、局部放电间隔时间图谱进行了分析。结果表明: GIL 绝缘子表面附着金属颗粒导致的局部放电严重程度可以划分为 3 个阶段: 轻微放电、中度放电和严重放电; 随着放电过程的加剧, 局部放电信号的局部放电量、局部放电间隔时间图谱跟随出现变化。利用局部放电信号的局部放电量、局部放电间隔时间图谱统计参数  $S_k$ 、 $K_u$  值可以对 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒缺陷引发局部放电的严重程度进行评估。

**关键词:** 直流 GIL; 附着金属颗粒; 局部放电; 严重程度评估

## Evolution Process and Severity Assessment of the Partial Discharge Caused by Immobilized Metal Particles on DC GIL Insulator Surface

LI Jianbo, GAO Wensheng, LIU Weidong

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Immobilized metal particles on DC GIL insulator surface significantly reduce the flashover voltage on the insulator surface, which is a common defect in DC GIL. To study the evolution process and severity assessment of partial discharge caused by immobilized metal particles on DC GIL insulator surface, we established a 220 kV GIL equipment platform. By gradually increasing voltage and then using the ultraviolet viewer observed the entire partial discharge evolution process on insulator surface. Meanwhile, analyzed the average amplitude and time interval of partial discharge. The results show that: the severity of partial discharge caused by the immobilized metal particles in the insulator surface of the GIL can be classed into three levels: mild discharge, moderate discharge and severe discharge; as the discharge process intensified, the average amplitude and time interval of partial discharge followed the change. The statistical parameter  $S_k/K_u$  of average amplitude and time interval of partial discharge can be used to evaluate the severity of the defect caused by immobilized metal particles on DC GIL insulator surface.

**Key words:** DC GIL; immobilized metal particles; partial discharge; severity assessment

## 0 引言

气体绝缘线路 (gas insulated line, GIL) 是一种新

型的输电方式, 具有输送容量大、占地面积少、对环境兼容性好、可靠性高等优势, 因而被受到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。但目前生产运行中的 GIL 都属于交流 GIL,

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2014CB239506-2)。

Project Supported by the National Basic Research Program (973 Program) (2014CB239506-2).

没有直流GIL的案例。相关学者认为造成直流GIL未受到广泛应用的主要原因是直流GIL的绝缘子表面闪络电压严重低于交流GIL的绝缘子表面闪络电压,造成这种现象的原因主要是直流GIL绝缘子表面电荷的积聚作用以及GIL腔体内部存在导电金属颗粒,但具体机理还没有比较统一的说法<sup>[5-7]</sup>。

GIL设备在生产、装配及运输过程中不可避免的会在设备内产生金属颗粒,这些金属颗粒在设备内可能会自由运动,也可能会受某些因素影响而集中在绝缘子表面。对于集中在绝缘子表面的金属颗粒,将会严重降低绝缘子表面的闪络电压,引起绝缘子表面发生闪络放电,对GIL设备的安全运行具有极大的危害<sup>[8-9]</sup>。因此需要对绝缘子表面附着金属颗粒引发局部放电的严重程度进行评估与判断,进而采取相应的保护措施。

近年来,在对金属颗粒运动引起的局部放电研究方面,文[10]研究了交流电压下固定金属颗粒引发的局部放电发展过程及放电特征,但没有研究直流电压下的放电特征;文[11]研究了直流电压下不同形态的自由金属颗粒引发的局部放电现象及相应特征,但没有研究固定金属颗粒下的放电特征;文[12]研究了直流电压下不同运动状态自由金属颗粒引发的放电特征,并定性分析了其严重程度,但没有具体判断依据。此外,在对直流局部放电信号的特征提取方面,文[13-16]研究了直流局部放电信号的 $Q-t$ (局部放电量—放电时刻)、 $n-Q$ (放电次数—局部放电量)、 $n-\Delta t$ (放电次数—局部放电间隔时间)3种图谱,研究表明上述3种图谱可以作为直流局部放电信号的识别依据<sup>[13-20]</sup>。

文中研究了直流电压下绝缘子表面附着金属颗粒的局部放电现象,利用紫外观察仪观察局部放电的发展过程,利用脉冲电流法采集局部放电信号,从而提取局部放电脉冲电流信号特征作为直流GIL绝缘子表面附着金属颗粒局部放电严重程度的评估依据。

## 1 试验平台

### 1.1 试验装置

文中基于实际GIL设备,设计了一套同轴圆柱体模拟结构,作为220 kV GIL设备局部放电检测平台。该平台主要包括直流电源、试验模型、信号检测装置及数据采集装置4部分,结构示意图见图1。

