

# 气体绝缘组合电器尖端放电发展过程的试验研究

王彩雄, 唐志国, 常文治, 郑书生, 李成榕

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

## Experimental Study on Development Characteristics of Point Discharge in GIS

WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, ZHENG Shusheng, LI Chengrong

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Study on the development characteristics of partial discharge contributes to make an accurate assessment of the severity of discharge and give a reasonable maintenance strategy for the equipment. In view of the fact that point discharge is a common and typical partial discharge failure occurred in gas insulated switchgear (GIS) equipment, by means of researching the discharge pattern features of detection signals of ultra high frequency (UHF) partial discharges during various stages in point discharges development process, the development and variation law of discharge characteristic parameters with testing time during various discharge stages are given to offer the fundamental to assess the severity of this type of partial discharge failure. Research results show that as for point discharge the amplitude of discharge and discharge times increase at first and decrease then along with the prolongation of testing duration; the ratio of discharge time in positive-half period to that in negative-half period as well as the ratio of discharge amplitude in positive-half period to that in negative-half period present the trend of gradual increase; the decreasing velocity of discharge times will be faster along with the increase of relative amplitude of the discharge.

**KEY WORDS:** gas insulated switchgear (GIS); point discharge; development characteristics; variation law

**摘要:** 研究局部放电发展过程有助于对放电故障的严重程度做出准确的评估, 给出合理的设备维修策略。尖端放电是发生在气体绝缘组合电器设备中的一种常见的典型局部放电故障, 通过研究尖端放电发展过程中各个阶段的特高频局部放电检波信号的放电模式特征, 给出了各放电发展阶段中放电特征参数随试验时间的发展变化规律, 为该类型局部放电故障严重程度的诊断提供了依据。研究表明: 对于尖端放电而言, 放电幅值和放电次数随试验时间的延长表现出先增大后减小的趋势, 正负半周上放电次数之比和正负半周上

最大放电幅值之比随试验时间的延长表现出逐渐增大的趋势, 放电次数的降低速度随放电相对幅值的增加越来越快。

**关键词:** 气体绝缘组合电器; 尖端放电; 发展特性; 变化规律

## 0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备是电力系统运行中的重要设备, 目前, 特高频局部放电检测方法已成为判断GIS电气设备绝缘状况的一种有效手段<sup>[1-10]</sup>, 国内外已进行大量研究, 主要集中在局部放电的模式识别方面<sup>[11-16]</sup>, 然而研究局部放电故障的发展过程并对放电严重程度做出准确的诊断与评估才是状态检修的先决条件。

大量研究表明, 局部放电特征参量能够在一定程度上反映不同老化阶段的绝缘特性, 可作为评判放电严重程度的特征参数。文献[17-18]针对水树枝的劣化过程尝试了以局部放电测量建立老化模型, 取得了一定的效果。文献[19]采用模糊聚类和因子分析的方法, 通过对局部放电统计特征参数进行划分给出了油纸绝缘系统不同劣化阶段的评估方法。文献[20-26]研究了油纸绝缘劣化过程中各种类型的局部放电现象, 为通过局部放电测量判断介质电劣化的发展状态提供了较好的试验及理论依据。

不同局部放电故障的放电发展规律不同, 在未对各种放电故障的放电发展特性具备准确认识前, 采用一些方法通过放电发展过程中同一局部放电特征量或者特征量组合来表征局部放电故障的严重程度具有一定的困难。因此需要针对各种典型的局部放电故障类型, 开展局部放电发展过程的研究, 发现局部放电特征参量随放电发展的变化规律及其与绝缘状态及放电严重程度之间的联系, 为局部放电诊断技术提供参考和依据。

本文以GIS中典型的尖端放电故障类型为例,

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB724508)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724508)。

通过恒压加速放电发展的试验方法，采用特高频局部放电检测方法研究不同放电发展阶段的放电模式特征，给出各放电发展阶段中平均放电幅值、平均放电次数、正负半周最大放电幅值之比、正负半周放电次数之比和放电次数衰减等放电特征参数随试验时间的发展变化规律，为该类型的局部放电严重程度诊断提供参考依据。

### 1 试验模型与试验方法

尖端放电模型由半径为 0.5 mm 的针尖电极固定在真实 GIS 设备中的母线上构成，尖端距 GIS 外壁 20 mm，如图 1 所示。整套试验系统如图 2 所示。



