

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.022

GIS中自由金属微粒缺陷局部放电信号特征分析

史文¹, 杨正理¹, 陈海霞¹, 陆朱卫¹, 王栋², 辛伟峰², 李军浩³

(1. 三江学院, 南京 210012; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450018; 3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 自由金属微粒是影响GIS设备安全稳定运行的主要缺陷之一, 为了进一步分析其产生的局部放电特性, 文中设计了可等效模拟真实缺陷的独立密封试验模型, 通过调节外施电压、微粒尺寸、微粒个数等措施, 对微粒缺陷引发的局部放电PRPD谱图、 $n-\varphi$ 谱图进行特征提取, 并分析了特征形成的原因, 尤其结合微粒运动形态, 对各阶段微粒所带电荷的转移、中和现象进行阐述, 为后续的研究和现场检测工作提供参考。

关键词: 气体绝缘组合电器; 自由金属微粒; 局部放电; 特征分析

Characteristic Analysis of Partial Discharge Signals of Free Metal Particle Defects in GIS

SHI Wen¹, YANG Zhengli¹, CHEN Haixia¹, LU Zhuwei¹, WANG Dong²,
XIN Weifeng², LI Junhao³

(1. Sanjiang University, Nanjing 210012, China; 2. Research Institute of Electric Power Science of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Free metal particles are one of the main defects affecting the safe and stable operation of GIS equipment. In order to further analyze the characteristics of partial discharge produced by them, an independent sealing test model which can simulate real defects is designed in this paper. By adjusting applied voltage, particle size and number of particles, PRPD and $n-\varphi$ spectra of partial discharge caused by particle defects are characterized. Analysis of the causes of formation of features, especially in the light of particle motion patterns, the transfer and neutralization of charges carried by particles at various stages are elaborated, which provides a reference for the follow-up research and field detection work.

Key words: gas insulated switchgear (GIS); free metal particles; partial discharge; characteristic analysis

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)具有占地面积小、可靠性高、维护工作量小等优点, 应用越来越广泛^[1-3]。在GIS设备的制造、运输、安装、运行过程中, 由于清理不彻底、振动磨损等因素, GIS设备内部不可避免地会出现各类自由微粒, 如灰尘、漆皮、金属碎屑等^[4-5]。对于GIS设备内部的稍不均匀电场而言, 这些微粒, 尤其是金属微粒极易畸变电场, 引发GIS设备内部击穿, 降低安全供电可靠性^[6]。自由金属微粒对GIS设备内部绝缘的影

响机理比较复杂, 是目前业内的研究重点和热点问题。现有主要做法是采用局部放电检测技术对微粒缺陷进行检测和诊断^[7-13]。微粒在未发生运动时, 会产生类似于壳体上尖端的放电信号, 而微粒开始运动时, 放电信号特征比较复杂, 目前业内还没形成清晰的结论。

为此, 文中制作了模拟真实GIS中自由金属微粒的实验小模型, 通过调节模型的外施电压来模拟微粒缺陷的放电发展过程, 通过放置不同数量、不同尺寸的微粒来模拟GIS设备实际运行存在的真实缺陷, 并通过脉冲电流法检测试验过程中的放电信

收稿日期: 2020-06-13; 修回日期: 2020-08-01

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(17KJB470011)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (17KJB470011)。

号,提炼了不同放电阶段、不同微粒数量情况下的放电 PRPD 谱图、 $n-\varphi$ 谱图特征,并对产生各种特征的原因进行分析,解释了微粒在运动过程中的放电过程,进一步阐述了微粒缺陷的放电机理,为后续的缺陷检测和诊断提供支撑。

1 模型和试验平台设计

1.1 微粒模型设计

针对 GIS 实际运行中出现的自由金属微粒缺陷,文中设计了一种微粒缺陷模型(以下简称微粒模型),上下电极板为铝制平板,间距为 150 mm;上下极板之间安装有透明有机玻璃管,并用 O 型密封圈组成封闭罐体,可清晰观察到微粒的运行状态;使用 6 根尼龙杆对上下极板进行螺栓连接,在下极板设置充放气口。实验表明,模型可在 72 h 内保持 0.5 MPa 的 SF_6 气体;为了使微粒产生稳定放电,且防止微粒逃离高场强区域,因此在模型内设置了高压电极板和有机玻璃管,其结构见图 1。

