

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

吴治诚¹, 马径坦¹, 王国利², 高超², 张乔根¹

(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. 南方电网科学研究院, 广州 510800)

摘 要: 现场绝缘试验作为气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)设备投运前的最后一道关口, 是保障 GIS 设备可靠运行的必要手段。为了明确高电压等级 GIS 的现场试验有效性, 搭建了 550 kV GIS 真型试验平台, 使用母线凸起物作为 GIS 内部电场集中缺陷, 通过改变凸起物曲率半径及长度模拟不同的局部电场集中程度, 分别进行工频局部放电试验及雷电冲击耐受试验, 得到不同试验程序的检测盲区, 从而对其有效性进行分析。结果表明, 对于实验所用的 550 kV GIS 设备, 工频局部放电试验对的临界长度随曲率半径减小出现先下降后上升的趋势, 能够检测出的凸起物最小长度为 4 mm; 而雷电冲击耐受试验随曲率半径减小单调下降, 能够检测出长度 < 1 mm 的母线凸起物缺陷。工频局部放电试验的检测有效性受到起始条件和放电量条件二者约束。因此, 对于现行的 GIS 设备现场试验标准而言, 雷电冲击耐受试验相比于工频局部放电试验能够检测出尺寸更小的局部电场集中缺陷。因此, 现阶段现场试验应在工频局部放电试验的基础上, 补充开展雷电冲击耐受试验。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 工频局部放电试验; 雷电冲击耐受试验; 临界长度; 检测盲区

Effectiveness of Power-frequency Partial Discharge Tests and Lightning Impulse Withstand Tests to Detect Enhanced Partial Electrical Field Defects in GIS

WU Zhicheng¹, MA Jingtan¹, WANG Guoli², GAO Chao², ZHANG Qiaogen¹

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

2. Electrical Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510800, China)

Abstract: On-site insulation test, as the last check before gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) being put into operation, is necessary to protect the reliable operation of GIS equipment. In order to clarify the field test effectiveness of high voltage class GIS, we set up a 550 kV GIS real test platform to make the bus surface protrusions as the internal electric field concentration defects of GIS. By changing the radius of curvature and the length of the protrusions, the local electric field concentration was simulated. The blind spot of the partial discharge test and lightning impulse withstand test were analyzed. The results show that the critical length of the power-frequency partial discharge (PD) test shows a non-monotonous trend as it decreases first and then increases with the curvature radius, and the minimum of the detectable protrusion is 4 mm; the critical length of the lightning impulse (LI) withstand test is consistent with varying curvature radius, and the protrusions with a length less than 1 mm can be detected. In addition, the effectiveness of power frequency PD test is limited by the PD inception criterion and the PD charge criterion. In conclusion, for the current on-site test standard of GIS equipment, the LI withstand test can detect the smaller enhanced partial electric field defect compared with the power frequency PD test. Therefore, at this stage, the LI withstand test should be carried out, except for power frequency PD tests.

Key words: gas-insulated metal-enclosed switchgear; power frequency partial discharge test; lightning impulse withstand test; critical length; blind area of detection

0 引言

随着电力需求的不断增大和电力设备电压等级的不断提高, 对系统中广泛使用的气体绝缘金属封闭开关(GIS)设备可靠性提出了更高的要求^[1-5]。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, 并且随着电压等级的提高, 绝缘故障率明显增加^[6]。

现场运行经验表明, GIS 设备绝缘故障主要由设计缺陷、加工缺陷与运输安装导致, 这 3 类故障约各占全部故障的 30%。在 GIS 制造、安装、调试

过程中,不可避免地出现导体表面尖刺、自由导电微粒等局部电场集中造成的绝缘缺陷。该类绝缘缺陷在 GIS 设备运行及遭受过电压情况下可能导致异常放电,影响系统安全稳定运行。因此,现场绝缘试验作为 GIS 设备投运前的最后一道关口,是保障 GIS 设备可靠运行的必要手段^[7]。

标准《GB 7674—2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》中 10.2.101.1.3 条规定了对于不同电压等级 GIS 设备现场交接时的绝缘试验程序^[8]。标准中规定,对于 252 kV 及以上电压等级的 GIS 设备,推荐在现场进行 2 项试验程序(程序 B 及程序 C)。程序 B 的试验程序为首先进行时长为 1 min 的短时工频耐压试验,之后进行工频局部放电试验。程序 C 作为前者的替代程序,在短时工频耐压试验后对每一极性进行各 3 次雷电冲击耐受试验。

