

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.01.009

UHF传感器GIS局部放电检测特性的实验研究

邵先军¹, 何文林¹, 石华军², 周兴杨², 刘浩军¹, 徐华¹

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014; 2. 国网浙江省电力公司, 杭州 310007)

摘要:文中搭建了252 kV GIS局部放电实验平台,采用内置式、外置式UHF传感器以及自主研制的利用盆式绝缘子内部均压屏蔽环的抽取式环形UHF传感器,实验研究不同传感器的频率响应特性和在高压导体金属尖端、悬浮电位、盆式绝缘子边遗留金属垫片和自由金属颗粒等4种典型绝缘缺陷下的检测特性,并探讨了不同电压下局放的发展规律。结果表明,内置式、外置式和抽取式环形UHF传感器的检测频段分别在1.5 GHz以下、500 MHz至1.5 GHz、1 GHz以下,且抽取式环形UHF传感器在400 MHz左右其灵敏度最高。不同绝缘缺陷的局放检测结果表明,按PRPD谱图和放电严重程度,高压导体金属尖端可分为负电晕主导、正负电晕并存、正电晕主导以及“兔耳状”阶段,认为尖端附近空间电荷在阶段转变过程中起主要作用;悬浮放电逐渐由“尖端放电阶段”转变至放电幅值、密度及相位对称的典型悬浮式放电;盆式绝缘子边遗留金属垫片将由初始类悬浮放电转变至临界闪络状态;自由金属颗粒则可分为“跳动”、“舞动”和“滑移”阶段,放电主要集中在过零点附近。高压导体金属尖端、悬浮电位和自由金属颗粒缺陷的检测灵敏度为内置式传感器最高,外置式传感器最低,而对于盆式绝缘子边遗留金属垫片缺陷则是抽取式环形UHF传感器的灵敏度最高。

关键词: GIS; 局部放电; UHF; 状态检修; 故障诊断; 绝缘缺陷; 电磁波

Experimental and Simulation Research on GIS Partial Discharge Detection Characteristics of UHF Sensors

SHAO Xianjun¹, HE Wenlin¹, SHI Huajun², ZHOU Xingyang², LIU Haojun¹, XU Hua¹

(1. Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A 252 kV GIS partial discharge experimental platform was built. The inner grading electrode inside the insulating spacer, designed as an extractor-type loop UHF sensor, was combined with the internal and external UHF sensors to investigate their frequency responses and partial discharge (PD) detection characteristics. Four typical insulation defects, such as metal protrusion on high-voltage conductor, floating potential, metal shim left on the fringe of spacer, and free particles, were selected for the investigation, and the PD development features under different applied voltage amplitudes were discussed. It is shown that the working frequency ranges of the internal sensor, external sensor, and extractor type loop UHF sensor are <1.5 GHz, 500 MHz~1.5 GHz and <1 GHz, respectively, and the extractor type loop UHF sensor gains the highest detection sensitivity at about 400 MHz. The detection results of different defects PD show that the metal protrusion PD on high-voltage conductor can be divided into the negative corona dominated stage, the coexistence stage of positive and negative corona, the positive corona dominated stage, and the “rabbit ears” shape stage according to the PRPD and PD severity level, and the space charge around the protrusion is considered the dominant role during the stage transition. The floating potential defect PD transits gradually from the protrusion discharge stage to typical floating discharge with symmetrical discharge amplitude, density and phase. The PD of the metal shim left on fringe of spacer transits

收稿日期:2014-05-23; 修回日期:2014-06-19

基金项目:国家电网公司总部科技项目(ZDK012-2011)。

Project Supported by State Grid Scientific Project of SGCC (ZDK012-2011).

from the quasi floating discharge into critical flashover state. The free particles PD can be divided into “jump”, “dance”, and “shuffling” stages and the PD is centralized around the zero-crossing point of applied voltage. For the defects of metal protrusion on high voltage conductor, floating potential, and free particles, the internal sensor achieves the highest PD detection sensitivity but the external sensor achieves the lowest one. While for the metal shim left on the fringe of spacer, the extractor type loop UHF sensor achieves the highest PD detection sensitivity.