试验模型由高压套管和试验腔室两部分构成。在试验腔内装有两支220 kV支柱绝缘子,试验过程中在一支绝缘子上放置缺陷,另一支作为对

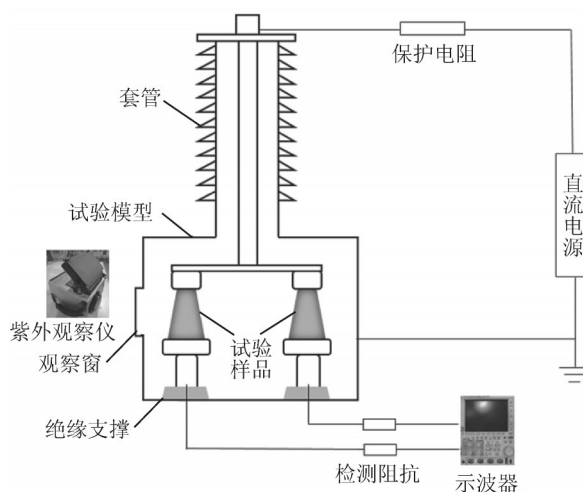


图1 试验装置结构示意图

Fig. 1 Structure of the experimental device

比。同时在试验腔壁上装设石英玻璃观察窗,底部两绝缘支撑处开孔装设信号引出线。试验腔采用密闭结构,试验过程中内充0.4 MPa的 $\text{SF}_6$ 气体,以保证实验条件和GIL实际运行条件一致。

### 1.2 试验回路

试验回路见图2,图2中: $C_1$ 、 $C_2$ 为两支柱绝缘子对应的等效电容; $Z_1$ 、 $Z_2$ 为单独设计的局部放电检测阻抗,示波器采集试验过程中的脉冲电流信号,用作后期分析。

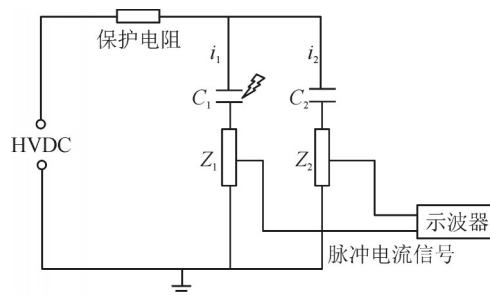


图2 试验回路示意图

Fig. 2 Diagram of the experimental circuit

试验中通过两支路绝缘子并列放置可以有效区分内部真实放电和外部干扰信号。在 $C_1$ 对应绝缘子上布置局部放电模型, $C_2$ 对应绝缘子上不做处理,若 $C_1$ 处发生放电,则会在两个支路通道中同时产生脉冲电流 $i_1$ 、 $i_2$ ,并且 $i_1$ 、 $i_2$ 方向上相反,幅值上 $i_1 \gg i_2$ ;若有外部干扰信号耦合到系统中时,则 $i_1$ 、 $i_2$ 方向相同,幅值相等。通过这两种情况的区别可以有效采集内部放电信号,确保实验数据可靠性。

### 1.3 放电模型

试验过程中采用单根电铜丝作为模拟缺陷。通过多次尝试,确定电铜丝实物尺寸为长5 cm、直径0.13 mm,平行于电场方向固定放置。该模型示

意图及实物尺寸见图3。

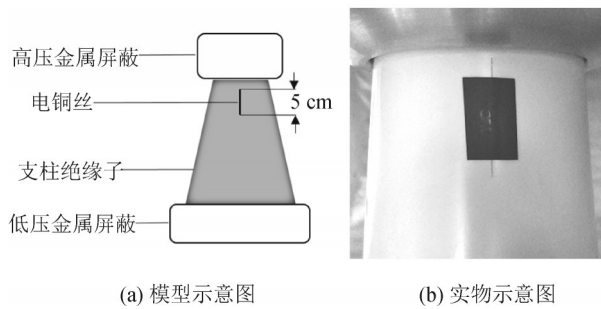


图3 绝缘子表面附着金属颗粒模型示意图及实物图

Fig. 3 The schematic diagram and real image of the metal particle on the insulator surface

#### 1.4 信号采集装置

试验过程中,对局部放电脉冲电流信号及放电紫外光进行实时检测采集,利用示波器对脉冲电流信号进行记录。

1)脉冲电流信号。试验中通过局部放电检测阻抗采集脉冲电流信号,检测宽带为30 kHz~1 MHz。使用恒河DLM2024示波器记录信号,采样率为1.25 GS/s。通过放电量标定,测量系统可检测最小放电量为2 pC。

2)紫外光信号。试验中使用以色列OFIL紫外观测仪进行不同阶段局部放电紫外光信号采集,其入射镜头通过观察窗石英玻璃正对放电模型位置,如图1所示。

## 2 试验过程

进行电气设备局部放电严重程度评估研究时,主要采用阶梯升压法。试验中以稳定速率逐步升高电压,加速设备缺陷的发展,可以模拟出设备局部放电发展的整个过程,并在较短时间内获得足够试验数据,符合实验室内的试验要求。

