

GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电相位图谱

吴治诚¹, 张乔根¹, 宋佳洁¹, 杜乾栋¹, 李晓昂¹, 李志兵²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: GIS 内自由导电微粒的存在是对 GIS 绝缘的最大威胁, 如何检测 GIS 内自由导电微粒缺陷成为提高 GIS 设备运行可靠性亟待解决的问题之一。为此, 搭建了 GIS 内自由导电微粒局部放电研究平台, 明确了自由导电微粒造成的局部放电信号与微粒运动的关系, 推导得到了理论局部放电相位图谱, 该结果与实验结果相符。根据上述模型提出了 GIS 内自由导电微粒缺陷识别方法, 并对现场工频局部放电试验的检测有效性进行研究。结果表明, GIS 内自由导电微粒缺陷的理论局部放电相位图谱为正弦带状包络, 呈现出对称性强、重复率低、放电全相位分布等特点; 现场工频局部放电试验能够检测出不超过 1 mm 的铝质自由微粒, 对 GIS 内自由导电微粒缺陷具有较高的检测有效性。研究为 GIS 内自由导电微粒缺陷的识别技术提供了理论支持。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 自由导电微粒; 局部放电相位图谱; 缺陷识别; 检测有效性

Phase Resolved Partial Discharge Pattern of Free Conductive Particle Defects in GIS

WU Zhicheng¹, ZHANG Qiaogen¹, SONG Jiajie¹, DU Qiandong¹, LI Xiao'ang¹, LI Zhibing²

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

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The presence of free conductive particles in GIS is the greatest threat to GIS insulation. How to detect foreign matter defects in GIS, especially free conductive particles, is one of the problems to be urgently solved to improve the reliability of GIS equipment. Consequently, we established a research platform of partial discharge of free conductive particles in GIS, and analyzed the relationship between the partial discharge signal and the particle motion caused by free conductive particles. The theoretical phase resolved partial discharge pattern was deduced, which is in accordance with the experimental results. According to the model, the identification method for free conductive particle defects in GIS was proposed, and the effectiveness of free conducting particles defects in GIS was studied. The results show that the phase resolved partial discharge of free conducting particles in GIS is a sinusoidal envelope band. The pattern shows strong symmetry, low repetition rate and full phase distribution. The on-site power-frequency partial discharge tests can be performed to detect free aluminum particles less than 1mm, and are highly effective in detecting the free conducting particles defects in GIS. This study provides theoretical support for the identification of free conductive particles defect in GIS.

Key words: gas-insulated metal-enclosed switchgear; free conductive particle; phase resolved partial discharge pattern; defects identification; detection effectiveness

0 引言

为了满足在城市及土地面积紧张地区设置变电站的需要^[1], 气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS)开始向小型化、高可靠性、智能化发展^[2-6]。根据国际大电网会议 CIGRE 33/23.12 工作组的统计, 不同电压等级 GIS 设备的故障率均超过了绝缘故障率 0.1 次

/(百间隔·年)的指标^[7]。工作组对造成绝缘故障的原因进行了统计, 调查表明, 由微粒或外来异物造成的绝缘故障占 20%。在外施电场或机械振动的影响下, 微粒或外来异物将在 GIS 设备中运动, 并可能在特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)到来时引发异常放电^[8]。例如, 青海电网安通站 363 kV GIS 设备经过交流耐压试验后, 投运充电时发生绝缘子沿面闪络, 造成单相接地故障。经分析, 事故原因是现场安装环境控制不当, 导致煤渣、铝粉等异物进入 GIS 内部, 畸变电场后引发放电^[7]。

即使严格控制 GIS 设备的现场安装环境, 由于

基金资助项目: 国家电网公司科技项目(特高压长距离 GIL 绝缘、通流、密封可靠性综合提升能力分析研究)。

Project supported by Science and Technology Project of SGCC(Research on the Reliability Comprehensive Improvement for Insulation, Current Capability and Sealing of Long Distance UHV GIL).

产品制造过程中的加工工艺不良、搬运中的机械摩擦、电器部件的分合操作以及运行中火花放电对电极的损伤都可能导致自由导电微粒产生^[9], GIS 内自由导电微粒的污染是不可避免的。综上, GIS 内金属导电微粒是对 GIS 设备正常运行的最大威胁。如何检测 GIS 内自由导电微粒缺陷,是提高 GIS 设备运行可靠性亟待解决的问题之一^[10-11]。

现场运行经验表明, GIS 设备的绝缘缺陷主要由设计缺陷、加工缺陷与运输安装不当导致,这 3 类故障各占全部绝缘故障的 30%^[7]。因此,对于入网投运的 GIS 设备,应该开展出厂试验及现场试验。出厂试验主要使用标准《GB/T 7354 局部放电测量》规定的常规方法(即脉冲电流法)对 GIS 设备局部放电进行测量,而现场试验由于噪声较大,难以使用脉冲电流法进行局部放电测量,目前主要采用特高频法^[12-13]。

