

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.11.010

GIS中不同长度金属尖端缺陷超声波局部放电发展特性研究

史文, 杨正理, 黄其新, 陈海霞, 陆朱卫, 吴馥云

(三江学院, 南京 210012)

摘要: 气体绝缘组合电器设备(gas insulated switchgear, GIS)因具有占地面积小、可靠性高等优点在电力系统获得了广泛应用。GIS设备在制造或安装过程中可能在高压导体产生金属尖端缺陷,进而在运行过程中产生局部放电,持续的局部放电会导致绝缘击穿,影响设备运行。针对GIS高压导体金属尖端缺陷局部放电特性,文中在实体GIS高压导体上设置了不同长度的金属尖端缺陷,利用超声波法对其从局放起始到绝缘击穿整个过程中的局放信号进行了测量,结果表明,随着电压的升高局放过程可分为局放起始阶段、局放相位转换阶段、局放发展阶段及临界击穿阶段,不同长度的缺陷其发展阶段类似,但其局放起始电压及放电强度不同。

关键词: GIS; 局部放电; 超声波; 金属尖端缺陷

Development Features of Ultrasonic Partial Discharge of Metal Point Defect with Different Lengths in GIS

SHI Wen, YANG Zhengli, HUANG Qixin, CHEN Haixia, LU Zhuwei, WU Fuyun

(Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: Gas insulated switchgear(GIS) may contain metal point defect on high-voltage conductors during manufacturing or installation, and the defect may cause partial discharge(PD)during GIS operation. Continuous PD may lead to insulation breakdown and affect equipment operation. Aiming at the PD characteristics of metal point defect on GIS high-voltage conductors, this study set metal point defects of different lengths on the high-voltage conductors of a real GIS. The PD signals from initial discharge to insulation breakdown were measured by the ultrasonic method, and the results show that with the increase of voltage, the PD process can be divided into PD initial stage, PD phase conversion stage, PD development stage and critical insulation breakdown stage. The defects of different lengths have similar development stages, but their PD inception voltages and discharge intensities are different.

Key words: GIS; partial discharge; ultrasonic; metal point defects

0 引言

气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)具有安全可靠,利于环境保护,占地面积和空间占有体积小等优点,在电力系统中被广泛应用。在制造、运输和安装过程中,可能在GIS的内部产生一些不可预期的缺陷,影响GIS的安全运行。其中金属尖端是其中一种比较常见的缺陷,常见于高压导杆表面存在划痕、毛刺等工况下。

由于GIS内工作场强很高,金属尖端处电场集中,会在尖端处产生局部放电,随着时间的推移,放电生成物会对绝缘系统产生侵蚀,并最终导致绝缘系统的破坏。所以通过早期对局部放电的检测能有效避免故障的发生^[1-3]。

根据检测对象的不同,局部放电检测方法分为电化学检测法、声学检测法、光学检测法及化学检测法等,其中超声波法由于其检测灵敏度高、易于现场实施的优点,得到了现场检测人员的欢迎和广泛

收稿日期:2018-05-02; 修回日期:2018-07-06

基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目(17KJB470011)资助。

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

使用^[4-6]。针对GIS高压导杆金属尖端局部放电的检测,目前对其放电特性的研究较多,但基本都采用一种尖端长度^[7-8],而不同尖端长度所导致的电场集中效果不同,其局部放电特性也不相同,文中针对不同金属尖端所导致的局放超声波特性进行研究,研究结果可为现场检测结果的分析提供基础。

1 实验系统的建立和实验方法

1.1 实验平台和测量系统

文中在330 kV实体GIS平台上开展实验研究,采用SF₆气体绝缘工频试验变压器作为电源,并与被试GIS一体化连接,其具有背景噪声低、易于加电压的优点。试验变压器容量为560 kVA,最高输出电压有效值为280 kV,通过调压系统施加高压至GIS高压导杆上。