Key words: GIS; partial discharge; UHF; condition maintenance; fault diagnosis; insulation defect; electromagnetic wave

0 引言

GIS作为在电力系统中占据着重要地位的输变电设备,在 110 kV 及以上变电站、电厂中均有着广泛的应用^[1-3]。运行经验表明,尽管 GIS 设备运行的可靠性高,但其内部不可避免地存在一定的缺陷仍会引发故障并逐步扩大,导致重大事故的发生,已成为电力部门极为关注的问题和热点^[4]。根据 CIGRE 的 23.10 工作组统计,绝缘故障占到 GIS 故障的 50%以上,而绝缘故障早期的主要表现形式是局部放电^[5-6],因此通过开展对 GIS 局放的检测,可以在第一程度上发现可能存在的缺陷,对保证 GIS 的安全可靠运行具有重要的现实意义^[7-9]。

相比于超声波、SF₆分解物测量等方法,特高频法(ultra-high frequency, UHF)通过检测局部放电脉冲所激发的电磁波,具有抗干扰性能佳、灵敏度高以及可定位放电源等优点^[10-12]。基于 UHF 电磁波可在 GIS 腔体内传播或通过盆式绝缘子泄漏至外部等不同的 UHF 检测技术,国内外研究人员开发了多种不同形式的内置或外置 UHF 传感器,取得了一定的成效^[13-16]。但由于不同 UHF 传感器的频带和灵敏度都各有所异,不同绝缘缺陷所激发电磁波的频段以及不同 GIS 结构尺寸下的波导模式也各不相同。因此为了保证现场局放检测获得高灵敏度,十分有必要对比研究不同绝缘缺陷条件下几种 UHF 传感器的检测特性。

笔者基于 252 kV GIS 局放实验平台,采用内置式、外置式以及抽取式环形 UHF 传感器,实验研究了不同传感器的频响特性,以及高压导体金属尖端、悬浮电位、盆式绝缘子边遗留金属垫片和自由金属颗粒等 4 种典型绝缘缺陷的检测特性,并探讨了不同绝缘缺陷下局放的起始与发展过程的特性与规律。

1 实验平台与装置

1.1 试验平台

252 kV GIS 模型为单相母线结构,具体结构参

见该工作组之前发表的论文^[17],这里不再赘述。试验腔体上方设有一个石英玻璃窗用于观察,腔体内充有 0.4 MPa 的 SF₆ 气体,与现场运行的实际情况相同。实验中外施电压采用感应方式施加的,通过变化电压互感器二次侧电压来调节一次侧电压大小。

1.2 缺陷模型

在试验腔体内设置 4 种常见的缺陷模型,分别是高压导体上金属尖端、悬浮电位、盆式绝缘子边遗留金属垫片和自由金属颗粒。上述 4 种缺陷类型用来模拟 GIS 生产加工不良、现场安装不慎以及长时间运行后所产生的一些典型缺陷。

1) 高压导体上金属尖端通过在母线上安装一根长约 2.5 cm 的铜针来模拟,铜针下端通过平整的铝箔胶带固定保证与母线接触良好,置于试验腔体的中心位置,见图 1。

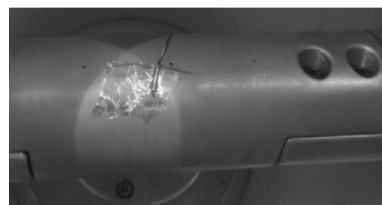


图 1 高压导体上金属尖端缺陷

Fig. 1 Metal protrusion on high voltage conductor

2) 悬浮电位缺陷常常发生于螺栓松动或接触不良的情形下。该实验所用的悬浮电位缺陷模型是将多块铜片置于多层绝缘胶带上,而绝缘胶带则紧贴于高压导体之上,使铜片处于电位悬浮状态。同样,悬浮电位缺陷置于腔体中心位置,见图 2。



