

文章编号:1000-582X(2009)10-1138-06

气体绝缘组合电器内绝缘缺陷超高频局部放电信号特性

唐 炬¹, 谢颜斌¹, 周 倩², 张晓星¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆市电力公司 江北供电局, 重庆 401147)

摘 要:为了分析各种不同缺陷在不同条件下的放电特点,根据气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备绝缘缺陷放电形式和特点,采用超高频法对模拟装置内所设计的 4 种 GIS 局部放电物理模型进行了大量的局部放电(partial discharge, PD)实验,获得了真实可靠的超高频(ultra-high-frequency, UHF)局部放电(partial discharge, PD)波形样本;深入研究了 4 种典型 GIS 缺陷的物理模型分别在不同尺寸规格下、置于不同位置处、在不同电压等级下的 UHF PD 波形特征,实验的结果表明,不管是那种缺陷类型引起的 PD 激发的超高频电磁波,在不太高的实验电压下,放电脉冲波形发生突变之前,放电脉冲的形状变化不大且比较稳定,放电脉冲的持续时间通常是 ns 级。

关键词:气体绝缘组合电器;超高频;局部放电;波形特征

中图分类号:TM835

文献标志码:A

Characteristics of UHF partial discharge signal waveforms of typical insulated defects in GIS

TANG Ju¹, XIE Yan-bin¹, ZHOU Qian², ZHANG Xiao-xing¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Chongqing Jiangbei Power Supply Bureau, Chongqing Power Corporation, State Power Grid, Chongqing 401147, P. R. China)

Abstract: In order to analyze the discharge features of different insulation defects in various experimental conditions, according to characteristics of partial discharge (PD) from the insulation defects in gas insulated switchgear (GIS) and using ultra high frequency (UHF) method, a lot of PD experiments are carried out based on the designed four typical physical models of insulation defects of GIS in the simulation device, and the real samples of UHF PD waveforms are recorded. The features of UHF PD waveforms in the different situations are discussed and analyzed in detail, which include different sizes or positions of the physical models or under the different voltages and so on. The results show that in low voltage, regardless of types of UHF electromagnetic wave excited by PD sources, the shapes of PD waveform changed little before the changes of waveform. The remaining time is about several nanoseconds.

Key words: gas insulated switchgear; ultra high frequency; partial discharge; waveform features

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家重点基础研究计划(973 计划)(2009CB724506);国家自然科学基金资助项目(50977095)

作者简介:唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事高电压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究,
(E-mail)cqtangju@vip.sina.com.

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)在制造时出现的毛刺、制造或装配过程中产生的自由金属微粒、绝缘子表面吸附的固体金属微粒及绝缘子内部气隙等各种缺陷,都可能不同程度的导致 GIS 内部电场发生畸变,使得局部电场加强而产生局部放电(partial discharge, PD)^[1-9]。超高频(ultra high frequency, UHF)法是近年来发展起来的一项新技术,测量 PD 信号的频率范围为 300~3 000 MHz,实现了单个脉冲波形的准确测量。该方法的优点是抗干扰能力强,可以有效去除 PD 传统电测法中难以避开的干扰信号,特别适用于现场监测^[10-14]。

UHF PD 波形反映了 PD 特性以及它对设备绝缘的影响,有助于进一步认识 PD 与绝缘破坏程度的关系,进而根据所测到的现象,为了解 GIS 内部放电的特征和绝缘的状态提供依据,从而为 GIS PD 的在线监测、设备故障分析及寿命预测提供参考。另外,研究放电脉冲的波形特性对深入研究局部放电的机理、UHF 电磁波在 GIS 中的传播规律、UHF PD 数学模型的构建以及局部放电模式识别等都具有重要的意义。

在高电压的研究中,国内外主要集中在外部环境、电极形状等对击穿电压的影响上。在 PD 的研究中,也主要集中缺陷的种类、形状、大小等对起始和熄灭放电电压的影响,而这些因素对 PD 放电波形的影响还未见研究。笔者根据 GIS 设备绝缘缺陷放电形式和特点,分别设计了 4 种模拟 GIS 装置内 PD 物理模型,采用灵敏度高、抗干扰能力强的内置圆环传感器获取超高频信号,并用 WavePro7100 高速数字存储示波器记录 UHF PD 波形,深入研究了 4 种物理模型分别在不同尺寸规格下、置于不同位置处、在不同电压等级下的 UHF PD 波形特征。