实验过程中采用AIA超声检测仪进行局放信号的采集。测量系统示意图见图1。

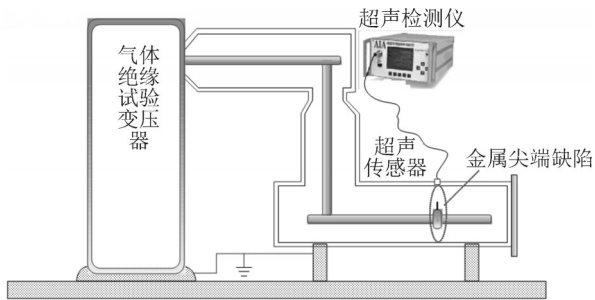


图1 检测系统示意图

Fig. 1 Diagram of measurement

如图1所示,超声法检测仪器的信号来源于放置于GIS外壳上的压电式超声波传感器,其检测频带为20~80 kHz。

1.2 缺陷设计

在GIS内部设计了导杆金属尖端。导杆金属尖端安置在屏蔽罩上。GIS内半径尺寸为406 mm,导杆直径为125 mm,屏蔽罩直径为196 mm。金属尖端均为直径0.8 mm的圆柱形钢针,钢针端部为半径0.4 mm的半球形,缺陷见图2。导杆尖端分别设计了长度为3.5、6、12 mm的缺陷。

对不同缺陷进行电场计算,得到100 kV电压下不同缺陷下GIS内部电场分布见图3,从图3中可以看出,导杆处的金属尖端都使得GIS内部的原为稍不均匀的电场发生畸变,在尖端处电场强度很强。不同长度导杆缺陷下,GIS内部沿导杆表面到外壳内部的电场分布曲线见图4,图4中D表示到屏蔽罩表面的距离。

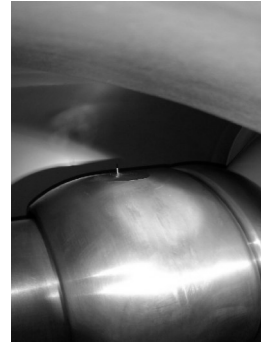


图2 金属尖端缺陷实物图

Fig. 2 Illustration of metal protrusion defects

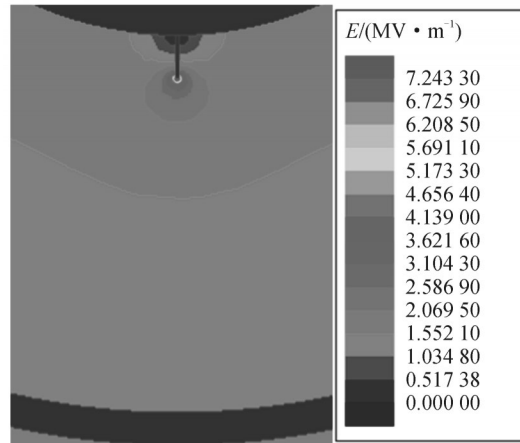


图3 金属尖端缺陷下GIS内部电场分布

Fig. 3 The distribution diagrams of electric field intensity in GIS

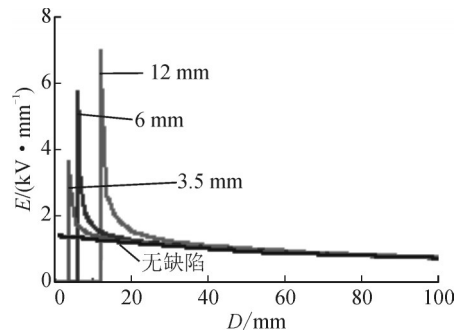


图4 电场分布曲线

Fig. 4 The distribution curves of electric field intensity

从图4中可以看出,缺陷越长,电场畸变越大。12 mm长导杆尖端下最强场强为7 kV/mm,为无缺陷下最强场强的5倍。

1.3 实验方法

实验时,逐渐升高外施电压,同时监测超声波局部放电测量仪器,当检测到局部放电信号时,暂停升高电压,保持该电压1 min,此电压即为起始放电电压。然后再逐渐升压,当放电测量谱图出现明显变化时,保持该电压1 min并记录数据。