由于串联谐振装置的广泛采用,现场普遍开展交流耐压试验附加局部放电试验的试验程序^[9-12]。而 CIGRE 33/23.12 工作组对不同 GIS 现场试验方法用于 GIS 缺陷检测有效性进行的定性研究表明,工频耐压附加局部放电的试验方案对于固定在母线的尖锐突出物及绝缘子的附着导电微粒有效性较低^[6]。雷电冲击耐受试验对于 GIS 内部电场集中缺陷的考核较为有效,并可以考核 GIS 设备在遭受过电压情况下的绝缘性能。位于母线上的尖刺缺陷如果 >2 mm 便能对绝缘造成威胁^[13],当雷电过电压侵入 GIS 设备时,将有可能引发绝缘故障。例如,在 1 100 kV 特高压南京站开展的现场标准雷电冲击耐受试验过程中,已经通过工厂试验的某一间隔在正极性 1 800 kV 标准雷电冲击电压作用下发生放电^[14]。因此,有必要明确高电压等级 GIS 的现场试验有效性。

本文搭建了 550 kV GIS 真型试验平台,使用母线凸起物作为 GIS 内部局部电场集中缺陷,通过改变凸起物曲率半径及长度模拟不同的局部电场集中程度,分别进行工频局部放电试验及雷电冲击耐受试验,得到不同试验程序检测局部电场集中缺陷的检测盲区,从而对其有效性进行分析。

1 实验设置及方法

为了研究工频局部放电试验与雷电冲击耐受试验检测 GIS 内部局部电场集中缺陷的有效性,搭建了如图 1 所示的 550 kV GIS 真型试验平台。

进行工频电压试验时,缺陷模拟试验段通过盆

式绝缘子与 550 kV/250 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 550 kV 时保证自身局放量 <1 pC。试验电压采用分压比为 10 000:1 的电容分压器进行测量。局部放电测量系统采用奥地利生产的 Omicron MPD600 系统,该系统符合 IEC 60270 标准,并具有较强的抗干扰能力,采用全数字化处理技术,准确度可精确至 1 pC,系统具有较高的灵敏度及信噪比。局部放电信号采用 550 kV/500 pF 的耦合电容 C_k 、检测阻抗 CPL542、采集单元 MPD600 等进行检测。局部放电检测前,根据标准《GB/T 7354 局部放电测量》使用电荷校准发生器 CAL542 并联在试品两端进行视在电荷量标定^[15]。工频电压试验回路如图 2 所示。

进行雷电冲击试验时,缺陷模拟试验段通过 550 kV 套管与 1 600 kV 冲击电压发生器相连。试验采用标准雷电冲击电压波形(1.2/50 μ s),冲击电压采用弱阻尼电容分压器进行测量,分压比为 20 000:1。

为了模拟 GIS 内部局部电场集中缺陷,使用母线凸起物作为实验电极,实验所用电极系统及实物图如图 3 所示。

图 2 中 GIS 壳体半径 $R_1=280$ mm,母线半径

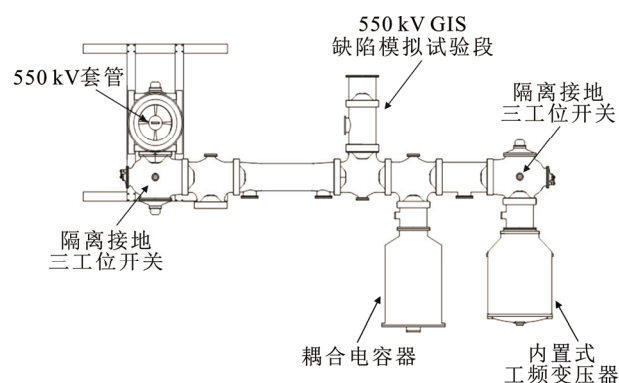
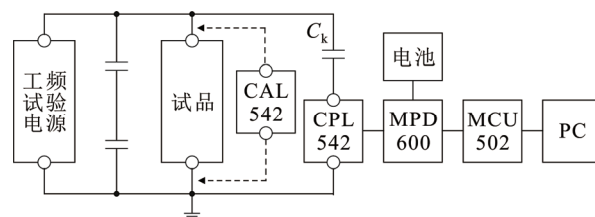