图 1 尖端放电模型

Fig. 1 Point discharge model



图 2 试验系统

Fig. 2 Test system

对设备加压至 40 kV 时，出现稳定的特高频放电信号；然后在恒压条件下连续检测试验时间 24 h 内工频周期上的局部放电信号并分时段进行数据保存；进而针对每个阶段的试验数据分析以下几种放电模式谱图：1) 局部放电灰度图，表征局部放电脉冲幅值在工频相位上的分布情况；2)  $U_{max}-\phi$  谱图，表征每个相位段上最大放电幅值的分布情况；3)  $N-\phi$  谱图，表征放电次数在工频相位上的分布情况；4)  $N-U$  谱图，表征放电幅值的分布情况。

### 2 不同阶段的放电模式谱图特征分析

将 24 h 试验时间的数据每隔 2 h 提取具有代表性的 100 组波形，对平均放电幅值和放电次数进行统计分析。将 24 h 内的试验数据分为 4 个阶段(每 6 h 作为 1 个时间段)，分别对 4 个放电发展阶段进行分析。每个放电阶段各选取 10 000 个放电脉冲进行统计分析，各生成几种放电模式谱图，图 3—6

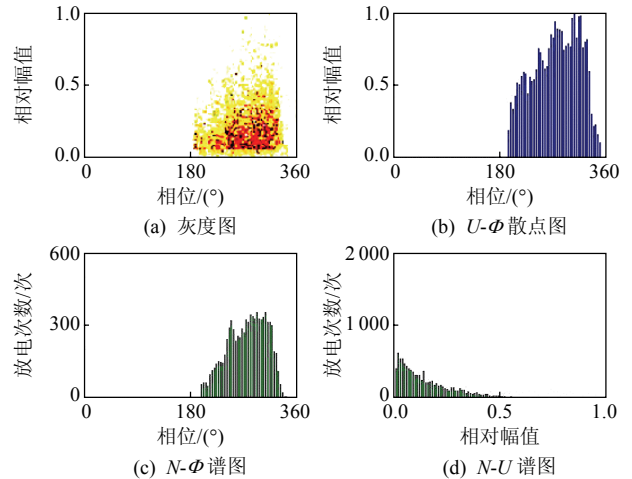


图 3 尖端放电起始阶段的放电谱图

Fig. 3 Discharge pattern of point discharge at initial stage

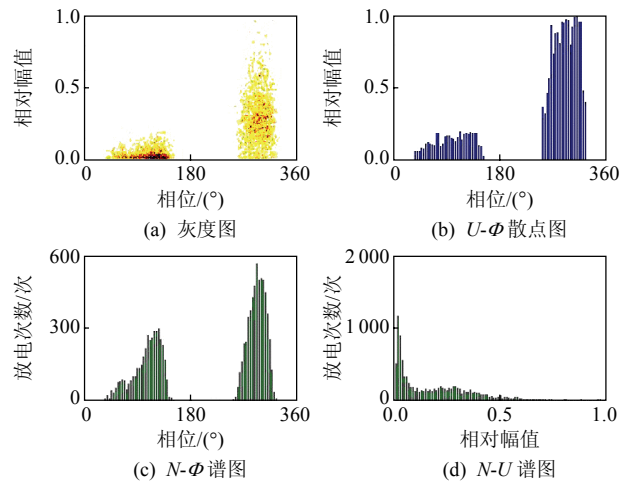


图 4 尖端放电第 2 起始阶段的放电谱图

Fig. 4 Discharge pattern of point discharge at second stage

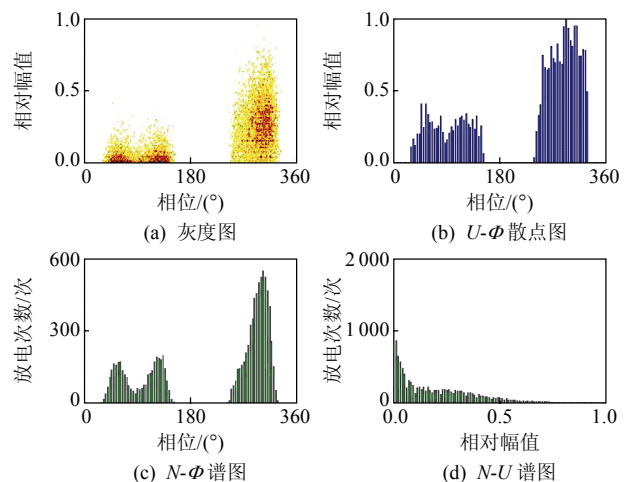


图 5 尖端放电第 3 起始阶段的放电谱图

Fig. 5 Discharge pattern of point discharge at third stage

分别为尖端放电各阶段试验数据生成的放电模式谱图。

由图 3 可以看出：放电信号主要分布在工频负半周的 200°~330° 范围内，其余相位范围内基本没

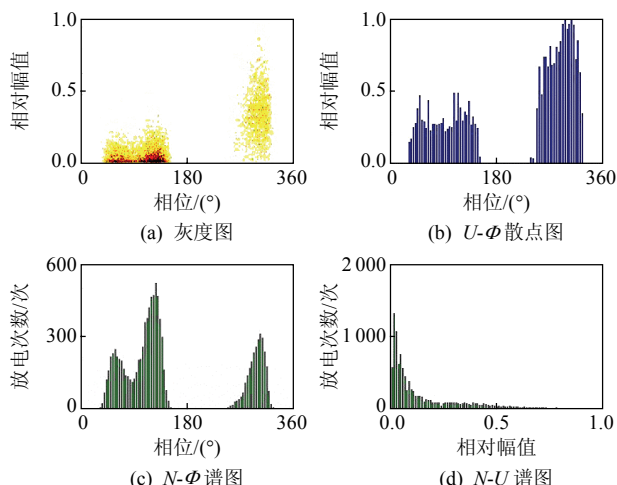


图 6 尖端放电第 4 起始阶段的放电谱图