1 GIS 局部放电超高频信号检测

1.1 GIS 局部放电物理模型

作者根据 GIS 设备绝缘缺陷放电形式和特点,设计了 4 种 GIS 模拟装置内局部放电物理模型^[8]:

1) 高压导体金属突出物缺陷,简称 N(Needle)类放电模型缺陷。图 1(a)是高压导体金属突出物缺陷的物理模型。高压导体表面金属突出物通常是由于不良加工、机械破坏或组装时的擦刮而出现的。在内导体表面径向安装一根银针来模拟这种放电类型,根据实验装置内的气压和外施电压高低,选择银针突出的高度;

2) 自由金属微粒缺陷,简称 P(Particle)类放电模型。图 1(b)是自由金属微粒缺陷物理模型。GIS 在制造、组装及运行过程中不可避免会出现自由金属微粒,自由金属微粒是 GIS 中最常见、危害最大的

绝缘缺陷。微粒运动的程度取决于微粒的材料性质、形状大小和外施电压高低,以及微粒处于 GIS 腔体内的位置等因素。因此采取在 GIS 壳体内表面上放置一定数量(10~20 个)的矩形或球形薄铝片来模拟这种放电类型;

3) 绝缘子表面固定金属微粒缺陷,简称 M(Metal)类放电模型。图 1(c)是绝缘子金属污染物物理模型。自由金属微粒在 GIS 中运动时,如果长期地固定在绝缘子表面,就会形成绝缘子表面金属污染缺陷。该缺陷放电特点与众不同,故此可视为一种独立的绝缘缺陷。作者用矩形锡箔纸粘于绝缘子上面模拟此缺陷,支撑绝缘子的材料为环氧树脂。如果支撑绝缘子同高压导体之间存在气隙,则会同时引发气隙放电。为了防止气隙放电的发生,采取浇注环氧树脂的措施以消除气隙的存在;

4) 气隙缺陷,简称 G(Gap)类放电模型。图 1(d)是气隙缺陷物理模型。在 GIS 内部,当固体绝缘子和内导体间的交界处出现一定的间隙时,增加了交界处的电场强度,会产生损害固体绝缘子的局部放电,造成 GIS 绝缘破坏。作者选用大小不同的气隙来模拟该缺陷类型。

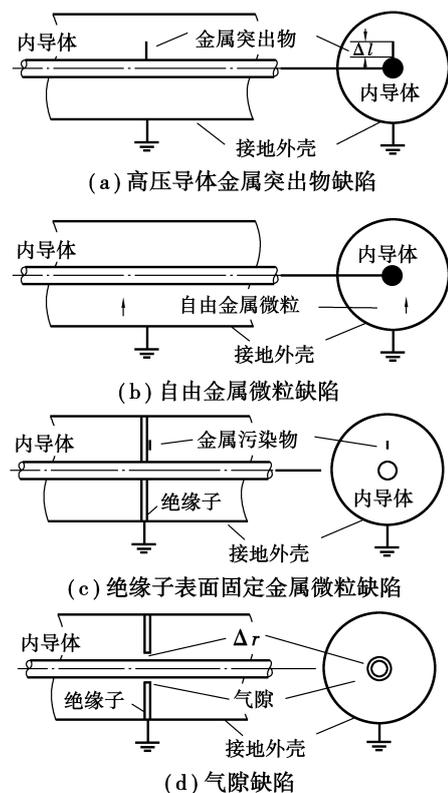


图 1 GIS 模拟装置内绝缘缺陷物理模型

1.2 UHF PD 实验方案

1) 高压导体金属突出物缺陷: 分别选用了 9、12、15、18 mm 等不同长度且曲率半径分别为 0.2、0.25 mm 的银针,放在距传感器 10 mm(位置 1)、

100 mm(位置 2)、250 mm(位置 3)、400 mm(位置 4)处进行实验;