图 2 悬浮电位缺陷

Fig. 2 Floating potential

3) 盆式绝缘子边遗留金属垫片缺陷是将一片金属垫片放置在盆式绝缘子与腔体内壁交界处的底部,见图 3。

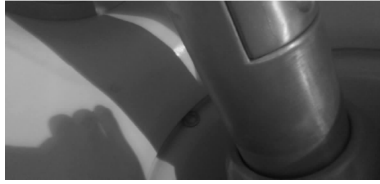


图 3 盆式绝缘子边遗留金属垫片缺陷

Fig. 3 Metal shim left on the fringe of spacer

4)自由金属颗粒缺陷则是将长短不一小铝箔颗粒(平均直径约为 3 mm)置于试验腔体的中心底部,见图 4。

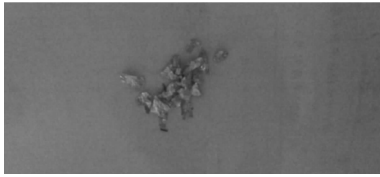


图 4 自由金属颗粒缺陷

Fig. 4 Free moving particles

1.3 UHF 传感器

在实验中采用了 3 种 UHF 传感器来检测 GIS 局放电磁波信号,分别是内置式、外置式和抽取式环形 UHF 传感器,其中第 3 种传感器是该研究小组自主研制的。

1)内置传感器结构见图 5,分别由金属圆板和绝缘支撑组成,其结构在低频时类似于电容分压器,在 UHF 频段则为圆形贴片微带天线,金属圆板相当于金属贴片,绝缘支撑则相当于介质基板。在天线领域,一般采用天线的 E 面来表征天线的方向性。E 面是指通过传感器天线最大辐射(或接收)方向并平行于电场向量的平面,意味着沿该平面的电场分量是传感器所接收的最大电场分量,也就是说使传感器的 E 面平行于辐射电场最大方向的话,传感器的工作最为灵敏。根据微带天线理论,该传感器的电场 E 面为垂直于金属圆板^[18]。因此其电场的最大接收分量为 GIS 腔体的径向分量。该实验中内置式传感器安装于试验腔体的正下方。

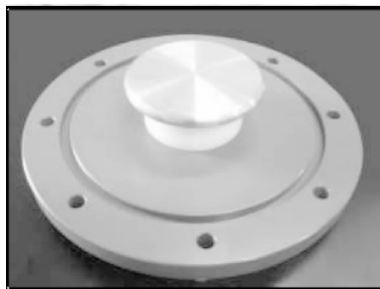


图 5 内置式 UHF 传感器

Fig. 5 Interior UHF sensors

接收天线的灵敏度一般采用天线高度或天线因子来表征,一般通过脉冲源输入的吉赫横电磁波传输

空(GTEM)测量得到的^[4]。根据 DMS 厂商提供的测量数据,该传感器的天线高度见图 6,可见天线高度最高约在 10 mm 左右,且当频率分量超过 1.5 GHz 后,天线高度显著下降,说明该传感器适合在 1.5 GHz 以下工作。

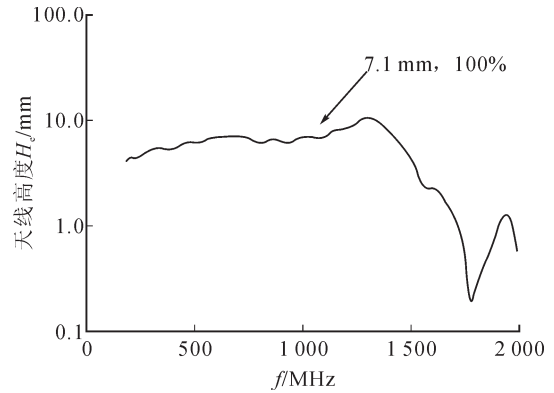


图 6 内置式 UHF 传感器的天线高度

Fig. 6 Antenna height of interior UHF sensors

2)外置式 UHF 传感器。在腔体两侧的盆式绝缘子正上方开有一个约长 4 cm、宽 2 cm 的浇注孔(绝缘子其余部分为金属包围),使腔体内 UHF 电磁波可通过浇注孔泄漏至外部,因此外置式 UHF 传感器安装于此处。该实验的 DMS 公司外置式 UHF 传感器见图 7。该浇注孔实际上为波导缝隙天线,其电场 E 面为平行于缝隙的窄边方向,即沿 GIS 的轴向^[15,19-21]。该传感器的天线高度见图 8,该传感器的最大天线高度略高于内置式传感器,且在 500 MHz 以下和 1 500 MHz 以上快速减小,说明传感器适合在 500 MHz~1.5 GHz 的频率范围内工作。