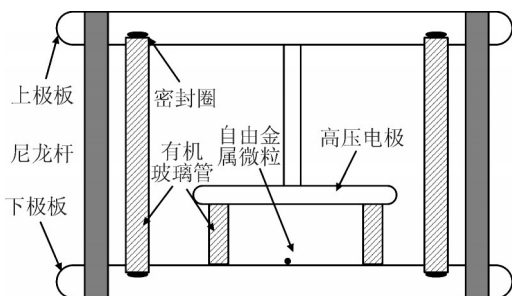


图1 自由金属微粒模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of free metal particle model

为防止模型本身产生干扰信号,各处边缘均做倒角处理,并在上下极板设置屏蔽环。试验表明,该模型内部未放置金属微粒时,内充 0.35 MPa 的 SF_6 气体,当外施电压升高至 40 kV 时才检测到电晕放电信号。因此,后续外施电压控制在 40 kV 以下。

试验过程中,使用的金属微粒为铝制球形颗粒,直径(φ)分别为 1.5、2.0、2.5 mm。在将金属微粒放入罐体中进行实验之前,均用无尘擦拭纸蘸取无水乙醇对其表面进行擦拭,确保无水分、污秽等附着在微粒表面,并且进行自然风干,以避免其他干扰放电信号的产生。

1.2 检测系统构建

文中构建的局放检测系统包括:电源装置、实验模型和局放检测装置。电源装置由控制台、调压器、试验变压器、保护电阻组成。试验变压器为工频无局放试验变压器,额定电压 $U_N=200$ kV,额定功率 $S_N=100$ kVA,200 kV 下局部放电量小于 10 pC;保护电阻串联在试验变压器的输出端与实验设备之

间,阻值为 5 k Ω ;耦合电容的电容量为 500 pF。局放仪采用 PDCheck,其检测频带为 16 kHz~30 MHz,记录放电 PRPD 谱图;同时采用 50 Ω 的宽带无感电阻作检测阻抗,通过示波器 Tek4054 采集宽带局放脉冲波形与序列。示波器带宽为 500 MHz,采样率为 2.5 GS/s。见图 2。

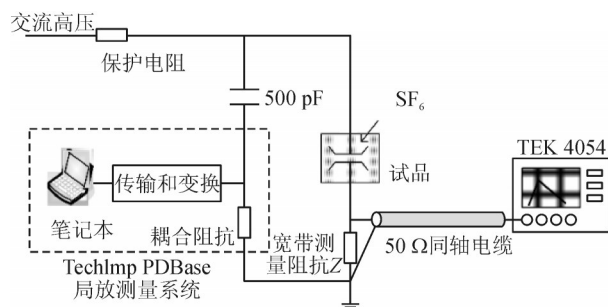


图2 局放检测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of partial discharge detection system

2 放电特征分析

2.1 放电谱图变化特征

文中分别对 $\varphi=1.5$ 、2.0、2.5 mm 的球形金属微粒模型进行局部放电试验,各尺寸微粒模型的放电谱图特征和变化规律相似,该节以 $\varphi=2.5$ mm 的微粒模型为例来进行分析。该模型起始放电电压为 9.0 kV,每次升压幅度为 0.5 kV,PRPD 谱图随外施电压升高的变化情况见图 3。