2)自由金属微粒缺陷:分别选用了尺寸规格分别为 $0.5\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 、 $0.5\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的矩形微粒或曲率半径 1 mm 的球形微粒,放在距传感器 10、100、250、400 mm 处进行实验。

3)绝缘子表面固定金属微粒缺陷:分别选用了尺寸为 $1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的锡箔纸贴于绝缘子上作为物理模型,锡箔纸距高压导电杆的距离分别是 20、30 mm,放在距传感器 10、100、250、400 mm 处进行实验。

4)气隙缺陷:分别选用内部绝缘子和内导体间的交界处间隙为 0.5、1、2、3 mm 来模拟该缺陷,放在距传感器 10、100、250、400 mm 处进行实验。

将上述 4 种人工物理缺陷模型分别置于研制的 GIS 模拟装置中,并充以 0.5 MPa 的 SF_6 与 N_2 的混合气体(体积比 4:1),通过研制的内置超高频传感器和高速数字采集系统(模拟带宽 1 GHz 、采样率为 20 GS/s 、存储深度 48 MB)获取 UHF PD 信号的数据和波形。

2 实验结果及分析

根据对各种典型模型的实验研究发现,无论是何种类型引起的局部放电,或是相同缺陷不同的尺寸、规格、形状,以及距传感器不同的位置,虽然它们的脉冲波形可能有所差别,甚至于差别很大,但是在发展过程中都存在一个明显的变化,即在一定电压范围内($U_i=1.2U_i\sim 1.5U_i$)波形比较规则、稳定;当实验电压继续升高时,不仅放电脉冲的峰值突然增大,而且出现波形畸变或多个脉冲的叠加,此时有时还伴随着火花和放电声,表现出明显不同的特性。局部放电的发展过程中都有一个突变,突变前后局部放电的特性明显不同,因此宜将局部放电分为两个阶段。在突变前阶段,局部放电脉冲的峰值和持续时间从一定程度上能够反映放电的强弱,而且局部放电脉冲波形中将包含有更多的信息;相比而言,放电出现的相位、放电的次数、放电量等窄带测量获得的参量,则具有较大的随机性和不确定性。因此放电脉冲波形与视在放电量相比能更全面地反映局部放电超高频的信号特征。作者主要研究突变前各种缺陷引起局部放电所激发的超高频电磁波的波形特征。

2.1 高压导体金属突出物缺陷实验结果及分析

高压导体金属突出物缺陷导致的局部放电属于典型的电晕放电。电晕放电是发生在导体周围全是气体的情况下,金属突出物(针尖)附近场强最高,当外加电压上升到该处的气体击穿场强时,在针尖附近就会发生放电,它是极不均匀电场所特有的一种自持放电形式。

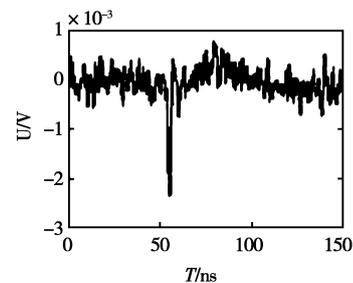
1)起始放电电压

起始放电电压是指当外加电压逐渐上升,达到

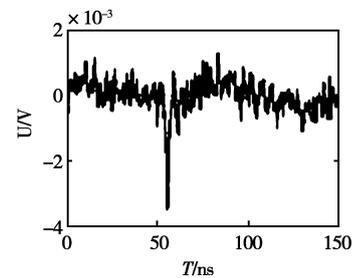
能观察到局部放电时的最低电压。研究发现:当针长和曲率半径一定时,起始放电电压随针与传感器位置变化不大;当针长及针与传感器位置一定时,起始放电电压随曲率半径增大而明显升高;当曲率半径和位置一定时,起始放电电压随针长度的增加而下降。由此可知起始放电电压与高压电极金属突出物的尺寸有关,特别是针尖电极的曲率半径。

2)放电波形

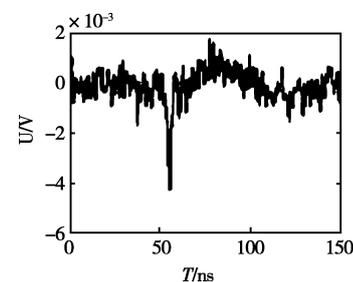
通过研制的内置超高频传感器和高速数字采集系统,能够获取真实的局部放电超高频信号的波形。图 2 为不同针长且曲率半径 0.2 mm 的银针置于位