对于 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电信号特征,学者进行了广泛研究,基本认为由自由导电微粒缺陷造成的局部放电具有如下特征:局部放电相位谱图正、负半周波形对称,放电幅值基本相同^[14-16]。也有学者使用了多特征信息融合技术、人工神经网络等手段,对于不同类型的局部放电类型进行识别^[17-19]。但以上研究并未对 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电机理进行分析,对于其放电特性也仅限于定性角度。

本文搭建了 GIS 内自由导电微粒局部放电研究平台,明确了自由导电微粒造成的局部放电信号与微粒运动的关系,推导得到了理论局部放电相位图谱,与实验结果相符。根据上述模型提出了 GIS 内自由导电微粒缺陷识别方法,并对现场工频局部放电试验的检测有效性进行研究。研究为 GIS 内自由导电微粒缺陷的识别技术提供了理论支持。

1 实验设置及方法

为了研究 GIS 内部自由导电微粒缺陷局部放电相位图谱特性,搭建了如图 1 所示实验平台。

实验腔体使用钢制同轴圆柱电极系统,内导体直径为 18 mm,壳体内径为 88 mm。选用铝质球形微粒模拟 GIS 内自由导电微粒缺陷。

实验腔体与 400 kV/90 kVA 的无局放工频变压器相连。该变压器经过无晕设计,可在输出电压为 400 kV 时保证自身局放量 <5 pC。局部放电信号采用脉冲电流法获取,回路采用标准《GB/T 7354 局

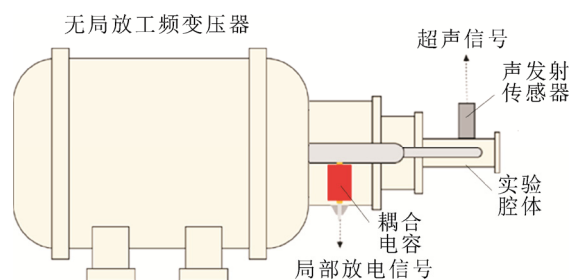


图 1 实验平台示意图

Fig.1 Experimental platform diagram

部放电测量》中推荐的并联试验回路,将实验腔体与 300 kV/100 pF 耦合电容并联,耦合电容低电位端与测量阻抗连接,局部放电信号自测量阻抗采集^[20]。

超声信号采集系统主要由声发射传感器、前置放大器和示波器组成。根据《DL/T 304—2011 气体绝缘金属封闭输电线路现场交接试验导则》,超声测量频率应在 20~100 kHz 之间,实验选用型号为 SR40M 的声发射传感器,谐振频率为 40 kHz,满足测量需求^[21]。传感器与实验腔体外壳紧密接触,接触面均匀涂抹耦合剂,消除实验腔体与传感器间的气隙,减小信号衰减。实验采用型号为 PAI 的前置放大器,其带宽为 10 kHz~2 MHz,增益为 40 dB,输入阻抗 >50 M Ω ,满足对超声信号的放大要求。

进行实验前,将实验腔体抽至真空后,再向腔体内充入 0.5 MPa SF₆ 气体,静置后进行实验。实验时使用 Tektronix DPO4104 示波器对超声信号进行采集,该示波器带宽为 1 GHz,采样频率为 5 GHz。

2 实验结果及讨论

2.1 局部放电信号与微粒运动状态的关系

研究 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部相位图谱特性,需要首先明确局部放电信号与微粒运动之间的关系。图 2 是有效值 80 kV 工频电压下 1 mm 直径铝质球形微粒在实验腔体中的超声信号 U_{ac} 与微粒运动轨迹。微粒运动轨迹使用高速相机拍摄,使用微粒与外壳距离 h 表征微粒的运动位置。由图 2 分析可得,当微粒与极板碰撞时,就能检测到对应的超声信号。因此,超声信号与微粒碰撞信号存在映射关系,可以使用超声信号表征自由导电微粒的运动状态。

为了明确局部放电信号与微粒运动状态的关系,使用示波器同时测量微粒碰撞时的超声信号与局部放电信号。当使用局部放电信号上升沿作为触发源时,波形如图 3(a)所示;当使用超声信号上升