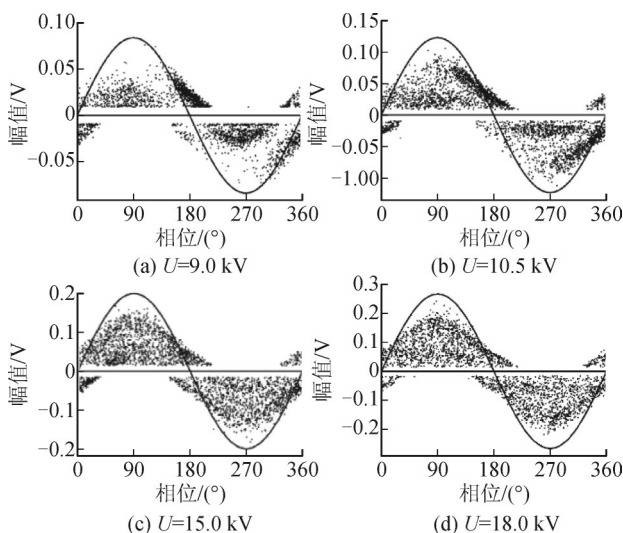


图3 单个自由金属微粒放电 PRPD 谱图

Fig. 3 PRPD spectrum of discharge of single free metal particles

图 3(a)为起始放电谱图,此时微粒在极板上偶尔做不规则的水平运动,大部分时间保持静止不动或在原地有小幅跳跃。此时放电相位已遍布整个工频周期,但并未形成完整的正弦包络带,在正

负半周峰值处的正弦包络带仍存在空白区域。此时放电主要聚集在正负半周的峰值处、工频的过零点附近,且正负半周峰值处的放电幅值较低。

外施电压继续升高至 10.5 kV 时,微粒的水平运动现象明显,且运动频率较高,偶尔还发生跳跃,但高度较小。放电谱图见图 3(b),正弦包络带已比较完整,但仍可见明显的放电集中现象,集中的区域与之前一个阶段相同。此时放电信号幅值明显增加,从前一阶段的 50 mV 升至约 100 mV。

外施电压为 15.0 kV 和 18.0 kV 的放电谱图见图 3(c)、(d)。两个阶段的放电谱图均出现完整的正弦包络带特征,信号幅值与外施电压成比例。但微粒在两个电压下的运动状态不同:外施电压为 15.0 kV 时,金属微粒在两极板之间频繁跳动,但跳动幅度仍未达到上电极,或以“打水漂”的形式在下极板上迅速水平运动;外施电压为 18.0 kV 时,微粒在两极板之间做竖直方向的剧烈跳动,可到达上电极。

为进一步分析微粒在不同电压下的放电谱图特征,文中统计了放电次数(n)与放电相位(φ)的分布情况,其 n - φ 分布见图 4。

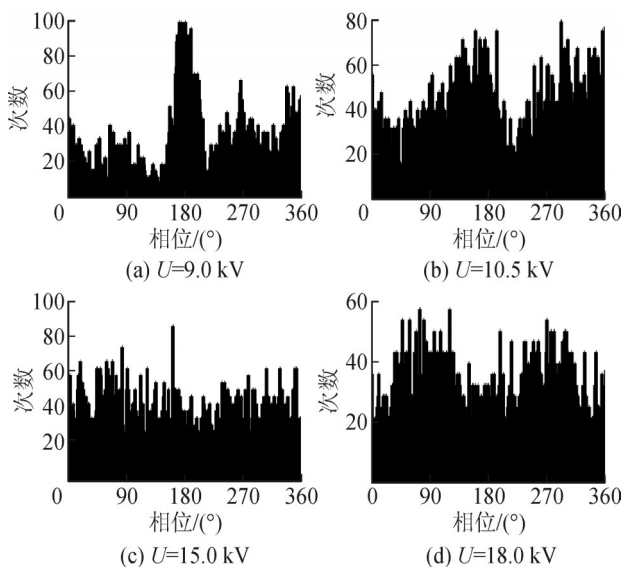


图4 单个金属微粒放电的 n - φ 谱图

Fig. 4 n - φ spectra of single metal particle discharge

外施电压为 9.0 kV 时, n - φ 谱图有 4 个峰值,放电频繁发生在工频正负半周的峰值和过零点处,且过零点处的放电次数较高。相比而言,正半周峰值处放电次数要低于负半周峰值处,而从工频正半周到负半周的过零点处,放电最集中,见图 4(a)。