此次试验采用阶梯升压法。在试验开始阶段,缓慢加压至66 kV时出现少量稳定的局部放电脉冲,故以66 kV为初始放电电压。后面按照10 kV的梯度逐步升高电压,各试验阶段持续加压60 min。经过5次加压,在电压值为116 kV时,32 min后绝缘子发生沿面闪络,故以116 kV作为闪络电压。试验中加压过程见图4。

## 3 局部放电发展过程及统计规律

### 3.1 紫外图谱变化规律

试验中通过紫外观测仪记录绝缘子表面局部放电从起始至最终闪络的整个过程,每个试验阶段拍摄到的紫外图像见图5。

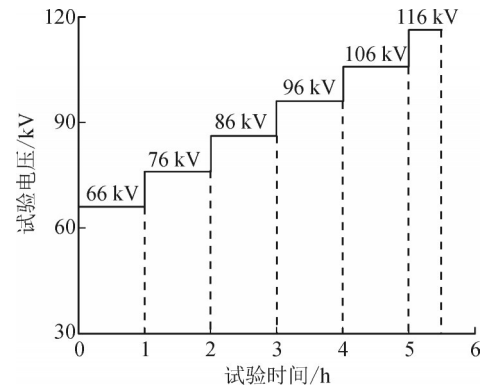


图4 试验加压过程

Fig. 4 The process of increasing voltage

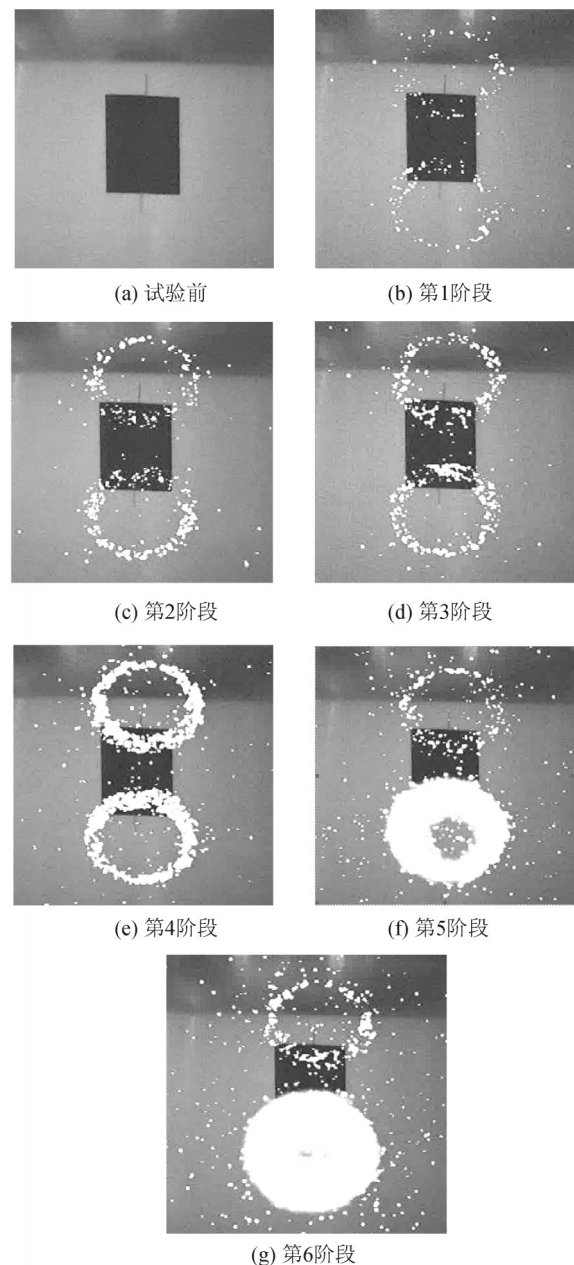


图5 局部放电发展过程中的紫外图像

Fig. 5 Ultraviolet image in the process of partial discharge  
在拍摄的紫外图像中,上部分为连接高压导杆

的金属屏蔽环,中间为支柱绝缘子及放置的缺陷模型,底部低压金属屏蔽环未标出,白点即为紫外观测仪拍到的光子,其主要集中在放电点周边成环状分布。图5(a)是加压前的紫外图像,从图5(a)可以看出,未加压前缺陷模型周围没有任何光子,说明试验环境不会对紫外图像的拍摄产生背景干扰。图5(b)是第1加压阶段的紫外图像,可见微量光子集中在模型两端,说明此时有微弱放电产生。图5(c)-(e)分别对应于第2~4加压阶段的紫外图像,这几部分的放电光子集中在模型两端并均匀分布,光子数量明显多于第1加压阶段,说明此时放电程度有所增加,放电间隔时间也有所缩短。图5(f)、(g)分别对应于第5、6加压阶段的紫外图像,这两阶段的放电光子主要集中在模型底端,且比前面几个加压阶段的放电光子数量都要多,有集中爆发趋势,说明此时放电已比较严重。在持续保持电压后,最终绝缘子表面发生闪络放电,加压结束。