图 1 实验平台示意图

Fig.1 Experimental platform diagram



CAL542—电荷校准器; CPL542—检测阻抗; MPD600—采集单元;
MCU502—控制单元; PC—计算机

图 2 工频电压试验回路

Fig.2 Test circuit of power frequency voltage test

$R_2=70\text{ mm}$ 。通过改变凸起物曲率半径 r 及长度 l 可模拟不同的局部电场集中程度。实验选用曲率半径 r 分别为 250、300、375、450 及 500 μm 的针电极, 突出长度可在 0~20 mm 范围内调整。

实验时, 先将缺陷试验段抽至真空, 再向腔体内充入 0.5 MPa 的 SF_6 气体, 静置 12 h 后进行实验。为了减少前序实验对实验结果的影响, 2 次实验间隔为 10 min, 以保证气体绝缘强度恢复。

对于 550 kV GIS 而言, 其现场短时工频耐受电压 U_{ds} 、工频局部放电试验电压 U_{pd} 及现场雷电冲击耐受电压 U_{ps} 如表 1 所示。

2 实验结果及讨论

为了比较工频局部放电试验与雷电冲击耐受试验检测 GIS 内部局部电场集中缺陷的有效性, 定义能够检测出的最小凸起物长度为该项试验检测母线凸起物缺陷的临界长度, 用 l_{cr} 表示。临界长度以下的区域为检测盲区。

2.1 工频局部放电试验检测母线凸起物缺陷的临界长度

进行工频局部放电试验时, 升高电压至短时工频耐受试验 U_{ds} 后, 持续 1 min, 再降低电压至工频局部放电试验电压 U_{pd} , 进行局部放电测量, 并记录 5 min 内的局部放电量。标准中 10.2.101.1.7 条规定了试验程序 B 应按照《GB/T 7354 局部放电测量》规定的方法测量局部放电, 最大允许的放电量 10 pC。如果 5 min 内最大放电量 > 10 pC, 则局部放电试验能够检测出该缺陷; 反之, 则未检测出该缺陷。工频局部放电试验检测凸起物缺陷的临界长度 l_{cr} 与曲率半径 r 的关系如图 4 所示。

图 4 中的实验结果表明, 随着凸起物曲率半径减小, 临界长度呈现先下降后上升的趋势, 临界长度最小值出现在凸起物曲率半径为 375 μm 时, 约为 4 mm。出现该现象的原因在于, 当凸起物曲率半径 > 375 μm 时, 小于 4 mm 的凸起物并未到达局部放电起始电压, 随着凸起物长度增大, 到达局部放电起始电压后, 一旦发生局部放电, 其放电量通常 > 10 pC; 而当凸起物曲率半径 < 375 μm 时, 凸起物前方电场极高, 小于临界长度的凸起物通常已经导致局部放电, 但局部放电量较小, 通常 < 10 pC。因此当凸起物曲率半径较大时, 决定临界长度的是试验电压 U_{pd} 与局部放电起始电压的大小关系: 若 U_{pd} 大于该长度下局部放电起始电压, 则工

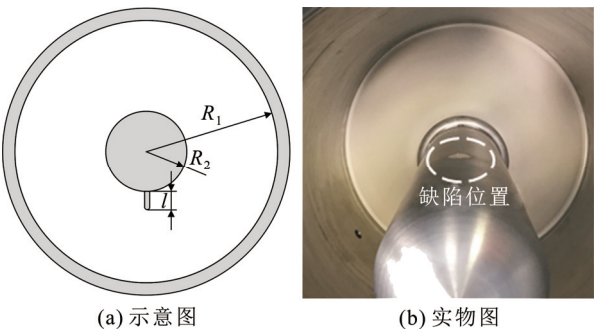


图 3 实验所用电极系统

Fig.3 Electrode system used in the experiment

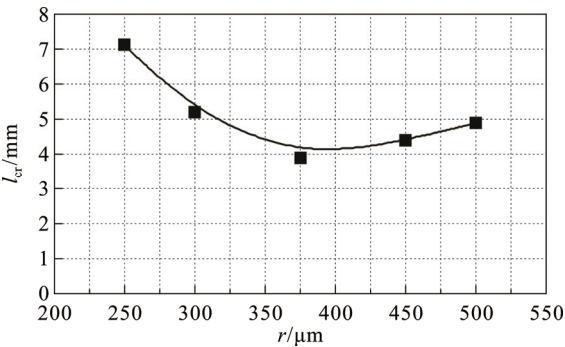


图 4 工频局部放电试验检测母线凸起物缺陷的临界长度与曲率半径的关系

Fig.4 Critical length of partial discharge test as a function of curvature radius of defects