外施电压升高到 10.5 kV 时, n - φ 谱图的峰值减少为两个,分别位于工频 160° 和 300° 左右。正负半周的对称性比较好,见图 4(b)。

外施电压为 15.0 kV 时,放电次数在整个工频周

期的分布比较平均。外施电压继续升高至 18 kV 时,放电次数在正负半周的峰值处最大, n - φ 谱图在正负半周均有峰值出现。见图 4(c)、(d)。

随着外施电压的升高, n - φ 谱图出现了 4 个阶段的变化特征:放电起始阶段的谱图在 0°、90°、180°、270° 出现峰值,第二阶段发展为处于 160° 和 300° 的两个峰值,第三阶段的谱图峰值特征消失,而在放电发展的最后阶段,分别在 90° 和 270° 出现两个峰值。可总结为 4 个不同发展阶段的 n - φ 谱图峰值个数变化规律为:4→2→0→2。

当外施电压较低时,将会有两种放电类型:一是微粒在下极板形成尖端所导致的“电晕”放电,发生在外施电压的峰值处;二是自由微粒由于感应电荷在外施电压极性反转时与下极板发生的电荷交换,发生在外施电压的过零点处,因此在谱图上表现为 4 个峰值特征。

外施电压继续升高,微粒开始水平运动,表现出悬浮电位放电特征,即外施电压过零点附近出现放电,且信号幅值和放电次数较大,使得初始放电谱图的 4 个峰值变为 2 两个。

外施电压继续升高,此时微粒已基本处于跳动状态,放电均为微粒与下极板的电荷交换,所以在整个工频周期都有发生放电,而且分布较为均匀。

当外施电压升高至微粒可以跳至上极板时,微粒既与下极板发生电荷交换,也与上极板发生电荷交换。在外施电压峰值处,微粒更容易到达上极板,使得外施电压峰值处的放电次数增多,因此谱图表现出 90°、270° 的两个峰值特征。

2.2 微粒尺寸对放电的影响

通过试验发现,直径分别为 1.5、2.0、2.5 mm 的微粒放电谱图特征相似,但不同尺寸下的微粒放电信号幅值变化明显。分别统计了 3 种尺寸微粒放电信号幅值的正负半周最大值、平均值统计对比见图 5。

结果表明,在同一电压下,直径越大的颗粒放电信号幅值越大;随着电压的升高,直径越大的微粒放电信号幅值最大值和平均值增长趋势越大。

2.3 多个微粒的放电特征

在实际运行 GIS 中发现金属微粒缺陷时,均为多个微粒同时存在^[14-18]。文中对多个微粒的局部放电特征进行了实验研究,在图 1 所示的模型中,放置多个 $\Phi=2.5$ mm 的球形微粒,个数分别为:2、5、10 个。

相对于单个微粒,多个微粒的局放起始电压更低:单个微粒的起始放电电压为 9 kV,2 个微粒的起始放电电压为 8.7 kV,而 5 个和 10 个微粒的起始放电电压均为 7.8 kV。同时也观察到,起始放电时微

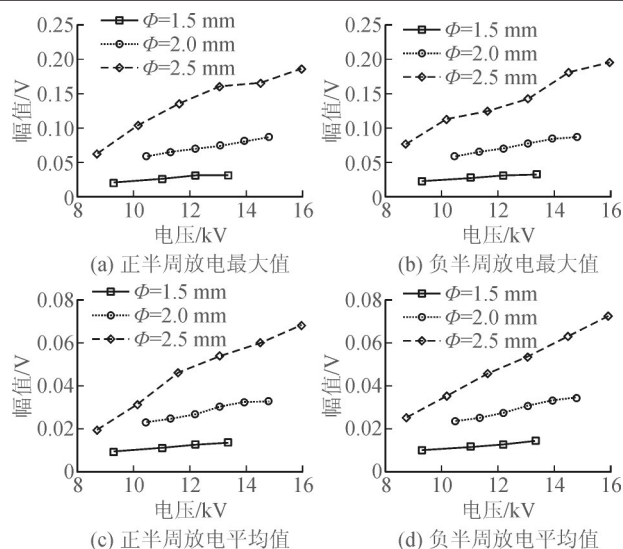


图5 各尺寸微粒放电幅值对比

Fig. 5 Comparisons of discharge amplitudes of particles of different sizes

粒发生了水平运动。这是因为在同一电场环境下,不同微粒会感应出极性相同的电荷,相互靠近的两个微粒会由于斥力作用而弹开,进而发生水平运动,导致微粒起始放电电压降低。但是,起始放电电压不再随微粒个数的增多而下降,其原因是微粒个数的增多对上述现象的促进作用已经饱和。