### 3.2 局部放电发展过程统计规律

在每个实验阶段,按照15 min的时间间隔统计该时段内放电光子总数、局部放电总次数作为各阶段统计特征。统计结果见图6。

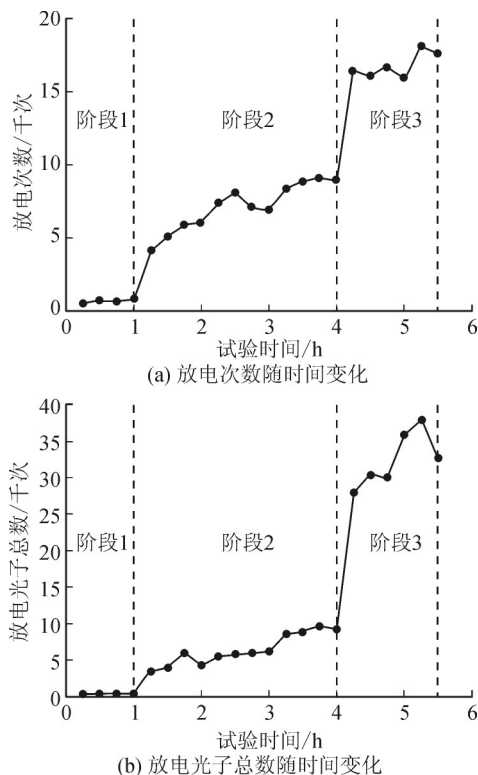


图6 局部放电信号统计特征变化趋势

Fig. 6 Trend curve of partial discharge signal's characteristic

### 3.3 局部放电发展过程划分

结合图5、6,将绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程划分为3个阶段:

1)阶段1。在第1加压阶段,出现微弱但比较稳定的局部放电,局部放电次数及放电光子总数均较少,对应紫外图谱图5(b),光点比较零散;

2)阶段2。在第2、3、4加压阶段,局部放电次数及放电光子总数保持较为稳定的增长幅度,且比第1加压阶段增加很多,对应紫外图谱图5(c)-(e),光点密集程度有所增加;

3)阶段3。在第5、6加压阶段,局部放电次数及放电光子总数再次大幅度增加,对应紫外图谱图5(f)、(g),光点严重密集,有爆发趋势。

## 4 局部放电严重程度划分及统计分析

对应绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程的3个阶段,将局部放电严重程度划分为3个级别:轻微放电、中度放电及严重放电。

在3个严重级别对应电压等级下,提取3 000个脉冲电流信号进行局部放电特征分析。直流电压下局部放电信号主要分析 $Q-t$ (局部放电量—放电时刻)、 $n-Q$ (放电次数—局部放电量)、 $n-\Delta t$ (放电次数—局部放电间隔时间)3种图谱。

### 4.1 轻微放电

轻微放电对应局部放电发展过程中的阶段1。这一阶段有微弱放电光子,放电间隔时间不固定,统计全部采集数据中放电间隔时间最大值为72.3 s,最小值为6.2  $\mu$ s,平均值为0.066 s,可见此阶段放电具有很强的随机性。分析此阶段典型图谱,见图7。

从图7(a)中可以看出,轻微放电阶段局部放电在时间上具有较强随机性,放电脉冲成“簇”状分布,不同“簇”之间间隔时间较长,说明这一阶段放电比较微弱。加压过程中先是在铜丝端部积累电荷,当电荷量积累到足够改变铜丝尖端处电场时,引发局部放电产生一序列放电脉冲,并完成电荷释放,然后进入下一阶段的电荷积累过程。此外,局部放电信号在放电量上也与放电脉冲的“簇”状分布有关,不同簇之间放电幅值跨度较大,结合图7(b)可以看出放电脉冲幅值成多峰值分布,说明放电过程不均匀。图7(c)中因为放电脉冲间隔时间单位从微秒跨度到秒,横坐标采用对数坐标处理,从图7(c)中也能看出这一阶段放电脉冲间隔时间主要集中在较小数值,这也验证了图7(a)表明的放电脉冲时间分布随机性。

### 4.2 中度放电

中度放电对应局部放电发展过程中的阶段2。这一阶段放电光子均匀集中在模型两端部呈环状分布,上下两端部放电程度比较一致。统计全部采集数据中放电间隔时间最大值为13.21 s,最小值