图 7 外置式 UHF 传感器

Fig. 7 External UHF sensors

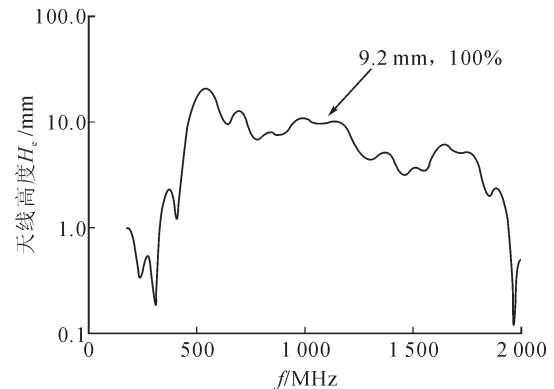


图 8 外置式 UHF 传感器的天线高度

Fig. 8 Antenna height of external UHF sensors

3)抽取式环形 UHF 传感器。GIS 盆式绝缘子中一般均设有绕整个盆子一圈的均压屏蔽环或称为均压环、均压弹簧,用以消除法兰和盆式绝缘子交接处可能存在的缝隙,起到均匀电场的作用。均压屏蔽环与法兰通过多个接地螺栓接触,见图 9。因此只需拧开其中一个接地螺栓,此时均压屏蔽环已成为一个环天线,保持其他几个接地螺栓状态不变,即整个均压屏蔽环仍处于接地状态,对 GIS 运行无任何影响。类似于电容式套管末屏抽取信号的方法,笔者通过设计一个抽取均压屏蔽环接地螺栓处信号的适配装置,见图 10,抽取某个已拧开接地螺栓处的信号即可用于检测 GIS UHF 局部放电^[2],因这种传感器的抽取信号是来自 GIS 盆式绝缘子内部均压屏蔽环所形成的环形天线,称之为抽取式环形 UHF 传感器。

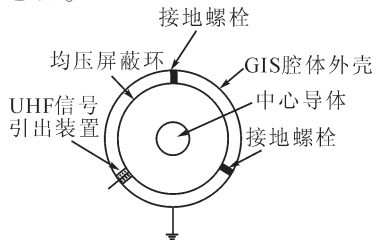


图 9 均压屏蔽环结构和 UHF 信号抽取示意图

Fig. 9 Sketch of grading electrode configuration and UHF signal extractor



图 10 抽取式环形 UHF 传感器的适配装置

Fig. 10 Adapter of extractor type loop UHF sensor

由于该实验室暂无 GETM, 无法测量脉冲电磁场下天线高度。笔者采用一个可调频的信号源(Agilent N5181B) 激励宽频天线在试验腔体内产生一个稳态电磁场,保持信号源输出幅值恒定在 0 dBm, 测量得到了不同频率下抽取式环形 UHF 传感器的响应曲线,见图 11。可见,该传感器在 1 GHz 以下的响应较为灵敏,特别是在 400 MHz 左右该传感器的接收幅值最高,说明该传感器适合在 1 GHz 以下的频段工作。

1.4 测量系统与平台

实验中所采用的 UHF 局放仪为 DMS PDM, 测量系统、接线及传感器的布置见图 12。为了更好地比较检测特性,外置式和均压屏蔽环 UHF 传感器安装在同一个盆式绝缘子之上。实验中时域下的 UHF