2 实验结果

在高压导杆的屏蔽罩上设置了3种不同长度的尖端缺陷,分别为12、6、3.5 mm。实验时GIS充有

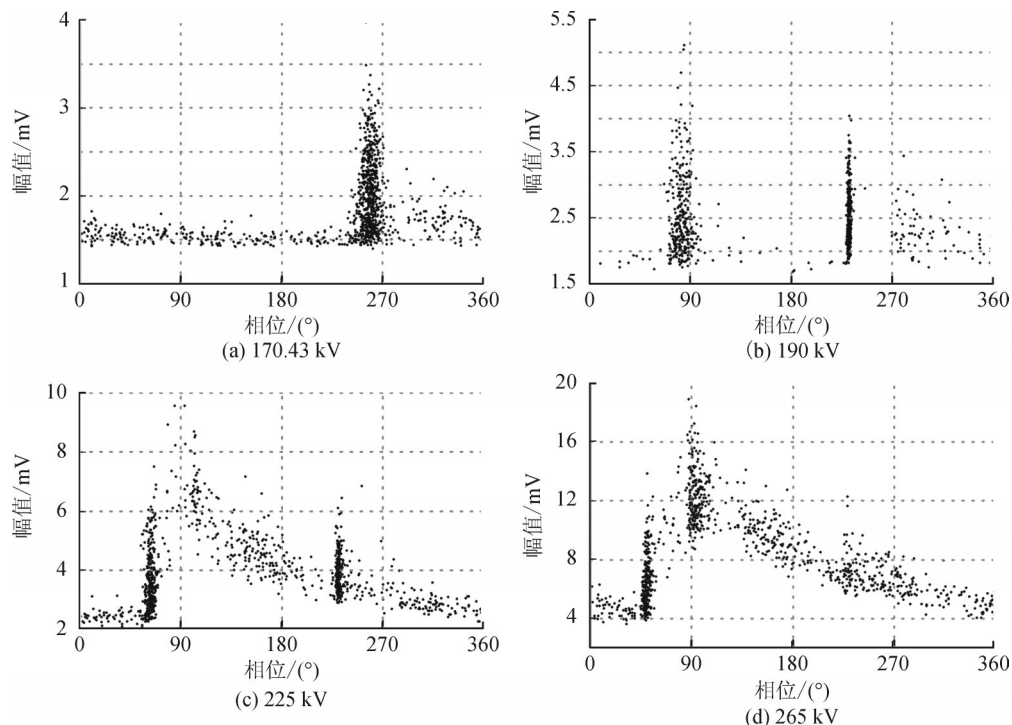


图5 超声波法测量3.5 mm导杆尖端PRPD图谱

Fig. 5 PRPD pattern for 3.5 mm protrusion at HV conductor detected by ultrasonic method

图5(a)为放电起始时的谱图,此时只在工频电压的负半周峰值处有放电。随着电压的升高,在工频电压的正半周峰值处也发生放电,如图5(b)所示。当电压继续升高后,工频电压正半周的最大放电电量超过负半周的最大放电电量,如图5(c)-(d)所示。

6 mm导杆金属尖端放电谱图见图6,从图6中可以看出,和3.5 mm缺陷放电的结果相似,在放电的起始阶段,只在工频电压的负半周峰值附近有放电,如图6(a)所示。图6(b)中开始在工频电压的正半周峰值出现放电信号。电压升高后正半周放电的幅值明显大于负半周的放电信号,与3.5 mm的缺陷放电不同的是,随着电压的进一步升高,放电的相位变得很宽,同时工频电压正半周放电的幅值近似,但在正负半周的峰值附近都会有明显的大放电产生,如图6(c)-(d)所示。实验时,在270 kV电压持续1 min后,发生了击穿。

12 mm导杆金属尖端放电谱图见图7。

图7(a)中的结果表明,12 mm尖端的放电也是先在工频电压负半周出现。当电压升高后在正半周出现放电,如图7(b)所示。随着电压的提高正半周的放电快速发展,幅值明显增大,但此时正半周放电的幅值未有明显超过负半周。当电压进一步升

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

高,放电的相位变宽,工频电压的正负半周放电幅值均比较大,如图7(c)-(d)所示。在电压继续升高至265 kV时,大约持续20 s左右,发生了击穿。

不同缺陷下的放电起始电压见图8。

从图8中可以看出,随着缺陷长度的增加,局放起始电压明显下降。在各个电压下统计得到的最大放电幅值见图9。

从图9可以看出,局部放电幅值随着外施电压的升高而升高。对于12 mm长度的尖端缺陷,电压低于105 kV时,最大放电电量随电压增加比较缓慢,在105 kV时出现较大的增加,当电压从105 kV升高到175 kV时,放电电量随外施电压的升高略有增加,从175 kV直到发生击穿时,最大放电电量随着电压升高增加较快;6 mm缺陷最大放电电量随电压的变化曲线与12 mm相似,开始时增加比较慢,然后在175 kV时放电电量增大较多,当电压继续升高时,在一段时间内,最大放电电量随电压的升高增长缓慢,但当电压超过245 kV时,最大放电电量快速增加;在电压比较低时,3.5 mm缺陷的放电电量随电压的升高增长较慢,接着电压升高时,放电电量迅速增加,到电压升高至270 kV时,放电电量出现了降低,可以预见,当电压继续升高时,最大放电电量随着电压的升高增长会变