多个微粒放电谱图随外施电压的升高,变化趋势与特征与单个微粒的基本相同,但是在形成完整的正弦包络带后,多个微粒的放电信号出现了新的特征。16.5 kV下不同个数的微粒放电 PRPD 谱图见图6。

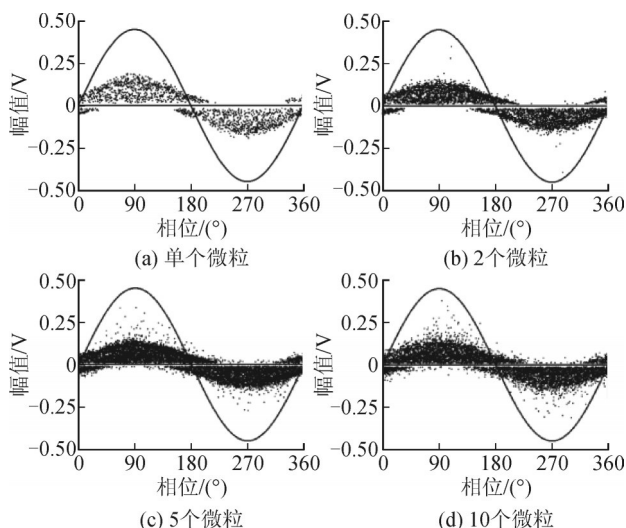


图6 不同个数微粒放电的PRPD谱图

Fig. 6 PRPD spectra of discharges of different numbers of particles

单个微粒的PRPD谱图的正弦包络带状分布清晰,在正弦包络带之外并无放电点出现。而多个微

粒的放电谱图虽然也表现为正弦包络带的特征,但是在包络带以外还有其他零星放电点的存在,且随微粒个数的增加,零星放电点的数量也明显增加。

为了分析信号幅值特征,采用放电幅值置信区间的方法,统计单个及多个微粒放电正弦包络带信号幅值,其放电信号最大值和平均值随微粒个数的变化趋势见图7。

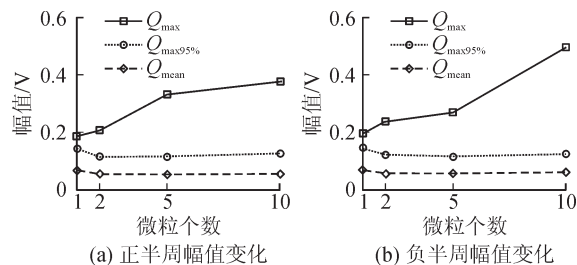


图7 放电幅值随微粒个数变化的趋势

Fig. 7 Trend of discharge amplitude with the number of particles

图7中: $Q_{\max 95\%}$ 指的是放电信号置信区间95%内的最大幅值; $Q_{\max}$ 为放电信号最大幅值; Q_{mean} 为放电信号平均幅值。由图7可见:

1)多个微粒的 $Q_{\max 95\%}$ 和 Q_{mean} 均稍小于单个微粒的 $Q_{\max}$ 、 Q_{mean} 。这是因为多个微粒存在时,微粒之间也会发生放电,而微粒之间放电能量要小于微粒与极板之间的放电。

2)多个微粒的 $Q_{\max 95\%}$ 和 Q_{mean} 并未随微粒的增多而明显变化,而 $Q_{\max}$ 随微粒的增多而出现明显增大趋势,微粒越多,放电信号最大幅值越大。 $Q_{\max}$ 反映的是谱图中正弦包络带外的零星放电。

根据已知的研究成果^[19-22],微粒在电场中会由于本身带有的电荷而在电场力的作用下从极板上跳起。而微粒在电场中运动时,其本身所带的电荷可能由于电场的作用而在微粒表面呈不均匀分布,姑且称此种现象为“极化”。多个“极化”的微粒在运动时,如果带有极性相反电荷的球面发生相撞,将导致电荷的中和,致使中和后的微粒剩余电荷量变大^[23],这可能是放电最大值增加的一种原因。