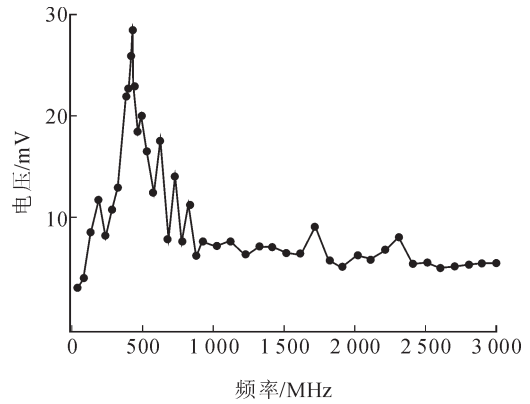


图 11 抽取式环形 UHF 传感器的频响曲线

Fig. 11 Frequency response of extractor type loop UHF sensor

信号是通过示波器(Agilent 92004A)获取。

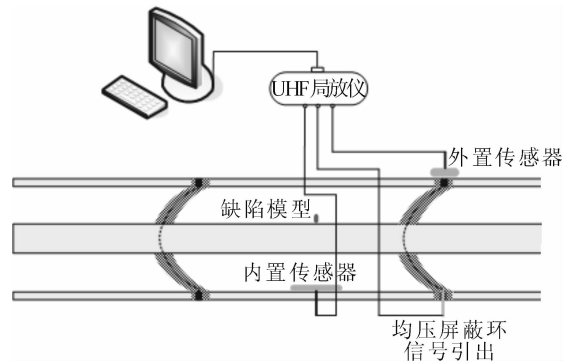


图 12 测量系统与平台

Fig. 12 Measurement system and its setup

2 实验结果与分析

2.1 高压导体上金属尖端缺陷

阶段 I: 因金属尖端附近电场集中,且 SF₆ 气体在极不均匀电场下其绝缘性能的提高有限,因此当高压导体上存在一个金属尖端缺陷时,在外施电压远低于运行电压时(37.5 kV 下),内置式和抽取式环形 UHF 传感器均可以检测到相应的局部放电 UHF 信号,而外置式传感器无任何信号,相应 UHF 传感器的 PRPD 谱图见图 13。从图 13 可见,因尖端附近空间电荷的作用,负电晕放电更易于起始,因此 UHF 信号主要集中在外施电压的-270°左右。实际上在外施电压约 30 kV 时,内置式传感器即可检测出幅值很小的正电晕 UHF 信号,但由于此时放电处于不稳定状态,无法累积成 PRPD 谱图,其 50 个电压周期下的 UHF 谱图见图 14。内置式 UHF 传感器所检测到的信号幅值约是抽取式环形的 2.5 倍,这一方面是由于金属尖端缺陷处于腔体中心即内置式传感器的正上方,UHF 电磁波到达内置式传感器的衰减程度较小;另一方面可能是传感器的灵敏度和工作频段的关系。另外,内置式 UHF 传感器在外

施电压 90°附近也存在着幅值微弱且放电次数较少的正电晕 UHF 信号,由于此 UHF 信号较弱,抽取式环形 UHF 传感器并没有检测到响应的 UHF 信号。

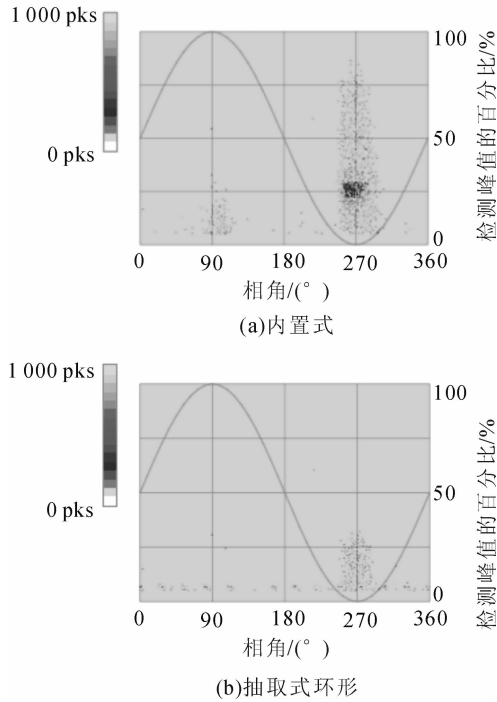


图 13 37.5 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 13 PRPD under 37.5 kV