**Fig. 6 Discharge pattern of point discharge at forth stage**  
有放电信号；最大放电幅值出现在工频负半周 300° 附近的范围内；放电信号的相对幅值主要分布在 0~0.5 范围内；在工频负半周 300° 附近范围内放电次数最多；放电信号相对幅值越低对应的放电次数越多，放电次数随相对幅值的增大呈指数下降，下降速度稍慢。

由图 4 可以看出：正半周出现信号，放电信号主要分布在工频正半周的 30°~150° 和负半周的 255°~320° 的范围内，其余相位范围内基本没有放电信号；放电信号在工频正半周的最大幅值明显小于负半周的最大幅值，正半周上的最大幅值约为负半周的 1/4，放电信号的相对幅值主要分布在 0~0.5 范围内，放电信号在相对幅值的 0~0.1 范围内分布更为集中；在工频正半周 120° 附近范围以及工频负半周 300° 附近范围内放电次数较多，其中 300° 附近范围内放电次数最多，负半周上的放电次数明显多于正半周；放电次数随相对幅值的增大呈指数下降，放电次数在放电相对幅值的 0~0.2 范围内迅速减少，放电次数在相对幅值较小情况下最多约为 1200 次。

由图 5 可以看出：放电信号主要分布在工频正半周的 30°~150° 和负半周的 245°~330° 范围内，其余的相位范围基本没有放电信号，这与上一个阶段的特征类似；放电信号在工频正半周的最大幅值明显小于负半周的最大幅值，正半周上的最大幅值约为负半周的 1/3；放电信号的相对幅值主要分布在 0~0.5 范围内；在工频正半周 60° 和 120° 附近范围内放电次数以及工频负半周 300° 附近范围内放电次数较多，其中 300° 附近范围内放电次数最多，正半周上的放电次数明显多于负半周；放电次数随

相对幅值的增大呈指数下降，放电次数在放电相对幅值的 0~0.15 范围内迅速减少，放电次数在相对幅值较小情况下最多约为 850 次。

由图 6 可以看出：放电信号主要分布在工频正半周的 30°~150° 和负半周的 240°~330° 范围内，其余相位范围上基本没有放电信号。这点与发展阶段 1 和 2 的特征类似；放电信号在工频正半周的最大放电幅值明显小于负半周的最大幅值，正半周上的最大放电幅值约为负半周的 1/2；放电信号的相对幅值主要分布在 0~0.5 范围内；在工频正半周 60° 和 120° 附近范围以及工频负半周 300° 附近范围内放电次数较多，其中 120° 附近范围内放电次数最多；正半周上的放电次数明显多于负半周；放电次数随相对放电幅值的增大呈指数下降，放电次数在放电相对幅值 0~0.15 范围内迅速减少，放电次数在相对幅值较小情况下最多约为 1300 次。