表 1 550 kV GIS 现场试验电压参数

Table 1 Voltage parameters of 550 kV GIS field test

试验项目	试验电压值
短时工频耐受试验 U_{ds}/kV	560
工频局部放电试验 U_{pd}/kV	385
雷电冲击耐受试验 U_{ps}/kV	1 240

频局部放电试验能够检出该缺陷。而当凸起物曲率半径较小时, 决定临界长度的是 U_{pd} 下的局部放电量: 若局部放电量 > 10 pC, 则工频局部放电试验能够检出该缺陷。

对于 GIS 中的局部电场集中缺陷而言, 局部放电的本质是极不均匀场中的 SF_6 电晕放电。母线凸起物畸变了凸起物前方局部区域的电场, 当局部电场强度超过了 SF_6 气体的耐受强度后, 发生电晕放电后, 才能够检测到局部放电信号。电晕放电是极不均匀电场中的自持放电, 满足式(1)给出的自持放电条件^[16]

$$\int_0^{x_c} -\bar{\alpha} = K \tag{1}$$

式中: x_c 为电子崩临界长度; K 为常数, 约为 18;
 $\bar{\alpha}$ 为有效电离系数, 对于 SF_6 气体而言, 归一化有效电离系数 $\bar{\alpha}/p$ 与电场强度 E 的关系为^[17]

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = 26.2 \left(\frac{E}{p} - 0.876 \right) \quad (2)$$

式中: E 为电场强度, kV/cm , 可通过有限元电磁场分析软件计算得到; p 为气体压力, kPa 。计算得到的归一化有效电离系数单位为 $\text{cm}^{-1}/\text{kPa}$ 。

式(1)中 x_c 可通过式(3)计算得到

$$\bar{\alpha} = 0 \Big|_{x=x_c} \quad (3)$$

通过使用电磁场仿真软件在母线侧加载工频局部放电试验时的试验电压 U_{pd} , 可得到试验时母线凸起物前方的场强分布。使用式(3)计算得到该情况下的 x_c 后, 通过式(1)判断自持放电条件, 如果满足自持放电条件, 则工频局部放电能够检测出该母线凸起物缺陷。不断减小母线凸起物长度至刚好不满足自持放电条件, 则该长度为工频局部放电试验检测母线凸起物缺陷的临界长度。计算出的理论值与实验值见图 5。

图 5 表明, 临界长度计算值在凸起物曲率半径较大时与实验值较为接近, 但在曲率半径较小时, 实验值远高于理论值。原因在于, 当凸起物的曲率半径较小时, 虽然局部放电起始电压远低于工频局部放电试验电压 U_{pd} , 能够产生稳定的局部放电, 但此时的局部放电量 $< 10 \text{ pC}$, 按照标准规定的 10 pC 判据, 试验通过。图 6 是曲率半径为 $250 \mu\text{m}$ 、长度为 6 mm 的母线凸起物缺陷在工频局部放电试验电压 U_{pd} 下测量的局部放电相位图谱。

图 6 表明, 此时在正负两个半周均观测到局部放电信号, 且负半周局部放电电荷量较正半轴高, 但正负极性均 $< 10 \text{ pC}$, 工频局部放电试验不能检测出该缺陷。造成该现象的原因是, 曲率半径较小的凸起物前方电场极高, 但电场随距离衰减很快, 电离在强场区域发生后, 发展一段距离便不能继续发展, 因此局部放电量较小; 而曲率半径较大的凸起物前方电场衰减较慢, 电离一旦发生, 能在更大区域内发展, 放电比较强烈; 强烈的电离可能显著加强电离区前方电场, 使电离区进一步发展, 一旦局部放电起始, 其放电量一般 $> 10 \text{ pC}$ 。

综上, 凸起物曲率半径较大时, 局部放电是否起始决定了检测盲区的范围, 即“局部放电起始线”; 凸起物曲率半径较小时, 在试验电压 U_{pd} 下局部放电量的大小决定了检测盲区的范围, 即“ 10 pC 线”。