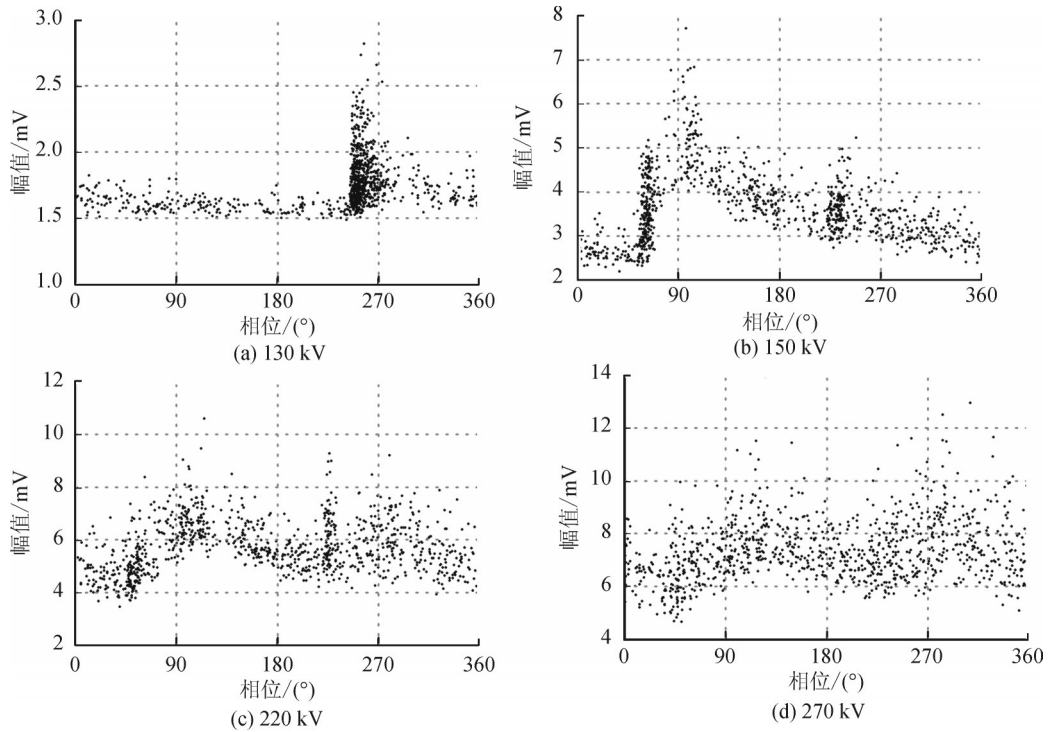


图6 超声波法测量6 mm导杆尖端PRPD图谱

Fig. 6 PRPD pattern for 6 mm protrusion at HV conductor detected by ultrasonic method