### 3 尖端放电故障的放电发展特性分析

#### 3.1 平均放电幅值和工频周期内的平均放电次数随试验时间的变化情况

对每 2 h 时间段内放电信号的平均放电幅值和工频周期内的平均放电次数进行统计计算，得到平均放电幅值和工频周期内的平均放电次数随试验时间的变化曲线，如图 7、8 所示。

由图 7、8 可以看出：放电幅值与放电次数随着试验时间延长均表现出先升高后降低的趋势。放

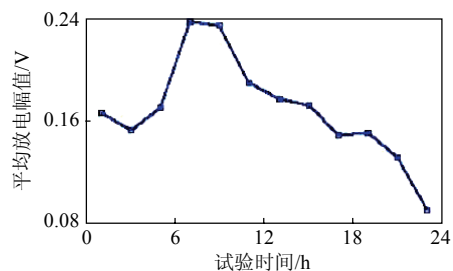


图 7 平均放电幅值随试验时间的变化曲线

**Fig. 7 Variation of average discharge amplitude with test time**

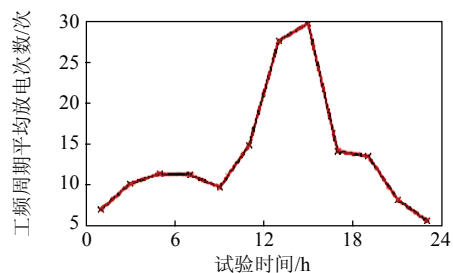


图 8 平均放电次数随试验时间的变化曲线

**Fig. 8 Variation of average discharge frequency with test time**

电幅值在第 6~10 h 的试验时段内达到最大，然后随试验时间的延长持续下降；放电次数在第 12~16 h 的试验时段内达到最大，之后持续下降。由此可知，对于尖端放电而言，放电幅值和放电次数并不与试验时间的长短呈现线性变化的趋势，在试验开始阶段和即将结束阶段，放电幅值和放电次数均比较低，且放电幅值最大的阶段和放电次数最多的阶段均不是试验将要结束的阶段，因此仅从放电幅值的大小和放电次数的多少并不能判断出放电的发展阶段。

### 3.2 正负半周放电次数之比和正负半周最大放电幅值之比随试验时间的变化情况

提取每 2 h 时段内的正负半周放电次数之比和正负半周最大放电幅值之比，分析这 4 个值随试验时间的变化趋势。图 9、10 分别为正负半周上的放电次数之比和正负半周上的最大放电幅值之比随试验时间的变化曲线。

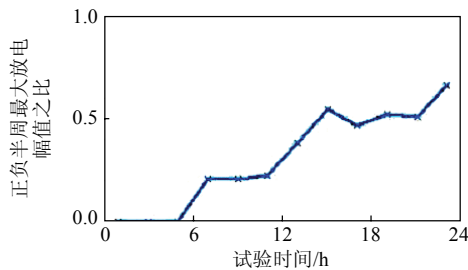


图 9 正负半周最大放电幅值之比随时间的变化曲线  
Fig. 9 Variation of maximum discharge amplitude ratio of positive half-cycle to negative half-cycle with test time

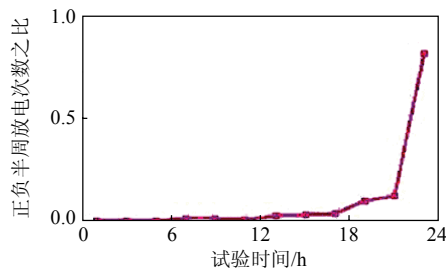


图 10 正负半周放电次数之比随时间的变化曲线  
Fig. 10 Variation of discharge frequency ratio of positive half-cycle to negative half-cycle with test time

由图 9、10 可以看出：正负半周上放电次数之比和正负半周上最大放电幅值之比随试验时间的延长表现出逐渐增大的趋势。这说明正半周上的放电次数相对于负半周的放电次数逐渐增多，正半周的放电幅值相对于负半周的放电幅值逐渐增大。