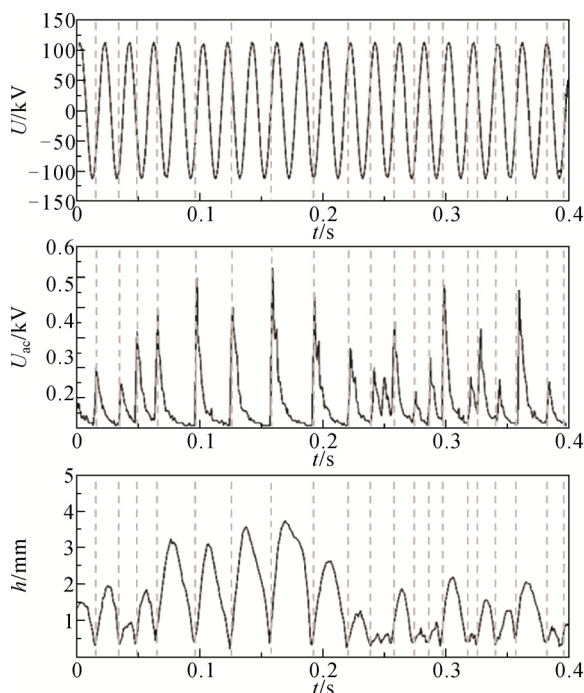


图2 自由导电微粒运动时的超声信号、运动轨迹

Fig.2 Acoustic signal and move trace of free conductive particle

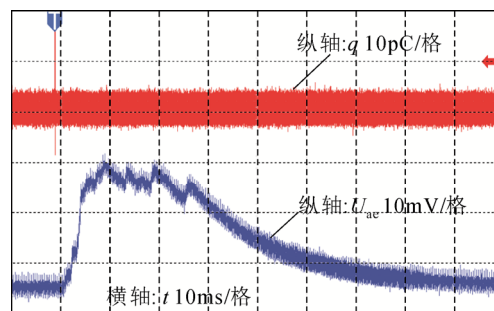
沿作为触发源时, 波形如图 3(b)所示。图 3 中, 上方的信号为局部放电信号, 下方的信号为超声信号, 右侧箭头表示触发源及触发电平, 上方箭头表示触发时刻。由图 3 可知, 检测到脉冲电流信号后总伴随着超声信号, 二者一一对应。结合超声信号与碰撞信号映射关系, 当自由导电微粒未出现与高压导杆碰撞情况下, 局部放电信号在微粒与外壳碰撞时发生。

2.2 局部放电相位图谱理论分析

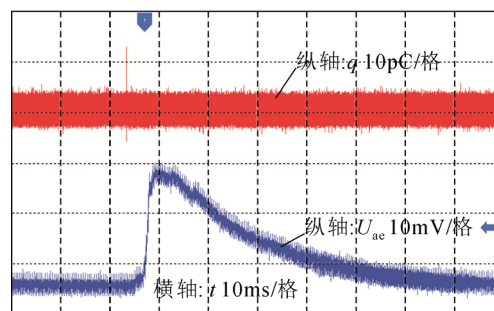
由上节的分析结果可知, GIS 内自由导电微粒缺陷导致的局部放电信号在自由导电微粒与外壳碰撞时发生, 因此, 局部放电相位图谱与自由导电微粒在飞行状态下的带电量有关。

不考虑微粒在飞行状态的微放电时, 处于飞行状态的微粒所带电荷量为前一次与电极碰撞时获得的电荷量。由于工频电压在每个周期内极性均会发生翻转, 因此微粒与高压导体碰撞的概率较小, 文中仅考虑微粒与外壳碰撞的情况。微粒在与外壳碰撞时, 其带电量将会发生突变。

当自由导电微粒与外壳碰撞时, 所带电荷量与该位置电场强度的瞬时值有关。对于球形微粒, 其带电量 q_s 见式(1)^[22]。对于处于平躺或竖立状态的线形微粒而言, 其带电量 q_{ll} 、 q_{ls} 分别见式(2)、(3)^[23]。



(a) 使用局部放电信号作为触发源



(b) 使用超声信号作为触发源

图3 局部放电信号与超声信号波形

Fig.3 Partial discharge signal and acoustic signal

$$q_s = \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon r_1^2 E \quad (1)$$

$$q_{ll} = 2 \pi \epsilon r_2 l E \quad (2)$$

$$q_{ls} = \frac{\pi \epsilon l^2 E}{\ln\left(\frac{2l}{r_2}\right) - 1} \quad (3)$$

式中: r_1 为球形微粒半径; r_2 为线形微粒圆形截面半径; l 为线形微粒长度; ϵ 为气体介电常数; E 为微粒所处位置电场强度。

对于同轴圆柱电极系统, 电极间某处的电场强度为

$$E = \frac{U}{(R_1 - x) \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (4)$$

式中: U 为母线瞬时电压; x 为微粒距外壳距离; R_1 为外壳内半径; R_2 为母线半径。由于微粒的尺寸远小于同轴圆柱电极间隙, 起跳前的微粒静止于外壳底部时, 可使用外壳底部位置的电场强度估算微粒所在位置的电场强度, 即 $x=0$ 的情况。