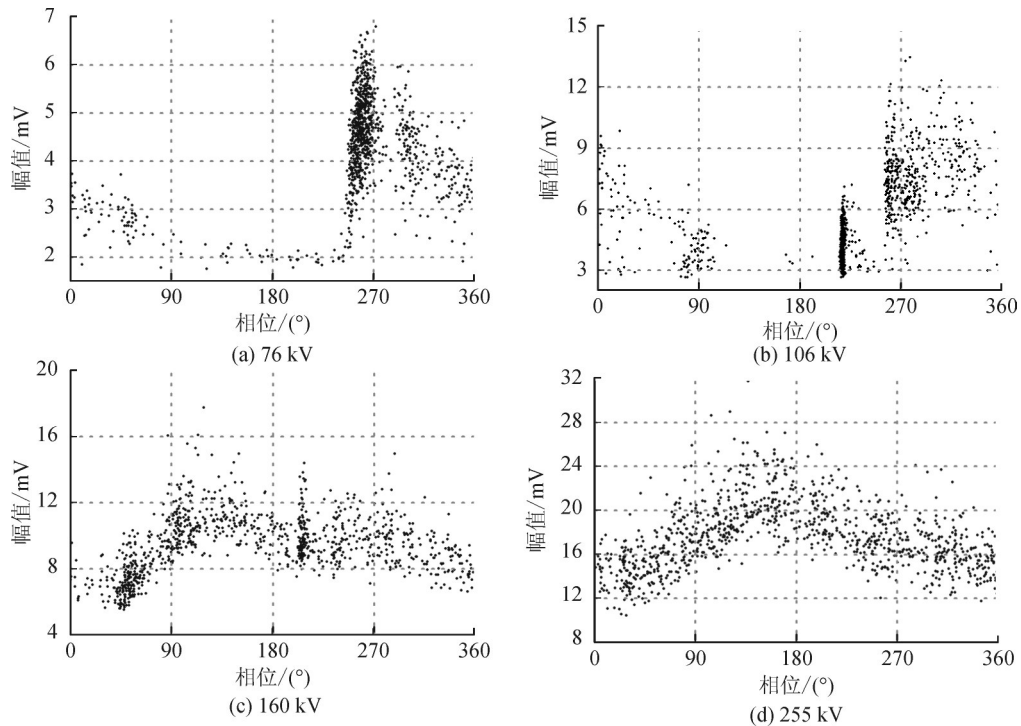


图7 超声波法测量12 mm导杆尖端PRPD图谱

Fig. 7 PRPD pattern for 12 mm protrusion at HV conductor detected by ultrasonic method

慢,当电压升高到一定程度时,放电量会出现较快增长,直至发生击穿。

3 讨论与分析

当GIS中存在金属尖端时,会使GIS内部的稍不均匀场在金属尖端处被加强,从而产生局部放电

信号。局部放电中的超声信号是由于在发生放电时会产生电荷中和的过程,相应的会产生较陡的电流脉冲,电流脉冲的作用将使得局部放电发生的局部区域瞬间受热而膨胀,形成一个类似爆炸的效果,放电结束后原来受热而膨胀的区域恢复到原来的体积,这种由于局部放电产生的一涨一缩的体积

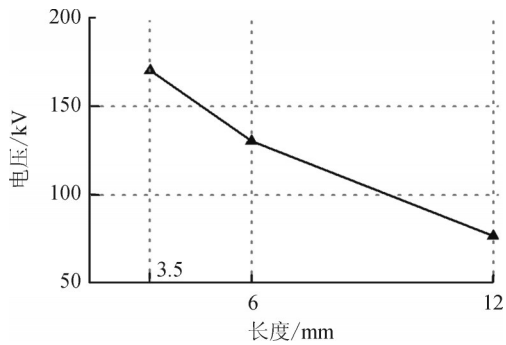


图8 不同长度缺陷下的起始电压

Fig. 8 Inception voltage of different lengths detect

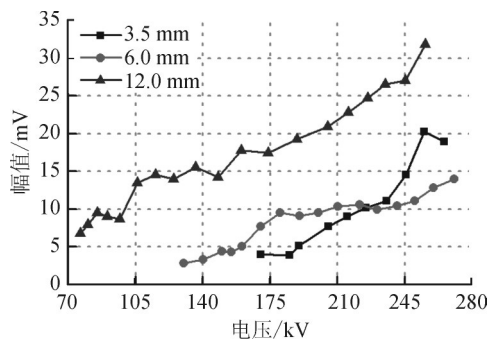


图9 不同电压下放电幅值

Fig. 9 Discharge magnitude vs. voltage

变化引起了介质的疏密瞬间变化,形成超声波。

实验时长度为6 mm和12 mm的导杆金属尖端缺陷发生了击穿,根据测量得到的PRPD谱图以及最大放电量随电压的变化曲线,可以将导杆尖端缺陷从局部放电起始到击穿的整个过程分为以下几个部分:

1)局部放电起始阶段。此阶段只在工频电压的负半周有放电,放电位于负峰值附近,而正半周没有放电,随着电压的升高,最大放电量变化比较慢,见图5-7的(a)小图;

2)放电相位转换阶段。随着电压的升高,在正半周峰值附近开始出现放电,见图5-7的(b)小图,此时负半周的放电幅值稍有增加,随着电压的升高,正半周的放电极大增大,所以此时的最大放电量随着电压出现快速的增加;

3)放电稳定发展阶段。当电压继续增高时,可以看到,随着电压的增加,正负半周的放电量增加,放电相位变宽,见图5-7的(c)小图,但随着电压升高,最大放电量增加比较缓慢;

4)临界击穿阶段。此时正负半周放电速率均明显提高,放电相位变宽,同时正半周都会出现高幅值的放电,见图5-7的(d)小图,随着电压的升高,最大放电量上升比较明显,此时可能发生击穿。