### 3.3 放电次数衰减速度随试验时间的变化情况

对 4 个放电阶段的  $N-U$  谱图中的数据进行指数函数曲线拟合，指数函数的表达式为  $y = \alpha e^{-\beta x}$ ，定义  $\beta$  为放电次数随相对放电幅值增加的衰减速度，

衰减速度越大表明放电次数随放电相对幅值的增加降低的速度越快。放电次数及其衰减速度随试验时间的变化情况分别如图 11、12 所示。

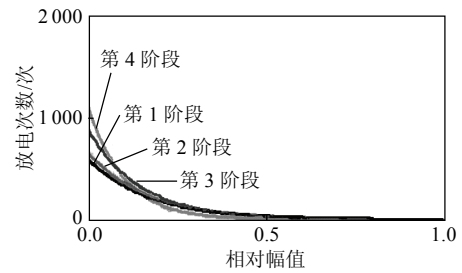


图 11 放电次数随相对幅值的变化曲线  
Fig. 11 Variation of discharge frequency with relative amplitude

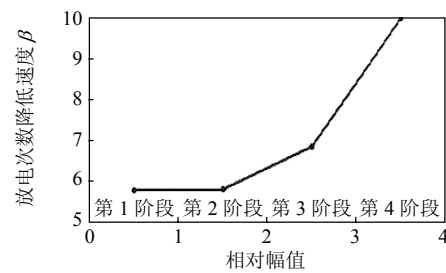


图 12 放电次数衰减速度随试验时间的变化曲线  
Fig. 12 Variation of discharge frequency attenuation with relative amplitude

由图 12 可知，随着试验时间的增长，放电次数的降低速度随放电相对幅值的增加越来越快，呈现单调升高的变化规律，这说明随着放电的发展，放电幅值小的脉冲相对越来越多，放电幅值大的脉冲越来越少。对于从发展趋势上判断尖端放电的严重程度具有一定的参考价值，但对于定量判断 GIS 中局部放电严重程度并对故障预警，尚需进一步研究临近击穿状态下局部放电信号特征参数的发展及分布规律。

### 3.4 尖端放电发展过程的演化机制

如图 13 所示，尖刺放电起始阶段，由于极性效应，正半周放电较少；在负半周放电则较为密集，且幅度较小。这是因为：当尖电极处于正半周时，电极尖端的强电场使得周围气体游离，电离产生的电子迅速进入尖电极，正离子则滞留在电极端部并缓慢向阴极迁移，从而削弱了尖电极端部的电场，放电熄灭；当尖电极处于负半周时，电极端部的强电场使得周围气体游离，电离产生的电子迅速向阳极迁移，正离子则缓慢向尖电极迁移，从而加剧了电极尖端的电场，使该区域的电离过程更加强烈，出现密集的小幅值放电。

尖端放电在发展过程中，电极结构的不对称性会产生整流效应，使得电极间隙中逐渐充满负空间

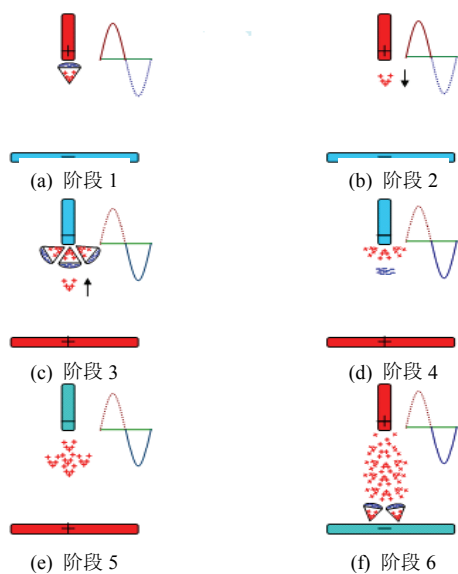


图 13 尖端放电发展演化机制

Fig. 13 Mechanism of development and evolution of point discharge

电荷。解释如下：每次尖电极处于正半周时，电极尖端电离出的电子都迅速进入电极，电离产生的正离子则缓慢向阴极迁移而形成正空间电荷。当外施电压转为负极性时，尖电极端部由于正空间电荷对电场的畸变会产生比正半周强烈得多的电离过程，由此产生的大量电子迅速向阳极迁移，在迁移过程中部分与空间的正离子中和，多余的部分极易被  $\text{SF}_6$  气体吸附而成为负离子并以极慢的速度向正极迁移；大量的正离子则向尖电极缓慢运动。随着电极极性的交替变化和放电过程的不断发展，电极间隙中始终有一部分正离子会不断从尖电极朝着板电极方向迁移，且其浓度会逐渐增大。