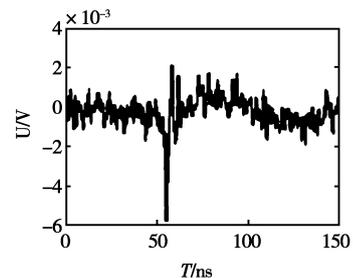
(a) 针长为 9 mm 的实测 UHF PD 信号



(b) 针长为 12 mm 的实测 UHF PD 信号



(c) 针长为 15 mm 的实测 UHF PD 信号



(d) 针长为 18 mm 的实测 UHF PD 信号

图 2 高压导体金属突出物缺陷的实测 UHF PD 信号

置 3 处所测得的波形图。从波形上可以看出,在相同的外施电压下,曲率半径及位置一定时,波形形状(上升沿、下降沿的时间)、振荡次数没有明显变化,主要为负脉冲。这是因为针尖附近场强最高,当外加电压上升到该处的场强达到气体的击穿场强时,在针尖附近就发生放电,由于在负极性时容易发射电子,同时正离子撞击阴极发生二次电子发射,使得放电总是在针尖为负极性时先出现,这时正离子很快移向针尖电极而复合,电子附着于中性分子而成为负离子,负离子迁移的速度较慢,众多的负离子在电极之间,使得针尖附近的电场强度降低,于是放电暂停。随着电压上升,针尖附近的电场又升高到气体的击穿场强,于是出现下一次放电。这样,放电脉冲就主要出现在外加电压负半周 90° 相位的附近,产生了负脉冲。另外,选用了曲率半径为 0.25 mm 的银针进行了同样的实验,得到了同样的结论。

在国内外局部放电的超高频信号的研究中,均用超高频信号的电压幅值来表征局部放电的放电量。图 3 为 17.8 kV 下,曲率半径为 0.2 mm 的不同针长在 4 个位置点的放电幅值图。从图中可以看出,当针长和曲率半径一定时,在距传感器 10 mm 处放电幅值明显高于其他 3 个位置;当曲率半径及针与传感器位置一定时,放电幅值随针长度的增加明显增大。另外,当针长和位置一定时,放电幅值随曲率半径增大而降低,但变化不是很明显。随着电压的升高,放电幅值也逐渐增大。

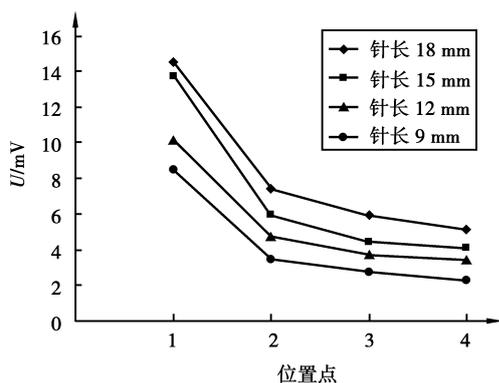


图 3 不同长度金属突出物缺陷在 4 个位置点的放电幅值

2.2 自由金属微粒缺陷实验结果及分析

GIS 内自由金属微粒在外电场作用下感应电荷以获得足够的电场能量,并在电场力的作用下发生跳动或位移,大大降低了气体绝缘系统的击穿电压。金属微粒运动的程度取决于微粒在电极上所带电荷 Q ,是微粒所在位置的电场 E 、微粒形状、微粒定向和大小的函数。微粒在电场中所受的力为 QE ,若大于重力,则微粒起跳,而一旦起跳之后,镜像电荷对微粒的引力减小,因而合力增加,微粒运动更快。

1) 起始放电电压

自由金属微粒运动存在着复杂性,因此很难定

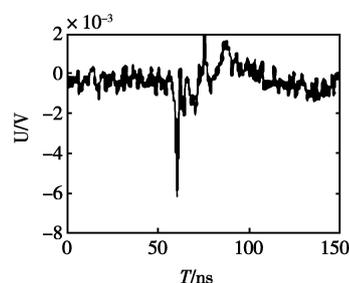
义自由金属微粒的起始放电电压。金属微粒的运动分为 3 个阶段,通常把金属微粒处于第一个阶段所加的电压作为该缺陷的起始放电电压:

① 颤动:金属微粒在原处颤动,尚未发生移动的状态,此时可以从示波器上观察到幅值很小(略大于 2 mV)的局部放电的超高频信号波形;

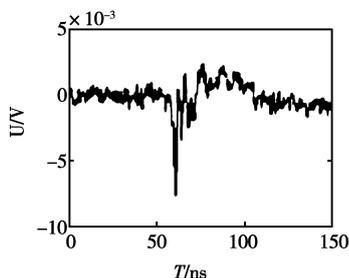
② 移动:金属微粒在 GIS 罐内开始移动,放电波形的幅值也略有增加;

③ 跳动:金属微粒开始起跳,当电压继续增加后,有些金属微粒在 GIS 罐内跳跃至更远的地方,有些金属微粒在电极之间来回运动,放电现象十分明显。

实验研究表明:自由金属微粒放置的位置对起始放电电压影响不大,这是因为 GIS 为同轴导体,微粒所放置的 4 个位置处的电场强度几乎相等;当位置一定时,尺寸规格为 $0.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的矩形微粒比 $0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的矩形微粒和曲率半径 1 mm 的球形微粒最先出现放电,即 $0.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的矩形微粒的起始放电电压最低,这可能是由于 $0.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的矩形微粒体积较小,质量较轻,更容易起跳。



(a) 19.7 kV 下 $0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 矩形微粒 UHF PD 信号



(b) 22.7 kV 下 $0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 矩形微粒 UHF PD 信号

图 4 $0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 矩形微粒在不同电压下的实测 UHF PD 信号

2) 放电波形

自由金属微粒的不规则性导致了实验所采集到的波形分散性较大,但也存在着一定的规律。图 4 为 $U_i = 1.3U_i$ 和 $U_i = 1.5U_i$ 下 $0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 矩形微粒在位置 3 的波形图。大量的实验研究表明:缺陷的规格及所处的位置对放电波形的形状影响不大,但所加电压对放电波形具有较大的影响。对于同样的规格的缺陷放置于同样的位置,随着所加电压的增大,放电现象越来越强烈,在波形上表现出波

峰和波谷的幅值增大,振荡更加明显,甚至振荡次数增加,特别是较长的矩形微粒,虽然起始放电电压较高,但是随着电压的逐渐升高,其放电幅值比较短的矩形微粒和球状微粒的放电幅值增加明显。因此,GIS 内较长矩形微粒的存在将会给气体绝缘系统造成更大的影响。

2.3 绝缘子表面固定金属微粒缺陷实验结果及分析

自由金属微粒在 GIS 中运动时,如果长期地固定在绝缘子表面,就会形成绝缘子表面金属污染物缺陷。这种缺陷的放电是发生在金属微粒和绝缘子表面之间,因此绝缘子表面的电荷积累特性对放电过程有着重要的影响,只有在较大的电场作用下才能发生局部放电。

1) 起始放电电压

绝缘子表面金属污染物缺陷的起始放电电压比较高,金属颗粒的放电在刚刚起始的时候放电量比较小,因此测得的放电信号幅值也比较低,随着电压逐渐升高,放电幅值逐渐增大。这是因为电压在升高时,放电的通道增长,放电面积增大之故。金属污染物的大小对起始放电电压的影响不是十分明显,但锡箔纸放置距高压导电杆的距离较近时,起始放电电压有所下降。