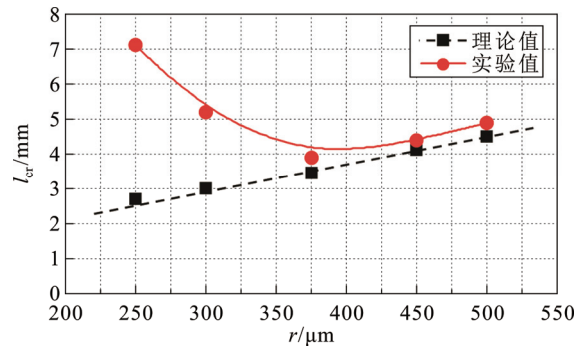


图 5 工频局部放电试验临界长度的理论值与实验值

Fig.5 Theoretical value and experimental value of critical length of partial discharge test

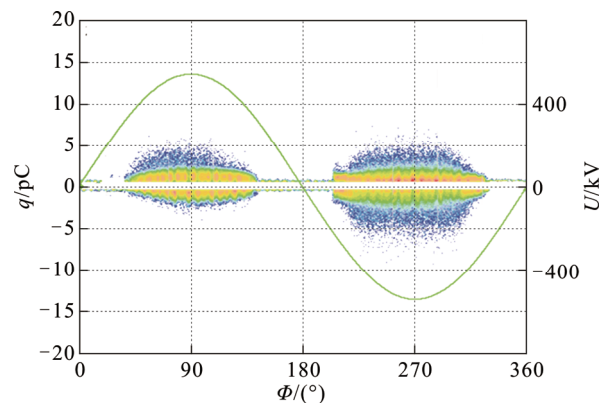


图 6 曲率半径 $250 \mu\text{m}$ 、长度 6 mm 下的母线凸起物缺陷局部放电相位图谱

Fig.6 Phase resolved partial discharge of bus protrusion defects ($r=250 \mu\text{m}$, $l=6 \text{ mm}$)

母线凸起物缺陷的检测盲区由“局部放电起始线”及“ 10 pC 线”共同决定。550 kV GIS 工频局部放电试验对母线凸起物缺陷的检测盲区图如图 7 所示, 其中白色区域表示试验有效区域, 灰色区域表示检测盲区。

2.2 雷电冲击耐受试验检测母线凸起物缺陷的临界长度

对不同长度、不同曲率半径的母线凸起物缺陷进行每一极性各 3 次的雷电冲击耐受试验, 若该电压下任何一次发生击穿, 则雷电冲击耐受试验检出该缺陷; 反之, 则未检出该缺陷。雷电冲击耐受试验检测母线凸起物缺陷的临界长度与曲率半径的关系如图 8 所示。

由图 8 可见, 雷电冲击耐受试验检测母线凸起物缺陷的临界长度随曲率半径减小单调下降, 并出现饱和趋势。由于在极不均匀电场中, 有效电子极易产生, SF_6 气压较高时流注通道伸长到足够长度后转化为先导通道, 在较高的过压倍数下, 先导不

易熄灭, 不断伸长贯通间隙后, 间隙击穿。因此, 雷电冲击耐受试验的检测盲区随凸起物曲率半径减小而单调下降。当凸起物长度极短时 ($L < 1 \text{ mm}$), 母线对凸起物的屏蔽作用使下降趋势趋于饱和。

另外, 如图 8 所示, 对于母线凸起物缺陷而言, 负极性雷电冲击的临界长度较正极性大。原因在于: 当凸起物是正极性时, 凸起物前方形成流注, 流注头部具有正电荷, 加强了其头部电场, 促进新的电子崩产生, 新产生的电子崩加强并延长了流注通道, 促进了流注通道的进一步发展。而当凸起物是负极性时, 虽然流注电晕易于起始, 但大量的电子崩造成了围绕高场强区的弥散分布的空间电荷层, 空间电荷层起到了屏蔽凸起物尖端场强的作用, 只有在较高的过压倍数下, 空间电荷层前方的场强能达到二次电子崩的起始条件, 放电才能进一步发展。因此虽然负极性情况下流注通道容易起始, 但发展困难, 所以对于母线凸起物缺陷, 正极性雷电冲击耐受试验更为有效。