上述过程中最简单的一种情况见图8:两个极化的球形微粒在电场中碰撞致使带电量增加。在微粒未碰撞的阶段1,微粒A带有1个单位的正电荷,由于电场作用而使其表面电荷如图8所示的分布;微粒B未带电,但是在电场作用下有图8所示的电荷分布情况。阶段2表示两微粒碰撞时的情形,相撞球面的电荷发生中和现象;碰撞后的电荷分布如阶段3,此时微粒A由于碰撞而带有2个单位的正电荷,也即带电量由于碰撞而增加。

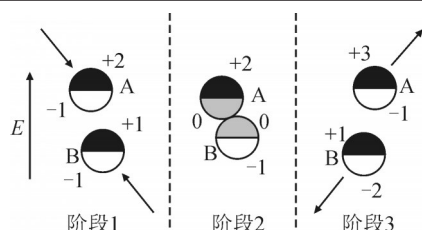


图8 微粒碰撞致使电荷量变化的一种情况

Fig. 8 A case of charge change caused by particle collision

单个微粒存在时,不会发生上述过程,而当多个微粒存在时,微粒在空间运动时的碰撞概率随着微粒个数的增多而变大。因此,微粒越多,微粒所能得到的最大电荷量就越大,同时其所产生的局放信号幅值最大值也就越大。另外,其他形状微粒运动时,其碰撞过程中的电荷中和、转移情况应更为复杂。

试验过程中,观察到微粒除了做水平运动、上下跳动外,还出现多个微粒在下极板上叠加的情形,此种情形也可能导致放电量的增加,具体的过程见图9。

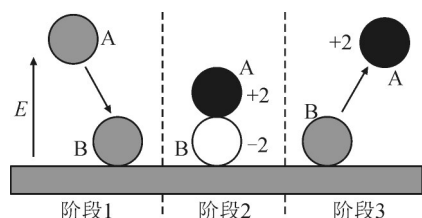


图9 微粒碰撞致使电荷量变化的另一种情况

Fig. 9 Another case of charge change caused by particle collision

如图9所示,微粒B始终在下极板,而微粒A跳起后落于微粒B上端(或者并未与下方微粒竖直接触,但接触到了微粒B的上半部分)。此时两微粒叠加,两微粒组成一个结合体,相当于极板表面一个更高的金属尖端(相对于单个微粒所构成的尖端而言),在同样的电场作用下,两微粒作为一个结合体获得电荷,这样处于微粒A就可能获得了更多的电荷。

3 结论

文中通过实验分析了GIS中自由金属微粒的局部放电特性。结果表明:

1)自由金属微粒缺陷在不同发展程度下表现出了不同的运动特征,具体也在放电PRPD谱图上有不同的表现形式:根据微粒运动剧烈程度的不同,区分微粒的运动阶段为静止不动→水平运动→上下跳跃→跳至上电极附近;与各阶段对应的PRPD谱图特征主要表现为正弦包络带的逐步形成,而各

阶段对应的 $n-\varphi$ 谱图峰值个数有明显变化规律:4→2→0→2,产生这种变化的原因可能是放电来源的不同。

2)微粒尺寸越大其放电信号幅值越大,且直径越大的微粒放电信号幅值最大值和平均值增长趋势越大。

3)相比于单个微粒,多个微粒的起始放电较低,放电信号幅值较大,PRPD谱图中的正弦包络带之外出现明显放电信号。随着微粒数量的增多,放电信号最大值增长明显,但不同数量微粒的平均放电信号幅值和95%置信区间内的最大放电幅值变化不明显。

参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007.
QIU Yuchang. GIS device and insulation technology[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007.
- [2] 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.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. Online monitoring and fault of power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [3] 任敬国,辜超,师伟,等. 1 100 kV GIS设备主回路绝缘试验电气参量估算方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(3):103-109.
REN Jingguo, GU Chao, SHI Wei, et al. Research on evaluation method of electric parameters of 1 100 kV GIS main circuit insulation test[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 103-109.
- [4] 孙强,董明,任重,等. 现场用GIS冲击耐压试验及局部放电检测装置设计[J]. 高电压技术,2012,38(3):639-644.
SUN Qiang, DONG Ming, REN Zhong, et al. Field test and analysis of partial discharge on GIS under impulse voltage [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 639-644.
- [5] 李天辉,贾伯岩,顾朝敏,等. 1 100 kV GIS现场交流耐压试验放电定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 116-121.
LI Tianhui, JIA Boyan, GU Chaomin, et al. Study on discharge location technology for 1 100 kV GIS field AC withstand voltage test[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 116-121.
- [6] UETA G, KANEKO S, OKABE S. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms - breakdown characteristics under non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1430-1438.