2) 放电波形

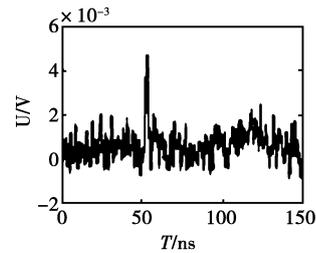
绝缘子表面金属污染物缺陷的放电波形与高压导体金属突出物缺陷、自由金属微粒缺陷的放电波形明显不同,放电脉冲主要为正脉冲。图 5 为绝缘子表面金属污染物缺陷局部放电的超高频信号波形。实验研究显示,当所加电压逐渐升高,放电幅值逐渐增大,尺寸为 $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的锡箔纸比 $1\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 锡箔纸放电发展速度快,尺寸较大的锡箔纸放电幅值增长速度比较快;另外,越靠近导电杆放电幅值越大,这是因为高压电极附近的场强较大,在绝缘子表面更容易发生闪络。放电波形主要为正脉冲,波形上升沿、下降沿的时间不受缺陷尺寸、缺陷的位置、所加电压的影响,但波形的振动幅度会有一些的变化。

2.4 气隙缺陷实验结果及分析

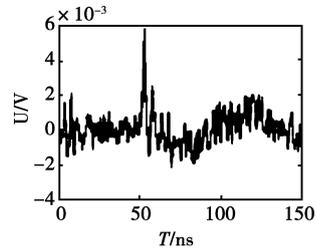
在介质内部或介质与电极之间有可能存在气隙,导致发生内部局部放电,这种放电的特性与介质的特性和气隙的形状、大小、位置以及气隙中气体的性质有关。实验讨论了内部绝缘子和内导体间交界处不同大小的间隙对局部放电超高频信号的影响。

1) 起始放电电压

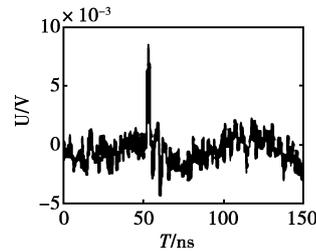
对于气隙缺陷,起始放电电压与气隙的厚度有关。当气隙较薄时,气隙的起始放电电压随着气隙厚度增大而下降,这可能是由于气隙的击穿场强随气隙厚度增大而下降造成的;当气隙厚度较大时,气隙的起始放电电压随着气隙厚度增大而上升,这可能是由于气隙厚度较大时气隙的击穿场强变化不大。



(a) $1\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 微粒距导电杆 30 mm 处的实测 UHF PD 信号



(b) $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 微粒距导电杆 30 mm 处的实测 UHF PD 信号



(c) $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 微粒距导电杆 20 mm 处的实测 UHF PD 信号

图 5 在 24.5 kV 下绝缘子表面金属污染物缺陷实测 UHF PD 信号

2) 放电波形

气隙缺陷引起局部放电的脉冲波形主要为正脉冲,这是因为气隙介于金属电极与介质之间,且靠气隙一边的导体是高压端,放电在工频正半周幅值较大。与绝缘子表面金属污染物缺陷的脉冲波形相比,放电幅值较高,当电压升至 $U_i = 1.2U_i$ 时,放电幅值超过了 10 mV 。随着电压的升高,放电波形的幅值也随之增加。将缺陷放在不同位置处,发现放电波形形状没有明显变化。图 6 为气隙缺陷引起的局部放电超高频信号波形。

3 结 论

根据 GIS 设备绝缘缺陷放电形式和特点,采用超高频法对模拟装置内所设计的 4 种 GIS 绝缘缺陷物理模型进行了大量的局部放电实验,获得了真实可靠的 UHF PD 波形样本。根据实验的结果可以看出,不管是那种缺陷类型引起的 PD 激发的超高频电磁波,在不太高的实验电压下,放电脉冲波形发生突变之前,放电脉冲的形状变化不大且比较稳定,放电脉冲的持续时间通常是 ns 级,其随机性主要表现在脉冲峰值的波动上。在一定放电强度下,放电的机理是相同的。因此,放电脉冲波形的相对稳定性使得从放电脉冲波形的角度进行数学建模和模式识别能获得理想的效果,这为进一步 UHF PD 信号