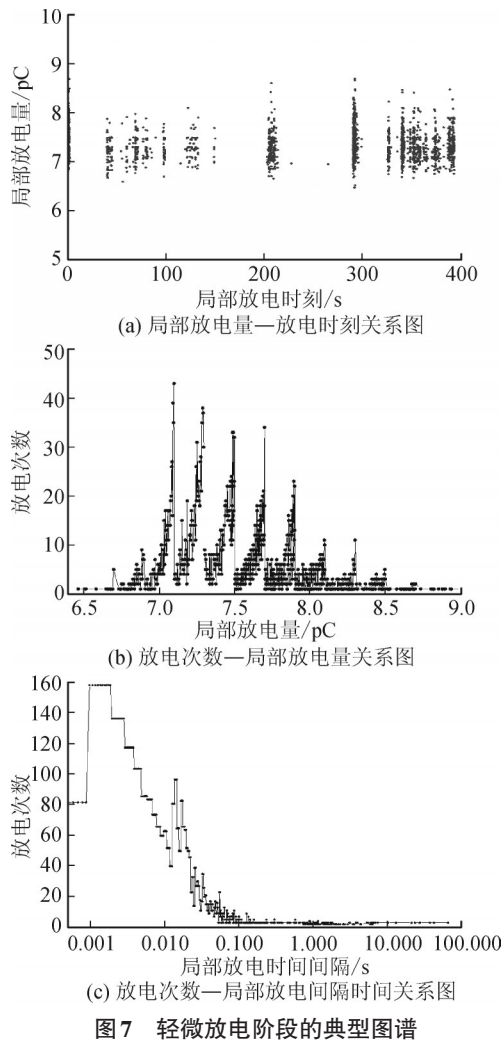


图7 轻微放电阶段的典型图谱

Fig. 7 Typical charts of mild discharge

为  $6 \mu\text{s}$ , 平均值为  $0.003 \text{ s}$ , 可见此阶段放电具有较好的均匀性。分析此阶段典型图谱, 见图 8。

从图 8(a)中可以看出, 中度放电阶段局部放电在时间和放电量上都比较均匀集中, 说明此阶段局部放电严重程度有所加剧, 已形成持续性放电。从图 8(b)中看出, 这一阶段局部放电量主要呈两个峰值集中分布, 且峰值大小基本一致, 这是因为缺陷模型两个端部同时放电, 且从图 5(d)中紫外图像可以看出, 这一阶段缺陷模型两端部放电光子分布比较均匀, 与放电量峰值分布规律一致。从图 8(c)中可以看出, 这一阶段局部放电间隔时间呈单峰值集中分布, 说明放电脉冲比较均匀, 且间隔时间数值上要比轻微放电阶段小了很多, 也证明这一阶段局部放电严重程度已经增加。

#### 4.3 严重放电

严重放电对应局部放电发展过程中的阶段 3。这一阶段放电光子主要集中在缺陷模型下端, 呈爆发趋势, 而上端放电光子数量较少, 从下端的放电光子密集程度可以看出该阶段局部放电已经为严

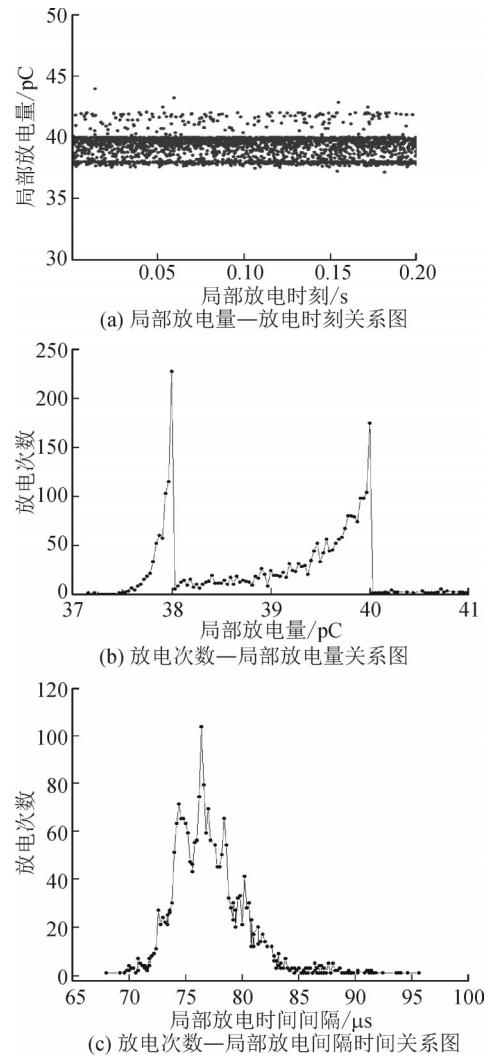


图8 中度放电阶段的典型图谱

Fig. 8 Typical charts of moderate discharge

重状态, 随时可能演变成绝缘子表面沿面闪络放电。统计全部采集数据中放电间隔时间最大值为  $0.4 \text{ s}$ , 最小值为  $1.5 \mu\text{s}$ , 平均值为  $0.94 \text{ ms}$ , 可见此阶段放电比上一阶段加剧很多。分析此阶段典型图谱分析, 见图 9。