这样，当放电发展到一定程度后，电极间隙中靠近板电极附近的正离子浓度会逐渐累积到很高的水平，当板电极负极性时，正空间电荷在板电极附近形成强电场，并由此激发强烈的电离过程，从而使得在外施电压负半周(负尖正极)时的放电过程剧烈发展。放电发展到这一阶段极易发生击穿，成为尖端放电严重程度的重要表征。

在整个放电过程中，放电幅值和次数都表现出先增大后减少的趋势(见图 7—8)。由于正电晕出现得较负电晕晚，正电晕放电强度增大的过程与负电晕放电强度减弱的过程叠加，使得正负半周上放电次数之比和正负半周上最大放电幅值之比随试验时间的延长表现出逐渐增大的趋势。放电发展过程中，工频电压正负半周出现放电的先后以及放电幅值与次数分布与变化规律正反映了图 11—12 所示

的变化规律。

## 4 结论

1) 尖端放电的放电谱图在放电发展过程中的特征有所不同，在放电起始阶段主要出现在工频周期的负半周上，随着试验时间的增加，正半周出现放电信号，并逐渐增多，而负半周放电信号则逐渐减少。

2) 平均放电幅值和平均放电次数随试验时间的增加均表现出先增大后减小的趋势，这说明在判断其放电的严重程度时，并不能以放电幅值的大小和放电次数的多少作为依据。

3) 对于 GIS 中尖端放电而言，正负半周最大放电幅值之比和正负半周放电次数之比均随试验时间的增加表现出单调递增的规律，这 2 个参数对于诊断该种放电类型具有很好的参考价值。

4) 定义了放电次数随放电幅值增加的衰减速率，给出了放电次数衰减速率相对放电时间变化的数学模型，分析表明尖端放电的放电次数衰减速率随试验时间的增加逐渐加快。

本文的研究结果对于进一步定量判断尖端放电的严重程度及故障预警具有一定参考意义，但仍需进行大量的后续工作。

## 参考文献

- [1] 汪枫, 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(in Chinese).
- [2] 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 discrimination features in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 100-104(in Chinese).
- [3] 唐炬, 陈长杰, 刘帆, 等. 局部放电下  $\text{SF}_6$  分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 116-122.  
Tang Ju, Chen Changjie, Liu Fan, et al. Detection of constituents from  $\text{SF}_6$  decomposition under partial discharge and recognition of insulation defect coding[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 116-122(in Chinese).
- [4] 骆立实, 姚文军, 王军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的  $\text{SF}_6$  分解气体研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 231-236.  
Luo Lishi, Yao Wenjun, Wang Jun, et al. Research on partial discharge diagnosis of GIS by decomposed gas of  $\text{SF}_6$ [J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 231-236(in Chinese).
- [5] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 62-65.