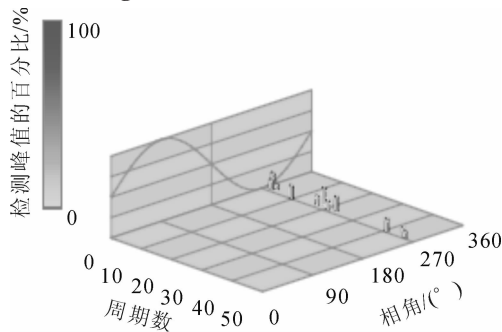


图 14 30 kV 下内置式传感器的 PRPD 谱图
Fig. 14 PRPD of interior sensor under 30 kV

阶段 II: 当外施电压升至 58.7 kV 时,内置式和抽取式环形 UHF 传感器的 PRPD 谱图见图 15,与图 13 类似的是内置式传感器信号幅值大于抽取式环形传感器,而外置式 UHF 传感器仍检测不到 UHF 放电信号。此时正负电晕放电的幅值相差不大,但正电晕放电密度明显少于负电晕放电。这是因为正电晕放电的机理类似于正流注放电^[23],其电晕头部附近易积聚起正电荷,加强前方的电场,使得前方易于形成新的电子崩,促进了放电通道的发展,因此正电晕放电在外施电压较低时,其放电密度较小但幅值较大。而负电晕放电则类似于汤生放电,主要是依靠阴极二次电子发射来维持的,在金属尖端(阴极)附近空间会积聚很多正电荷,加强了尖端附近的电场,使金属尖端附近同时产生了大量

的电子崩,大量电子崩的同时发展造成了较为弥散分布的等离子体层^[24]。

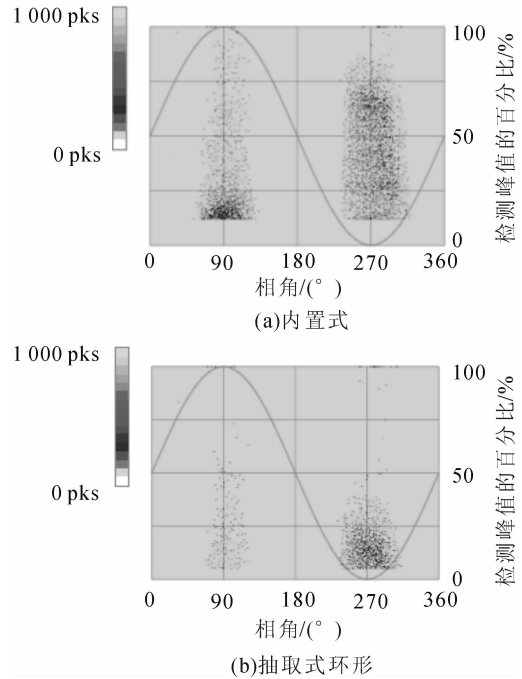


图 15 58.7 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 15 PRPD under 58.7 kV

阶段 III: 当外施电压升至 85.3 kV 下时,内置式和抽取式环形 UHF 传感器的 PRPD 谱图见图 16,外置式传感器仍无法检测到 UHF 信号。相比于负电晕放电,此时正电晕的放电密度高得多,并且从图 16(a)可见,正电晕 PRPD 已初步呈现出“兔耳状”轮廓^[25],说明此时外施电压已足够高,放电已基本过渡至以正电晕为主导的放电形式。另外,相比于图 13 和图 15,图 16 的正负放电的相位区间明显加宽,这是因为在放电结构和气压确定的情形下,放电起始电压基本变化不大,当电压较高时,放电脉冲可在外施电压到达峰值之前或之后发生。

阶段 IV: 当外施电压继续升至 110 kV 时,此时内置式和抽取式环形传感器的 UHF 信号幅值分别在 90%和 75%左右,而外置式传感器在金属尖端缺陷下其检测灵敏度较低仍无信号,见图 17。正电晕放电的谱图已呈现出明显的“兔耳状”,但放电中心仍在外施电压的正负峰值对称。此时如同前述,正电晕易于促进放电通道的发展,大量的正离子在电场作用下迁移至 GIS 腔体内壁等于缩短了尖端与地电极之间的距离,此时绝缘间隙有可能被击穿。

2.2 悬浮电位缺陷

阶段 I: 在外施电压 72.6 kV 下,悬浮电位缺陷开始发生放电,但放电并不稳定,无法累积成 PRPD 谱图,50 个周波下的内置式和抽取式环形传感器的 UHF 谱图见图 18,外置式传感器无 UHF 信号。内置