根据 GIS 内自由导电微粒进行受力分析, 使用线形多步法求解微粒运动方程可以得到微粒的运动轨迹, 所使用数值计算方法可查阅文献[24]。

根据前述对于微粒碰撞时刻电荷量突变的分析, 将每次碰撞后的电荷与上次碰撞电荷之差作为该次碰撞的局部放电放电量, 即

$$q = Q_n - Q_{n-1} \quad (5)$$

式中: q 为该次碰撞的局部放电放电量; Q_n 为第 n 次碰撞后带电量。对实验腔体内直径为 1 mm 的铝质球形微粒在外施电压分别为 45、60、75 及 90 kV 的情况下的局部放电相位图谱进行数值计算, 结果如图 4 所示。联立式(1)、(4)可得到球形微粒飞行中的最大带电量计算式为

$$Q_{\max} = \frac{2\sqrt{2}\pi^3 \varepsilon r^2 U_{\text{rms}}}{3R_1 \ln(\frac{R_1}{R_2})} \quad (6)$$

式中 U_{rms} 为外施电压有效值。使用式(6)对上述情况微粒飞行中的最大带电量 Q_{\max} 进行计算, 计算结果如表 1 所示。

数值计算结果表明, 局部放电信号呈正弦带状包络, 上、下包络线均与工频电压反相。上包络线具有正偏置, 下包络线具有负偏置, 上、下包络线的偏置的绝对值相等, 均为表 1 所示的微粒最大带电量 Q_{\max} 。上包络线在正半周期峰值处出现极小值, 最小值为 0 pC; 在负半周期峰值处出现极大值, 最大值为 $2Q_{\max}$; 下包络线在正半周期峰值处出现极小值, 最小值为 $-2Q_{\max}$; 在负半周期的峰值处出现极大值, 最大值为 0 pC。

从数值计算结果可以抽象出缺陷的局部放电模型。GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电是由于微粒碰撞时放电、再充电导致的。考虑该次碰撞相位为 90° 的自由导电微粒, 发生该次碰撞后带电量应为 Q_{\max} ; 若前次碰撞相位为 270° , 其带电量为 $-Q_{\max}$, 因此该次局部放电电荷量为 $-2Q_{\max}$; 若前次碰撞相位为 90° , 其带电量为 Q_{\max} , 因此该次局部放电电荷量为 0。因此, 局部放电相位谱图呈现出正弦包络带的形式。其理论局部放电相位谱图如图 5 所示。上、下包络线放电量表达式为:

$$q_{\text{up}} = -Q_{\max} (\sin(100\pi t) - 1) \quad (7)$$

$$q_{\text{down}} = -Q_{\max} (\sin(100\pi t) + 1) \quad (8)$$

2.3 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电模型实验验证

为了验证上述 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电模型, 在实验腔体内进行了验证实验。

在实验腔体内设置直径为 1 mm 的球形铝质微粒, 外施电压有效值分别为 45、60、75 及 90 kV, 使用脉冲电流法测量局部放电信号。局部放电相位图谱如图 6 所示, 图中虚线表示理论局部放电相位图谱包络线。