从图 9(a)中可以看出, 严重放电阶段局部放电信号时间上和放电量上仍保持均匀性, 说明这一阶段也是持续性放电, 但放电量比中度放电阶段有所增大。从图 9(b)中可以看出, 这一阶段放电量仍是呈两个峰值集中分布, 但其中一个峰值大小明显大于另外一个, 说明这两个峰值所对应的放电本质上不是同一个位置。从图 5(g)中可以看出, 放电光子主要集中在缺陷模型下端, 上端很少, 两者放电严重程度不一致, 这和放电量峰值规律一致。从图 9(c)中可以看出, 这一阶段放电间隔时间主要成两个峰值集中分布, 这和前面分析的两个部位不同放电规律一致。

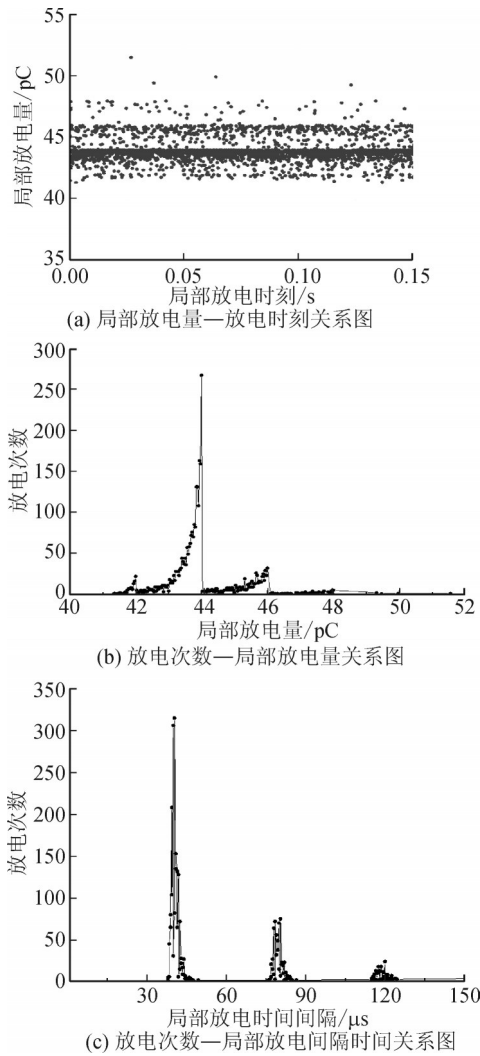


图9 严重放电阶段的典型图谱

Fig. 9 Typical charts of severe discharge

4.4 局部放电统计分析

上节得到局部放电不同严重阶段的典型图谱,但图谱难以作为计算机直观识别依据,需要提取图谱中的统计参数。对于  $n-Q$ 、 $n-\Delta t$  图谱,主要提取反映形状差异的统计算子偏斜度  $S_k$  及陡峭度  $K_u$  [21-26],见表1。

表1 局部放电统计算子

Table 1 Statistical parameter of partial discharge

图谱	$S_k$	$K_u$
$n-Q$	$S_{kq}$	$K_{uq}$
$n-\Delta t$	$S_{kt}$	$K_{ut}$

表1中: $S_k$ 反映谱图形状相对于正态分布形状的左右偏斜情况, $S_k=0$ 说明谱图左右对称, $S_k>0$ 说明谱图向左偏, $S_k<0$ 说明谱图向右偏; $K_u$ 反映谱图形状相对于正态分布形状的陡峭程度,正态分布形状的  $K_u=0$ , $K_u>0$ 说明谱图比正态分布形状尖锐, $K_u<0$ 说明谱图比正态分布形状平坦。

计算各放电阶段的特征参数,得到分布区间见

图10。图10结果表明,不同严重程度的局部放电图谱特征参数具有不同的分布区间。联合4个特征参数的不同分布区间,可以进行局部放电严重程度的识别:① $S_{kt}<0$ 时,判定为轻微放电;② $K_{uq}>1$ 时,判定为中度放电;③ $K_{ut}>11$ 时,判定为严重放电;④在没有独立参数满足上述3个判定依据时,可以对4个参数进行隶属度计算,做联合判定。