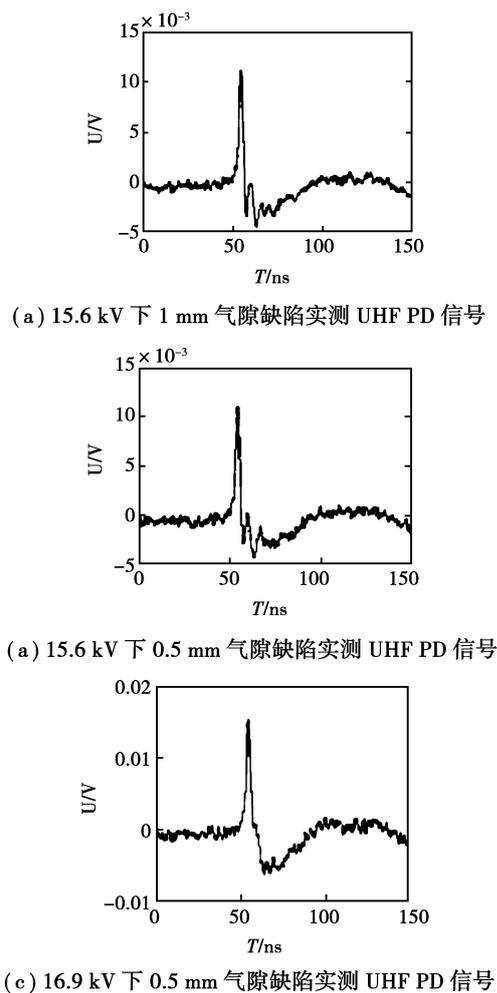


图 6 气隙缺陷实测 UHF PD 信号

波形的研究奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] HOSHINO T, NOJIMA K, HANAI M. Real-time PD identification in diagnosis of GIS using symmetric and asymmetric UHF sensors [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004, 19(3):1072-1577.
- [2] SHETTY P K, SRIKANTH R, RAMU T S. Modeling and on-line recognition of PD signal buried in excessive noise [J]. Signal Processing, 2004, 84(12): 2389-2401.
- [3] CHANG C, CHANG C S, JIN J, et al. Source classification of partial discharge for gas insulated substation using waveshape pattern recognition [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2):374 - 386.
- [4] KIL G S, SONG J Y, SONG J M, et al. Study on a partial discharge test for low-voltage electronic components [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2006, 49(6):2311-15.
- [5] KIM K H, YI S H, SUN J H, et al. The detection characteristics of the partial discharge pulses with folded dipole type sensors in the oil transformers[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2006,55(10): 485-91.
- [6] JUDD D, FARISH O, HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 213-228.
- [7] 王国利, 郑毅, 郝艳捧. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.
WANG GUO-LI, ZHENG YI, HAO YAN-PENG. Study on the Ultra-high-frequency sensor for PD detection in power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160.
- [8] 孙才新, 许高峰, 唐炬, 等. 检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 89-94.
SUN CAI-XIN, XU GAO-FENG, TA JU, et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 89-94.
- [9] 唐炬, 侍海军, 孙才新. 用于 GIS 局部放电检测的内置传感器超高频耦合特性研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 71-75.
TANG JU, SHI HAI-JUN, SUN CAI-XIN. Study of UHF frequency response characteristics of the inner sensor for partial discharge detection in GIS [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5): 71-75.
- [10] KAMATA Y, MIKI A, FURUKAWA S Y A. singular flashover path observed on the surface of synthetic-resin-bonded paper cylinders immersed in transformer oil under switching impulse voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(2):300-310.
- [11] TANG L J, LUO R C, DENG M, et al. Study of partial discharge localization using ultrasonics in power transformer based on particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2):492-495.
- [12] 周力行, 李卫国, 邓本再. 关于混沌遗传算法的变压器局部放电源点定位新算法[J]. 长沙电力学院学报:自然科学版, 2004, 19(1):43-49.
ZHOU LI-XING, LI WEI-GUO, DENG BEN-ZAI. A new method of locating the partial discharge sources in transformer based on chaos genetic algorithm [J]. Journal of Changsha University of Electric Power: Natural Science Edition, 2004, 19(1):43-49.
- [13] TANG Y J, SHIMIZU H, KATO T, et al. Performance of a 3000/6000 V, 1000 kVA class superconducting transformer developed for a prospective power transmission model system integrated under superconducting environment (PROMISE) [J]. Electrical Engineering in Japan, 116(1):30-42.
- [14] WU R N, LIN Y H. Estimating the aging trend of dry-type current transformer[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2004, 27(1):69-77.

(编辑 张小强)