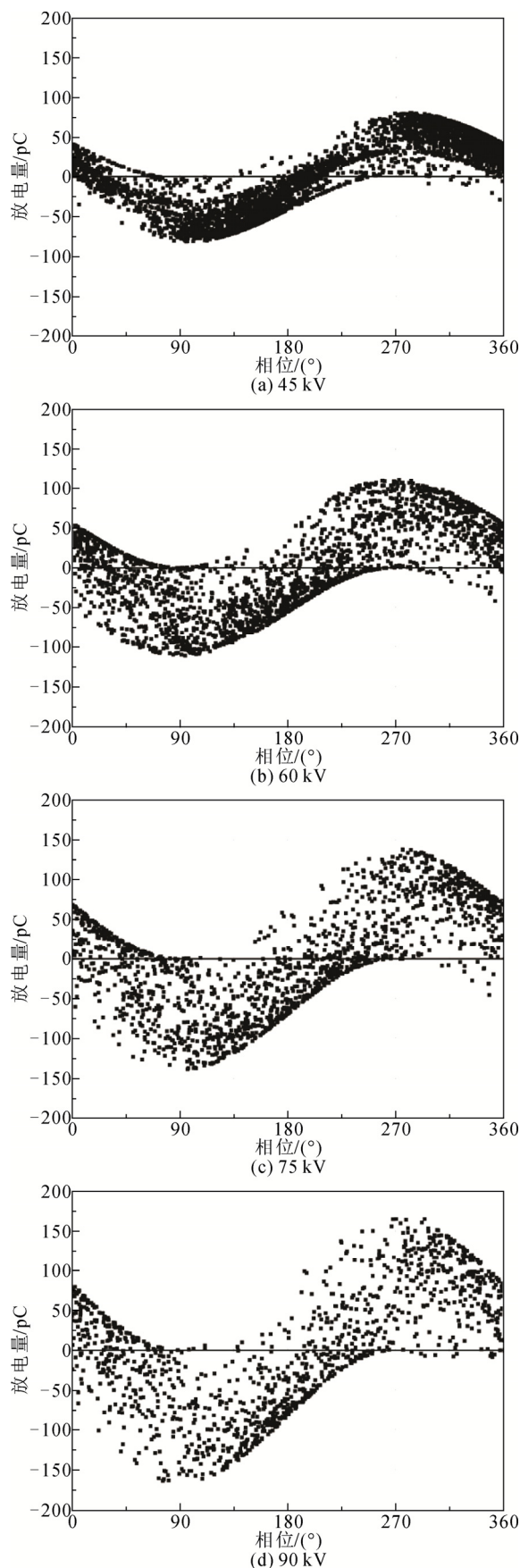


图 4 不同外施电压下局部放电相位图谱数值计算结果

Fig.4 Calculation results of phase resolved partial discharge pattern under different applied voltage

表 1 1 mm 球形微粒不同外施电压下的最大带电量
Table 1 Max charge of spherical particle of 1 mm diameter
under different applied voltage

外施电压/kV	最大带电量/pC
45	41.68
60	55.58
75	69.47
90	83.36

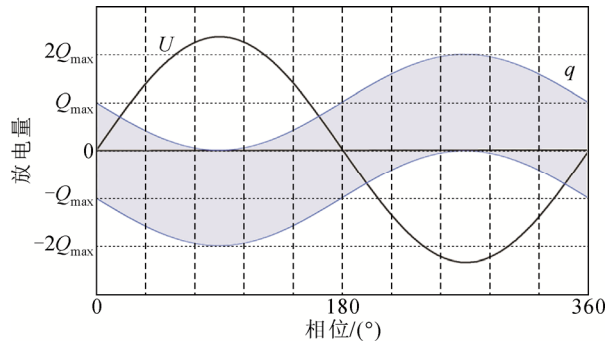


图 5 理论局部放电相位图谱

Fig.5 Theoretical phase resolved partial discharge pattern

图 6 的实验结果与虚线所示的理论局部放电相位谱图包络线对应良好, 因此可以使用该模型对 GIS 内部自由导电微粒缺陷产生的局部放电相位图谱进行描述。根据该模型, 可以推导出 GIS 内自由导电微粒缺陷的识别方法及验证工频局部放电试验对 GIS 内部自由导电微粒缺陷检测的有效性。

2.4 GIS 内自由导电微粒缺陷识别方法

对于出厂试验, 局部放电试验通常使用标准《GB/T 7354 局部放电测量》推荐的常规脉冲电流法, 根据上述 GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电模型, GIS 自由导电微粒缺陷体现出如下的特征:

1) 脉冲极性与外施电压反相。当采用脉冲电流法并联法接线时, 通常在正半周期的放电为负极性, 在负半周期的放电为正极性。

2) 对称性强。正半周期与负半周期局部放电量大小相等, 正负相反, 放电重复率差别不大。

3) 重复率低。由于自由导电微粒引起的局部放电实质是微粒与外壳碰撞时的放电、再充电过程, 因此局部放电信号的重复率较低, 与微粒与极板碰撞的重复率相近, 一般小于 50 次/s。