- [7] QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: Process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 792-800.
- [8] HARA M, MAEDA Y, NAKAGAWA N, et al. DC breakdown voltage characteristics of saturated liquid Helium in the presence of metallic particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3): 470-476.
- [9] 贾江波, 张乔根, 师晓岩, 等. 交流电压下绝缘子附近导电微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 7-11.
JIA Jiangbo, ZHANG Qiaogen, SHI Xiaoyan, et al. Motion of conducting particle near PTFE spacer under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 7-11.
- [10] ASANO K, HISHINUMA R, YATSUZUKA Y. Bipolar DC corona discharge from a floating filamentary metal particle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(1): 57-63.
- [11] 张璐, 王森, 孙蕾, 等. 金属微粒对GIS中绝缘子冲击闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2807-2814.
ZHANG Lu, WANG Sen, SUN Lei, et al. Influence of metal particle on impulse flashover characteristics of insulator in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2807-2814.
- [12] 朱文, 赵晓凤. 油液金属颗粒对500 kV变压器出线装置电场的影响[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 112-118.
ZHU Wen, ZHAO Xiaofeng. Influence of oil metallic particles on electric field of 500 kV transformer outlet device[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 112-118.
- [13] 黄军凯, 刘崇斌, 刘华麟, 等. SF₆气体中金属尖端在振荡冲击电压下的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3872-3880.
HUANG Junkai, LIU Chongbin, LIU Hualin, et al. Characteristics of partial discharges at metal protrusion under oscillating impulse voltages in SF₆ gas[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3872-3880.
- [14] 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.
- [15] 贾江波, 陈姝敏, 杨兰均, 等. GIS中绝缘子附近自由导电微粒无害化研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 370-372.
JIA Jiangbo, CHEN Shumin, YANG Lanjun, et al. Study of deactivation of free conducting particle near spacer in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 370-372.
- [16] 牛勃, 丁培, 马飞越, 等. 粒子群优化算法在电气设备特高频局部放电定位中的应用[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 95-102.
NIU Bo, DING Pei, MA Feiyue, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in electrical equipment UHF PD source positioning[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 95-102.
- [17] KUMAR G N, SRIVASTAVA K D. Electric field effect on metallic particle contamination in a common enclosure gas insulated busduct[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 334-340.
- [18] UPADHYAY P, AMARNATH J. Movement of metallic particle in coated and uncoated SF₆/N₂ gas mixture GIB[C]// IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India: IEEE, 2008: 1-4.
- [19] 汪佛池, 曹东亮, 杨磊, 等. 微粒陷阱对直流稍不均匀场中球状自由导电微粒运动的影响规律[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2897-2903.
WANG Fochi, CAO Dongliang, YANG Lei, et al. Effect of particle traps on movement of spherical free-conducting particles in slightly inhomogeneous DC field[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2897-2903.
- [20] MORCOS M M, ZHANG S, SRIVASTAVA K D, et al. Dynamics of metallic particle contaminants in GIS with dielectric-coated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 455-460.
- [21] IMANO A M. The influence of the dielectric strength of the N₂/SF₆ insulation by conducting particle on the spacer surface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 483-490.
- [22] KHAN Y, OKABE S, SUEHIRO J, et al. Proposal for new particle deactivation methods in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 147-157.
- [23] PÄHTZ T, HERRMANN H J, SHINBROT T. Why do particle clouds generate electric charges?[J]. Nature Physics, 2010, 6(5): 364-368.

史文(1983—),女,硕士,讲师,从事输变电设备状态检测与评估相关工作(E-mail: 13814086046@163.com)。