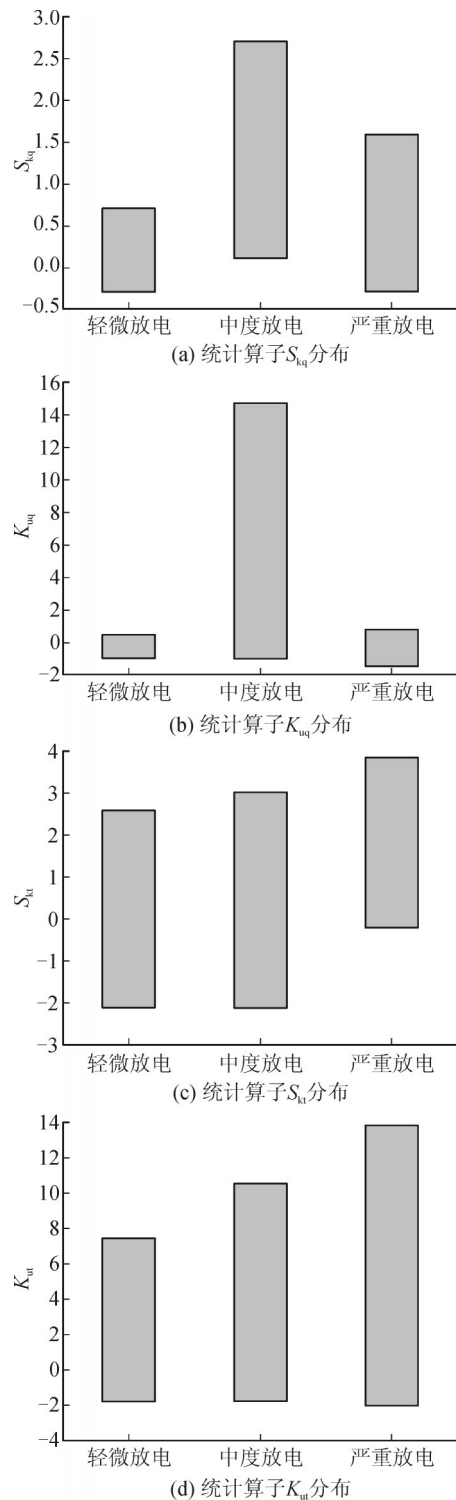


图10 局部放电统计算子分布

Fig. 10 Range of statistical parameter of partial discharge

## 5 结论

1)结合紫外观测仪观测图谱和局部放电脉冲电流信号,可以将直流GIL表面附着金属颗粒局部放电发展过程划分为3个阶段,对应3个级别的严重程度:轻微放电、中度放电和严重放电。

2)在不同严重程度的局部放电阶段,局部放电脉冲电流信号的 $Q-t$ (局部放电电量—放电时刻)、 $n-Q$ (放电次数—局部放电电量)、 $n-\Delta t$ (放电次数—局部放电间隔时间)3种图谱具有不同特征。轻微放电阶段, $Q-t$ 图谱呈“簇”状分布,局部放电放电量具有较强随机性,局部放电间隔时间跨度很大;中度放电阶段, $Q-t$ 图谱均匀分布,局部放电量呈等值双峰集中分布,局部放电间隔时间呈单峰集中分布;严重放电阶段, $Q-t$ 图谱也保持均匀分布,但局部放电量呈不等值双峰集中分布,其中一个峰值明显高于另一个峰值,局部放电间隔时间呈两个峰值集中分布。

3)脉冲电流信号 $n-Q$ (放电次数—局部放电量)、 $n-\Delta t$ (放电次数—局部放电间隔时间)图谱的统计算子 $S_k$ 、 $K_n$ 分布范围,可以作为直流GIL绝缘子表面附着金属颗粒导致局部放电严重程度的判别依据。

## 参考文献:

[1] 张高潮. 气体绝缘输电管线研究现状[J]. 绝缘材料, 2014, 47(6):6-9.  
ZHANG Gaochao. Research situation of gas-insulated transmission line[J]. Insulating Materials, 2014, 47(6):6-9.

[2] 尚涛, 李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1):81-84.  
SHANG Tao, LI Guo. Discussion on the characteristics of GIL and its application in power systems[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1):81-84.

[3] 高凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力, 2007, 40(1):84-88.  
GAO Kai, LI Lihua. Technology and application of gas-insulated transmission lines[J]. Electric Power, 2007, 40(1):84-88.

[4] 汤浩, 吴广宁, 范建斌, 等. 直流气体绝缘输电线路的绝缘设计[J]. 电网技术, 2008, 32(6):65-70.  
TANG Hao, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Insulation design of gas insulated HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(6):65-70.

[5] 齐波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5):

1466-1473.  
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5):1466-1473.