4) 放电全相位分布。诸如母线表面凸起物、壳体凸起物等缺陷, 局部放电机理为局部电场集中导致的电晕放电, 因此该类缺陷在电压过零点附近

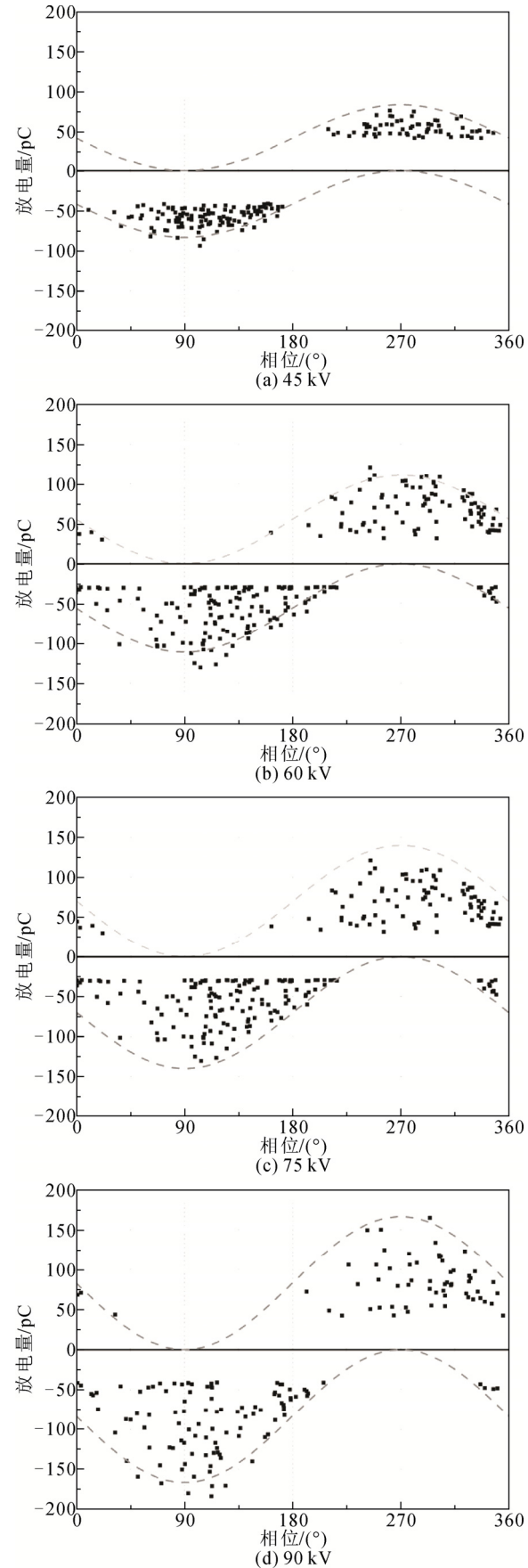


图 6 不同外施电压下局部放电相位图谱实验结果

Fig.6 Experimental result of phase resolved partial discharge pattern under different applied voltage

电场较低, 不会发生局部放电。但自由导电微粒缺陷在全相位均能够检测到局部放电信号。因此, 一旦在局部放电相位图谱中观察到过零点仍然有局部放电脉冲, GIS 内存在自由导电微粒缺陷的可能性较高。

另外, 对于现场试验广泛采用的特高频法局部放电测量设备, 由于通常不具有分辨极性的能力, 因此, 使用特高频局部放电检测仪检测到的理论 GIS 内部自由导电微粒的局部放电相位谱图如图 7 所示。《国网冀北电力有限公司电力设备带电检测技术规范》中给出了 GIS 特高频局部放电检测的典型图谱, 图 8 是自由导电微粒导致的局部放电相位图谱^[25]。图 8 所示的局部放电相位图谱与图 8 根据模型推导出的图谱基本一致, 均为分布在正、负半周期的对称双峰形。其他特征与脉冲电流法一致。

综上所述, 对于出厂试验常用的脉冲电流法, 由 GIS 自由导电微粒缺陷导致放电具有脉冲极性与外施电压反相、对称性强、重复率低、放电全相位的特点; 对于现场试验常用的特高频法, 由于通常不具有分辨极性的能力, 因此局部放电相位谱图为分布在正、负半周期的对称双峰形。

2.5 现场工频局部放电试验对 GIS 内自由导电微粒缺陷检测的有效性

上述局部放电模型从定量角度给出了微粒在不同外施电压下的局部放电量, 由此可以对现场工频局部放电试验对该类缺陷的检测有效性进行评估。

由于串联谐振装置的广泛采用, 现场广泛开展标准《GB 7674—2008 额定电压 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》中推荐的工频局部放电试验, 作为 GIS 设备现场交接时的绝缘试验^[24]。现场工频局部放电试验电压为 1.2 倍运行电压, 在此电压下按照标准《GB/T 7354 局部放电测量》规定的方法测量局部放电, 若 5 min 内局部放电量>10 pC, 则试验不通过^[19]。

检测有效性评估步骤为: 首先计算在现场工频局部放电试验中能够起跳的自由导电微粒尺寸, 即起跳临界尺寸; 之后计算在该试验中最大局部放电量将超过 10 pC 的自由导电微粒尺寸, 即检测临界尺寸。

该部分计算所用的电压等级分别为 126、252、550 及 1100 kV 的 GIS 设备的尺寸及现场工频局部放电试验电压下壳体表面场强见表 2。

根据表 2 现场工频局部放电试验下壳体表面场

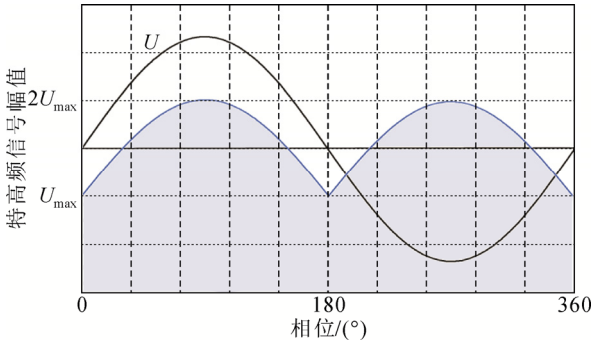


图 7 理论局部放电相位图谱(特高频法)

Fig.7 Theoretical phase resolved partial discharge pattern (UHF method)