2.3 GIS 现场试验有效性分析

对于实验所采用的 550 kV GIS, 雷电冲击耐受试验检测母线凸起物缺陷的检测盲区在凸起物曲率半径为 $500 \mu\text{m}$ 情况下与工频局部放电试验接近, 随着曲率半径减小, 雷电冲击耐受试验的临界长度远小于工频局部放电试验的临界长度。工频局部放电试验对于长度 $< 4 \text{ mm}$ 的母线凸起物缺陷失效, 而雷电冲击耐受试验能够以检测出长度 $< 1 \text{ mm}$ 的母线凸起物。雷电冲击耐受试验与工频局部放电试验的临界长度与曲率半径的关系见图 9。

因此在现场试验中, 雷电冲击耐受试验相比于工频局部放电试验能够检测出尺寸更小的局部电场集中缺陷, 而工频局部放电试验由于受到起始电压、最大局放量的双重约束, 对于局部电场集中缺陷的检测具有较大局限性, 但工频局部放电试验对检测悬浮电位缺陷、自由导电微粒缺陷具有较好的效果。目前, 工频局部放电试验受限于现场噪声, 标准允许的局放量判据为 10 pC , 在提升局部放电抗干扰技术后, 适当降低该判据能够提升工频局部放电试验对于 GIS 内电场集中缺陷的检测有效性。因此, 现场试验应在工频局部放电试验的基础上, 补充开展雷电冲击耐受试验^[18]。

3 结论

1) 临界长度可以反映不同试验程序对局部电

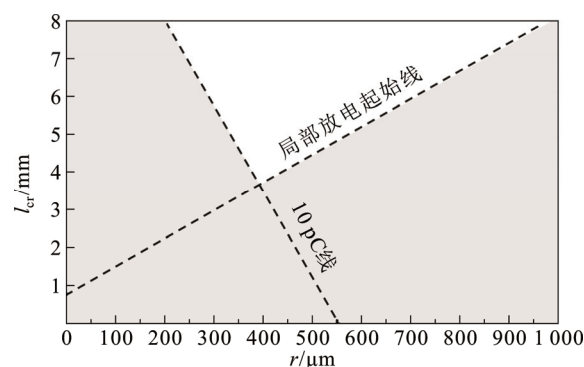


图 7 550 kV 工频局部放电实验检测母线凸起物缺陷的检测盲区

Fig.7 Blind area of detection of bus protrusion in 550 kV power frequency partial discharge test

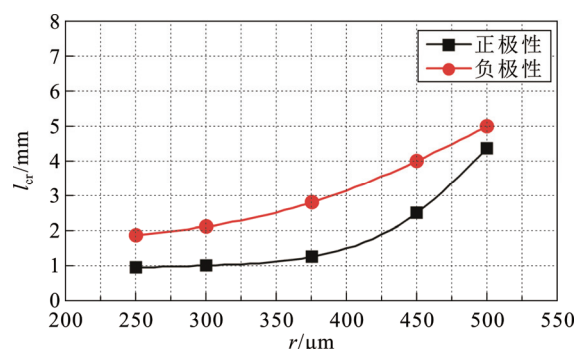


图 8 雷电冲击耐受试验检测母线凸起物缺陷的临界长度与曲率半径的关系

Fig.8 Critical length of lightning impulse withstand test as a function of curvature radius of defects

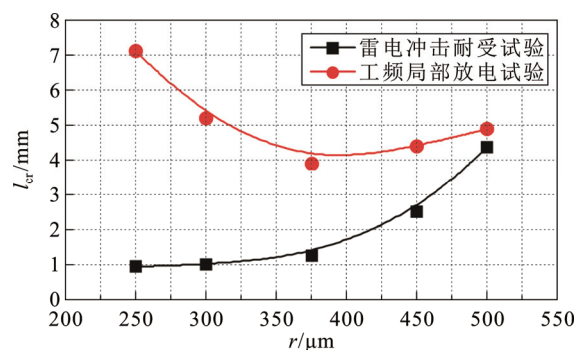


图 9 雷电冲击耐受试验与工频局部放电试验检测母线凸起物缺陷的临界长度

Fig.9 Critical lengths of power frequency partial discharge test and lightning impulse withstand test

场集中缺陷的检测有效性。对于 550 kV GIS 设备内的母线凸起物缺陷而言, 工频局部放电试验对的临界长度随曲率半径减小出现先下降后上升的趋势, 能够检测出的凸起物最小长度为 4 mm ; 而雷电冲