- Liu Youwei, Wu Liyuan, Gong Yanpeng. Investigation on SF<sub>6</sub> decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 62-65(in Chinese).
- [6] 唐炬, 周倩, 许中荣, 等. GIS 超高频局放信号的数学建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 106-110.  
Tang Ju, Zhou Qian, Xu Zhongrong, et al. Establishment of mathematical model for partial discharge in GIS using UHF method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 106-110(in Chinese).
- [7] 刘卫东, 金立军, 钱家骊, 等. 日本 SF<sub>6</sub> 电器局部放电监测技术研究近况[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 76-81.  
Liu Weidong, Jin Lijun, Qian Jiali, et al. Review of recent researches on PD monitoring in gas insulated equipment in Japan[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 76-81(in Chinese).
- [8] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 43-46, 58.  
Qian Yong, Huang Chengjun, Jiang Xiuchen, et al. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 43-46, 58(in Chinese).
- [9] 黄兴泉, 康书英, 李泓志. GIS 局部放电超高频检测法有关问题的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 42-45, 68.  
Huang Xingquan, Kang Shuying, Li Hongzhi. Research on ultra-high-frequency method for detection of partial discharge in GIS [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 42-45, 68(in Chinese).
- [10] 崔在玉, 江昌元, 朴基俊, 等. 预防气体绝缘开关装置故障的高频局部放电在线实时监控[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 51-54.  
Cui Zaiyu, Jiang Changyuan, Piao Jijun, et al. On-line UHF partial discharge monitoring system for prevention of failures in gas-insulated switchgears[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 51-54(in Chinese).
- [11] 李立学, 滕乐天, 黄成军, 等. GIS 局部放电超高频信号的包络分析与缺陷识别[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 260-265.  
Li Lixue, Teng Letian, Huang Chengjun, et al. Envelope analysis and defects identification of partial discharge UHF signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 260-265(in Chinese).
- [12] 周倩, 唐炬, 唐铭, 等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 99-105.  
Zhou Qian, Tang Ju, Tang Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 99-105(in Chinese).
- [13] 李信, 李成榕, 丁立健, 等. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 26-30.  
Li Xin, Li Chengrong, Ding Lijian, et al. Identification of PD patterns in gas insulated switchgear (GIS) based on UHF signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 26-30(in Chinese).
- [14] Strachan S M, McArthur S D J, Judd M D, et al. Incremental knowledge-based partial discharge diagnosis in oil-filled power transformers[J]. Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005, 130(2): 181-186.
- [15] 李剑, 孙才新, 杜林, 等. 局部放电灰度图像分维数的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 123-127.  
Li Jian, Sun Caixin, Du Lin, et al. Study on fractal dimension of PD gray intensity image[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 123-127(in Chinese).
- [16] 刘云鹏, 律方成, 李成榕. 局部放电灰度图像数学形态谱的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 179-183.  
Liu Yunpeng, Lü Fangcheng, Li Chengrong. Study on pattern spectrum of partial discharge grayscale image[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 179-183(in Chinese).
- [17] Montanari G C. Aging and life models for insulation systems based on PD detection[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1995, 2(4): 667-675.
- [18] Bozzo R, Gemme G, Guastavino F. Aging diagnosis of insulation systems by PD measurements extraction of partial discharge features in electrical treeing[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1998, 5(1): 118-124.
- [19] Li Jian, Liao Ruijin, Grzybowski S, et al. Oil-paper aging evaluation by fuzzy clustering and factor analysis to statistical parameters of partial discharges[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 756-763.
- [20] Wada J, Na Kaj Ima A, Miya Hara H, et al. Surface breakdown characteristics of silicone oil for electric power apparatus[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 830-837.
- [21] Hanao Ka R, Kohrin T, Miya Gawa T, et al. Creepage discharge characteristics over solid-liquid interfaces with grounded side electrode[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 308-315.
- [22] 李军浩, 司文荣, 姚秀, 等. 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 109-112.  
Li Junhao, Si Wenrong, Yao Xiu, et al. Partial discharge characteristics over oil/paper interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 109-112(in Chinese).
- [23] 李军浩, 司文荣, 毕海涛, 等. 基于负极性下局部放电测量的变压器油中气泡发展过程实验研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 63-66.  
Li Junhao, Si Wenrong, Bi Haitao, et al. Study of bubble development in transformer oils based on PD measurement in negative point-plane gaps[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 63-66(in Chinese).
- [24] 李军浩, 司文荣, 姚秀, 等. 油纸绝缘内部气隙缺陷电劣化过程中局部放电的测量与模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 128-134.  
Li Junhao, Si Wenrong, Yao Xiu, et al. Measurement and simulation of partial discharge in disc-void of oil-pressboard insulation with electrical degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 128-134(in Chinese).
- [25] Pompili M, Mazzetti C, Bartnikas R. Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under AC conditions[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 395-403.
- [26] Pompili M, Mazzetti C, Bartnikas R. PD pulse burst characteristics of transformer oils[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 689-698.



王彩雄

收稿日期: 2011-03-09.

作者简介:

王彩雄(1983), 男, 博士研究生, 主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究, E-mail: wangcaixiong@gmail.com;

唐志国(1977), 男, 副教授, 主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的教学与研究工作;

李成榕(1957), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压绝缘技术及电晕测量方面的研究工作。

(责任编辑 马晓华)