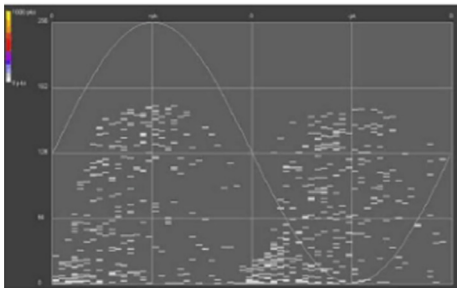


图 8 GIS 内自由导电微粒典型局部放电相位图谱

Fig.8 Typical Phase Resolved Partial Discharge of free conducting particle defects in GIS

表 2 计算所用 GIS 设备尺寸及工频局部放电试验电压下壳体表面场强

Table 2 Size and field strength during power-frequency partial discharge test of GIS				
电压等级 /kV	母线外径 /mm	壳体内径 /mm	局部放电 试验电压/kV	壳体表面场强 /(kV·cm ⁻¹)
126	72	230	90	9.53
252	90	290	175	14.59
550	140	560	385	14.03
1100	180	880	765	15.49

强, 结合起跳条件及微粒质量, 可以得到工频局部放电试验下的起跳临界尺寸。

起跳条件为微粒所受电场力大于所受重力(g 为重力加速度), 即

$$\frac{qE}{m} \geq g \tag{9}$$

球形和线形微粒的质量 m_s 、 m_l 分别为:

$$m_s = \frac{4}{3}\pi r_1^3 \rho \tag{10}$$

$$m_l = \pi r_2^2 l \rho \tag{11}$$

联立式(1)、式(2)和式(9)—式(11), 计算出现场

工频局部放电试验的检测临界尺寸。自由导电微粒缺陷造成的局部放电量为该微粒飞行中最大带电量 Q_{\max} 的两倍, 因此使用式(6)可以计算出最大放电量为 10 pC 的微粒尺寸。

对于铝质球形微粒而言, 计算得到的不同电压等级 GIS 设备内自由导电微粒在现场工频局部放电试验中的起跳临界直径及检测临界直径见表 3。

表 3 表明, 对于 126 kV 的 GIS 设备而言, 直径 <2.99 mm 的球形铝质微粒可以起跳、运动, 导致局部放电; 对于 252 kV 及以上的 GIS 设备, 直径 <6 mm 的球形铝质微粒均能够导致局部放电。GIS 内典型微粒尺寸一般在百微米量级, 因此现场工频局部放电试验几乎能够使大部分铝质微粒起跳、运动。对于各电压等级的 GIS 设备而言, 现场工频局部放电试验能检测出 >0.3 mm 的铝质球形微粒。

同理, 可以得到线形微粒的起跳临界尺寸及检测临界尺寸。计算结果表明, 线形铝质微粒如果其圆形截面半径 <0.6 mm 即可运动; 对于电压等级为 126 kV 的 GIS 设备而言, 工频局部放电试验能够检测出长度 >0.72 mm 的线形铝质微粒; 对于 252 kV 及以上的 GIS 设备, 长度 >0.59 mm 的线形铝质微粒能够被检测出。

综合以上结果, 现场工频局部放电试验几乎能够使大部分铝质微粒起跳、运动; 试验可以检测出不到 1 mm 的铝质自由微粒, 对自由导电微粒具有较高的检测有效性。

3 结论

1) 不考虑微粒在飞行状态的微放电情况下, 局部放电信号在自由导电微粒与外壳碰撞时发生, 局部放电相位图谱与自由导电微粒在飞行状态下的带电量有关。

2) 结合局部放电相位图谱数值计算结果进行理论推导, 得到了 GIS 内自由导电微粒局部放电模型, 理论局部放电相位图谱与实验结果相符。GIS 内自由导电微粒理论局部放电相位图谱为正弦带状包络。

3) 根据前述局部放电模型, 得到了 GIS 内自由导电微粒缺陷局部放电的识别特征: 对于出厂试验常用的脉冲电流法, 由 GIS 自由导电微粒缺陷导致的局部放电具有脉冲极性与外施电压反相、对称性强、重复率低、放电全相位的特点; 对于现场试验常用的特高频法, 由于通常不具有分辨极性的能

表 3 不同电压等级 GIS 设备内自由微粒的起跳临界直径及检测临界直径

Table 3 Critical diameter of moving or detected of different voltage grade of GIS

电压等级/kV	起跳临界直径/mm	检测临界直径/mm
126	2.99	0.33
252	7.02	0.26
550	6.49	0.26
1100	7.92	0.26

力, 因此局部放电相位图谱为分布在正、负半周期的对称双峰形。

4) 根据 GIS 内自由导电微粒的局部放电模型计算得到了现场工频局部放电试验的临界起跳尺寸及临界检测尺寸。现场工频局部放电试验几乎能够使大部分铝质微粒起跳、运动, 导致局部放电; 试验可检测出不到 1 mm 的铝质自由微粒, 具有较高的检测有效性。另外, 在局部放电试验过程中结合声发射检测技术能够进一步提升试验的检测有效性。