[6] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):849-860.  
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):849-860.

[7] 张博雅, 王强, 张贵新, 等. SF<sub>6</sub>中绝缘子表面电荷积聚及其对直流GIL闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5):1481-1487.  
ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF<sub>6</sub> and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5):1481-1487.

[8] 孙曙光, 陆俭国, 俞慧忠, 等. 基于超高频法的典型GIS局部放电检测[J]. 高压电器, 2012, 48(4):7-12.  
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4):7-12.

[9] 徐征宇, 李光范, 赵志刚. 直流电压下局部放电研究进展[J]. 智能电网, 2014, 2(10):19-25.  
XU Zhengyu, LI Guangfan, ZHAO Zhigang. Development in research of partial discharge under DC voltage[J]. Smart Grid, 2014, 2(10):19-25.

[10] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1):101-108.  
QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1):101-108.

[11] 李庆民, 刘思华, 王健, 等. 直流气体绝缘线路中自由金属微粒的局部放电特性与影响因素[J]. 高电压技术, 2017, 43(2):367-374.  
LI Qingmin, LIU Sihua, WANG Jian, et al. Characteristics of partial discharges caused by free metal particle and influencing factors in DC gas insulated line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):367-374.

[12] 黎大健, 杨景刚, 米楚明, 等. 基于超声波信号的GIS内自由金属颗粒危险评估研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1):53-57.  
LI Dajian, YANG Jinggang, MI Chuming, et al. Risk assessment of basis of free metallic particles in GIS based on ultrasonic signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1):53-57.

[13] 司文荣, 傅晨钊, 黄华, 等. 直流局部放电脉冲峰值—时间序列特征指纹提取[J]. 高压电器, 2013, 49(11):17-24.  
SI Wenrong, FU Chenzhao, HUANG Hua, et al. Feature ex-

- traction for peak-time series of partial discharge at HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 17-24.
- [14] 司文荣, 傅晨钊, 黄 华, 等. 直流局部放电 TARDP 谱图构造方法研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(4): 7-10.  
SI Wenrong, FU Chenzhao, HUANG Hua, et al. Study on construction of TARDP histograms for DCPD[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(4): 7-10.
- [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 source in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [16] 司文荣, 李军浩, 袁 鹏, 等. 高压直流发生器特殊结构对其内部局放测量的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 129-131.  
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. High voltage DC generator's special construction affecting its inner PD detection[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 129-131.
- [17] TAKENO H, NAKAMOTO S, OHSAWA Y, et al. Observation of partial discharge in SF<sub>6</sub> on pulsating high voltage for advanced diagnosis of DC-GIS[J]. International Symposium on High Voltage Engineering, 2002, 5(5): 128-131.
- [18] JIANG T, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Partial discharge activities of pressboard/oil insulation under AC plus DC voltages[J]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2013(12): 267-270.
- [19] MORSHUIS P F, SMIT J J, SOCIETY I E. Partial discharges at DC voltage: Their mechanism, detection and analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 328-340.
- [20] 局部放电测量: GB/T 7354—2003[S]. 2004.  
Partial discharge measurements: GB/T 7354—2003[S]. 2004.
- [21] 牛海清, 陈小林, CAVALLINI A, 等. 高压直流局部放电的试验研究及其放电源识别策略[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1641-1647.  
NIU Haiqing, CHEN Xiaolin, CAVALLINI A, et al. Experimental research on partial discharge at HVDC voltage and identification of PD source[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1641-1647.
- [22] 牛海清. 高压直流局部放电的模糊识别及去噪策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.  
NIU Haiqing. Strategy of noise rejection and fuzzy identification of partial discharge in HVDC apparatus[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [23] 李晓华, 吴广宁, 边姗姗, 等. 直流和交流电压下典型缺陷模型局部放电波形比较分析[J]. 绝缘材料, 2008(1): 53-56.  
LI Xiaohua, WU Guangning, BIAN Shanshan, et al. Comparison of partial discharge pulse shape in typical defect models under DC voltage and AC voltage[J]. Insulating Materials, 2008(1): 53-56.
- [24] FROMM U, SOCIETY I D A E. Interpretation of partial discharges at dc voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 761-770.
- [25] KLUETER T, WULFF J, JENAU F. Measurement and statistical analysis of partial discharges at DC voltage[C]//Power Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-5.
- [26] KELLEY E F, NEHMADI M, HEBNER R E, et al. Measurement of partial discharges in hexane under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(6): 1109-1119.
- 李建波(1992—), 男, 硕士, 研究方向为直流局部放电检测及识别。
- 高文胜(1968—), 男, 教授, 研究方向为高电压技术及电气设备可靠性诊断。
- 刘卫东(1961—), 男, 教授, 研究方向为电力设备在线检测及故障诊断。