放电发生时,首先会在金属尖端的附近出现强

烈的电离现象,随着电荷的运动,在金属尖端的附近都会积聚起正电荷,此时由于空间电荷的作用使得GIS内部的电场分布发生了变化,当尖端为正电极时,其头部电场被减弱,而负电极下被加强,导杆金属尖端缺陷先在工频电压的负半周出现放电,随后在正半周出现放电。

产生放电后,放电主要以流注放电为主,流注放电通道短。随着流注放电的发生,在正金属尖端前方空间会残留大量的正电荷,空间正电荷使正金属尖端下的放电等离子体前部空间的电场加强,进而产生更多的电离。而负金属尖端下的流注放电呈弥散状,会随着电子移动到外壳上,在电极附近也形成弥散的等离子层,这样的等离子层起着类似增大了电极的曲率半径的作用,使得前沿电场削弱。所以正金属尖端放电的幅值会大于负金属尖端的放电。随着电压的升高,两者的流注放电通道增加,放电幅值增加。

当电压继续升高时,流注放电变得非常剧烈,虽然空间正电荷会削弱金属尖端的前端电场,但由于外施电压非常高,会在空间电荷的边缘处产生先导放电,先导放电的放电幅值高,放电通道长,当电压升高到一定值时,先导放电贯穿电极时,便发生击穿。

综上所述,导杆金属尖端开始放电时,局部放电出现在负半周,最大放电量为负尖端放电。随着电压的升高,放电在正半周出现,最大放电量出现在正尖端,由于正尖端的放电量大于负尖端,此时最大放电量快速增大。随后空间中主要为流注放电,随着电压的升高,最大放电量随电压缓慢升高,最后阶段,即将发生击穿时,空间中出现先导放电,此时会在电压的峰值附近出现大放电,导致最大放电量增大比较多。

4 结语

在实体GIS上设置了不同长度的导杆金属尖端缺陷和外壳金属尖端缺陷,利用超声法进行了局部放电信号的测量,通过分析不同缺陷下的放电谱图和最大放电量的变化可以看出,对于GIS内部的金属尖端缺陷,其从起始发生局部放电到击穿大致经过4个阶段,且缺陷长度越长,其局放起始放电电压越低,放电信号幅值越大,越容易导致击穿。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] BARTNIKAS R. Partial discharges-their mechanism, detection and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 763-808.
- [3] 唐 炬, 张晓星, 曾福平. 组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
TANG Ju, ZHANG Xiaoxing, ZENG Fuping. UHF partial discharge detection and fault diagnosis of GIS[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] 吴旭涛, 李军浩, 张 亮, 等. 振荡型冲击电压下局部放电的检测及干扰分析[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 92-97.
WU Xutao, LI Junhao, ZHANG Liang, et al. PD detection and interference analysis under oscillating impulse voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 92-97.
- [5] ZHAO Xuefeng, GUO Zhifeng, LI Yanming, et al. Partial discharge characteristics and mechanism in voids at impulse voltages[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(3): 1-7.
- [6] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92.
JIN Lijun, ZHANG Mingrui, LIU Weidong. Examination and research on the partial discharge fault diagnostics in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 88-92.
- [7] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1994.
- [8] 黎大健, 梁基重, 步科伟, 等. GIS中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 72-75.
LI Dajian, LIANG Jizhong, BU Kewei, et al. Ultrasonic detection of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 72-75.
- 史文(1983—), 女, 硕士, 工程师, 从事输变电设备状态检测与故障诊断技术研究。
杨正理(1971—), 男, 副教授, 从事输变电设备状态检测技术研究。
黄其新(1980—), 女, 讲师, 从事输变电设备状态检测技术研究。
陈海霞(1977—), 女, 副教授, 从事输变电设备状态检测技术研究。
陆米卫(1984—), 男, 副教授, 从事输变电设备状态检测技术研究。
吴馥云(1988—), 女, 助教, 从事电力系统及自动化技术研究。

(上接第79页)

- site[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 917-924.
- [18] 唐志国, 蒋佟佟, 叶会生, 等. 变电站局放检测中的电磁干扰特性统计[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2998-3006.
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong, YE Huisheng, et al. Statistical characteristics of electromagnetic interferences for partial discharge detection in substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2998-3006.
- [19] 季洪鑫. 交流运行电压下GIS中金属颗粒运动行为及放电特征[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing: North Electric Power University, 2017.
- 董建新(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统方向相关工作。
刘江明(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压试验相关工作。
郇子杰(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统方向相关工作。