参考文献 References

- [1] KOCH H, IMAMOVIC D. Applications of underground transmission lines for high power AC transmission[C]//International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Bangalore, India: IEEE, 2016: 139-144.
- [2] 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.
- [3] 唐志国, 唐铭泽, 李金忠, 等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2263-2277.
TANG Zhiguo, TANG Mingze, LI Jinzhong, et al. Review on partial discharge pattern recognition of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2263-2277.
- [4] SRIVASTAVA K, MORCOS M. A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems[C]//Proceedings of 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2001: 787-792.
- [5] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [6] 郭 璨, 张乔根, 游浩洋, 等. 工频下电场不均匀度对 SF₆/N₂ 混合气体放电特性的影响与临界半径现象[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 780-787.
GUO Can, ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, et al. Influence of electric field non-uniformity on discharge characteristics and phenomenon of critical radius in SF₆/N₂ gas mixtures under power frequency voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 780-787.
- [7] BOECK W. Insulation co-ordination of GIS, return of experience, on site tests and diagnostic techniques[J]. Electra, 1998, 176: 67-97.
- [8] 康 钧, 徐世山, 李 军, 等. 800 kV GIS 设备现场冲击试验技术

- 探讨[J]. 青海电力, 2011, 30(7): 1-2.
- KANG Jun, XU Shishan, LI Jun, et al. Technical research for field impact test of 800 kV GIS equipment[J]. Qinghai Electric Power, 2011, 30(7): 1-2.
- [9] 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.
- [10] LAGHARI J R, QURESHI A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1981, 16(5): 388-398.
- [11] 吴治诚, 马径坦, 王国利, 等. 工频局部放电试验与雷电冲击耐受试验对 GIS 内局部电场集中缺陷检测的有效性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 203-208.
- WU Zhicheng, MA Jingtan, WANG Guoli, et al. Effectiveness of power-frequency partial discharge tests and lightning impulse withstand tests to detect enhanced partial electrical field defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 203-208.
- [12] 姚陈果, 周电波, 陈 攀, 等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1670-1676.
- YAO Chenguo, ZHOU Dianbo, CHEN Pan, et al. UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [13] 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.
- [14] 张广东, 牛雪松, 王晓飞, 等. 基于超高频法的 GIS 自由金属微粒局部放电检测与特性研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(1): 101-105.
- ZHANG Guangdong, NIU Xuesong, WANG Xiaofei, et al. Partial discharge detection and characteristics probe of free metal particles in GIS based on UHF method[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2015(1): 101-105.
- [15] 白剑忠. 基于超声和超高频检测法的 GIS 局部放电的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 23-25.
- BAI Jianzhong. Study of partial discharge in GIS based on ultrasonic and UHF detection[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2013: 23-25.
- [16] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. 采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710.
- DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [17] 黄 亮, 唐 炬, 凌 超, 等. 基于多特征信息融合技术的局部放电模式识别研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 947-955.
- HUANG Liang, TANG Ju, LING Chao, et al. Pattern recognition for partial discharge based on multi-feature fusion technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 947-955.
- [18] CHEN C Y, TAI C C, SU C C, et al. GIS partial discharge examination and classification from the on-line measurements[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: IEEE, 2008: 412 - 415.
- [19] CAVALLINI A, MONTANARI G C, PULETTI F, et al. A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 203-215.
- [20] 局部放电测量: GB/T 7354—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Partial discharge measurement: GB/T 7354-2003[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2003.
- [21] 气体绝缘金属封闭输电线路现场交接试验导则: DL/T 304—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- Guide for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed transmission line on site: DL/T 304—2011[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011.
- [22] ALBERTO T P. Charge and force on a conducting sphere between two parallel electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 56(2): 199-217.
- [23] SAKAI K I, ABELLA D L, KHAN Y, et al. Experimental studies of free conducting wire particle behavior between nonparallel plane electrodes with AC voltages in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 418-424.
- [24] WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, SONG Jiajie, et al. Simulation and motion analysis of spherical free conducting particle between coaxial electrodes[C]// Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Xi'an, China: IEEE, 2017: 324-327.
- [25] 中国电力出版社. 国网冀北电力有限公司电力设备带电检测技术规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 48-60.
- China Electric Power Press. Online detection technical specification of electric power equipment for state grid Jibei Electric power company[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2014: 48-60.



WU Zhicheng
Ph.D. candidate
Corresponding author



ZHANG Qiaogen
Ph.D., Professor

吴治诚(通信作者)
1993—, 男, 博士生
主要从事 GIS/GIL 绝缘缺陷检测研究
E-mail: z_c_wu@163.com

张乔根
1965—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电力设备绝缘与结构设计技术、新一代智能输变电技术与电力设备试验与绝缘状态评估研究
E-mail: hvzhang@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2018-03-21 修回日期 2019-02-09 编辑 曹昭君