击耐受试验随曲率半径减小单调下降,能够检测出长度 $<1\text{ mm}$ 的母线凸起物缺陷。

2) 对于曲率半径较大的母线凸起物缺陷,由于试验电压未到达局部放电起始电压,局部放电试验失效;对于曲率半径较小的母线凸起物缺陷,由于试验电压 U_{pd} 下最大局部放电量 $<10\text{ pC}$,局部放电试验失效。母线凸起物缺陷的检测盲区由局部放电起始线及 10 pC 线同时决定,使用极不均匀电场中自持放电条件可以计算得到局部放电起始线。

3) 对于现行的GIS设备现场试验标准而言,雷电冲击耐受试验相比于工频局部放电试验能够检测出尺寸更小的局部电场集中缺陷。目前,工频局部放电试验受限于现场噪声,标准允许的局放量判据为 10 pC ,在提升局部放电抗干扰技术后,适当降低该判据能够提升工频局部放电试验对于GIS内电场集中缺陷的检测有效性。目前,工频局部放电试验对检测悬浮电位缺陷、自由导电微粒缺陷具有较好的效果。因此,现场试验应在工频局部放电试验的基础上,补充开展雷电冲击耐受试验。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] SABOT A, PETIT A, TAILLEBOIS J. GIS insulation co-ordination: on-site tests and dielectric diagnostic techniques, a utility point of view[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1309-1316.
- [3] 李 鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [4] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [5] LAGHARI J R, QURESHI A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, 16(5): 388-398.
- [6] Joint Working Group 33/23.12. Insulation coordination of GIS: return of experience, on site tests and diagnostic techniques[J]. Electra, 1998, 176: 67-97.
- [7] 文 韬, 张乔根, 赵军平, 等. 大容量电力设备标准雷电冲击现场试验技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2968-2973.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. On-site test technology of standard lightning impulse for power equipment with large capacitance[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2968-2973.
- [8] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674—2008[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2008.
- [9] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B. F, et al. Partial discharge diagnostics for gas insulated substations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.
- [10] 王永强, 李建芳, 李长元, 等. 检测 GIS 局部放电的小型化平面螺旋天线研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1252-1258.
WANG Yongqiang, LI Jianfang, LI Changyuan, et al. Study on a miniaturized planar spiral antenna for partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1252-1258.
- [11] 刘云鹏, 李岩松, 黄世龙, 等. 基于光纤传输的气体绝缘开关设备局部放电超声波检测系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 186-191.
LIU Yunpeng, LI Yansong, HUANG Shilong, et al. Ultrasonic detection system for gas insulated switchgear partial discharge based on optical fiber transmission [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 186-191.
- [12] 王彩雄, 唐志国, 常文治, 等. 气体绝缘组合电器尖端放电发展过程的试验研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 157-162.
WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, et al. Experimental study on development characteristics of point discharge in GIS[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 157-162.
- [13] 张 璐, 张乔根, 刘 石, 等. 特快速瞬态过电压和雷电冲击作用下特高压 GIS 绝缘特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 335-341.
ZHANG LU, ZHANG Qiaogen, LIU Shi, et al. Insulation characteristics of UHV GIS under VFTO and lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 335-341.
- [14] 文 韬, 张乔根, 赵军平, 等. 特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 30-33.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of on-site standard lightning impulse test technology for UHV GIS equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 30-33.
- [15] 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.
- [16] SAITOH H, MORITA K, KIKKAWA T, et al. Impulse partial discharge and breakdown characteristics of rod-plane gaps in N_2/SF_6 gas mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(4): 544-550.
- [17] VAN BRUNT R J, MISAKIAN M. Mechanisms for inception of DC and 60-Hz AC corona in SF_6 [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, 17(2): 106-120.
- [18] 文 韬, 张乔根, 赵军平, 等. 特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 30-34.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of on-site standard lightning impulse test technology for UHV GIS equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 30-34.



WU Zhicheng

Ph.D. candidate



ZHANG Qiaogen

Ph.D., Professor

Corresponding author

吴治诚

1993—, 男, 博士生

主要从事 GIS 绝缘特性研究

E-mail: z_c_wu@163.com

张乔根(通信作者)

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、电力设备试验与绝缘状态评估研究

E-mail: hvzhang@mail.xjtu.edu.cn