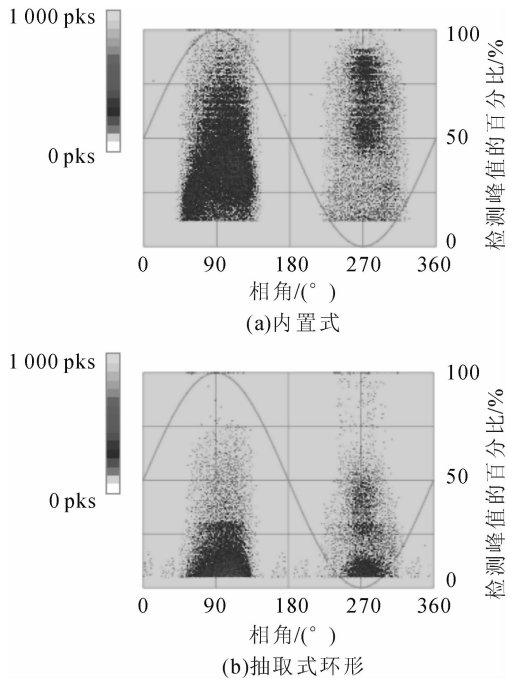


图 16 85.3 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 16 PRPD under 85.3 kV

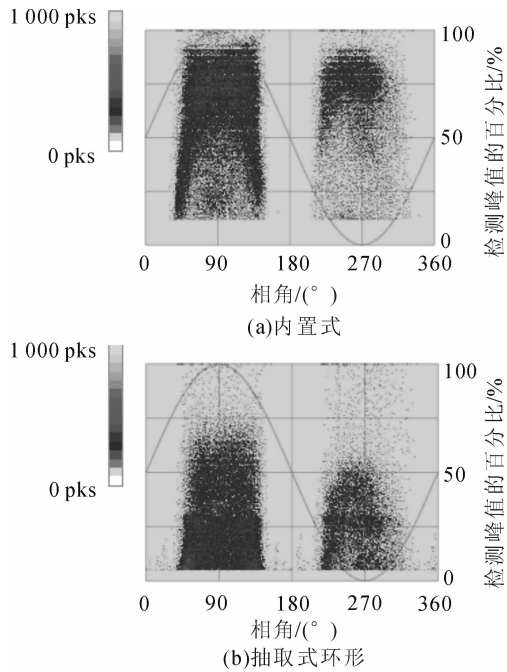


图 17 110 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 17 PRPD under 110 kV

式传感器的幅值高于抽取式环形 2 倍左右,原因与尖端缺陷阶段 I 中的阐述类似。因该缺陷模型中的铜片存在着边角尖端,在感应电压的作用下,放电易于在铜片尖端附近首先发生电晕放电,负极性下放电更易起始和发展,负放电强度高于正放电。

阶段 II:在外施电压升至 88 kV 下,悬浮电位缺陷放电趋于稳定,内置式和抽取式环形传感器均可检测出明显的 UHF 信号,两者的 PRPD 谱图见图 19。此阶段负放电的强度和密度均大于正放电,其

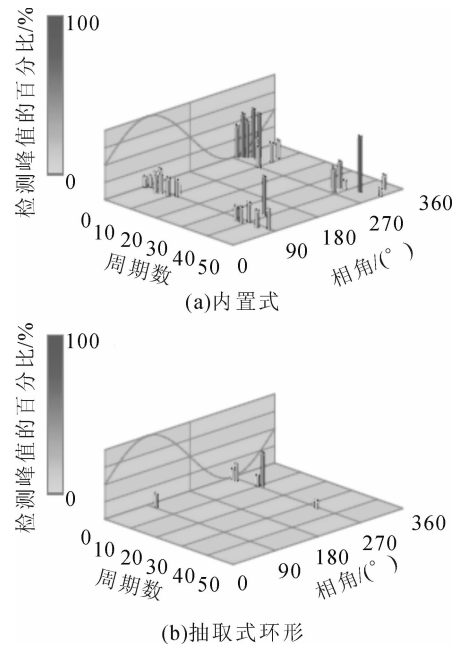


图 18 72.6 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 18 PRPD under 72.6 kV

原因类似于阶段 I,因此笔者将阶段 I 和 II 统称为“尖端放电阶段”。

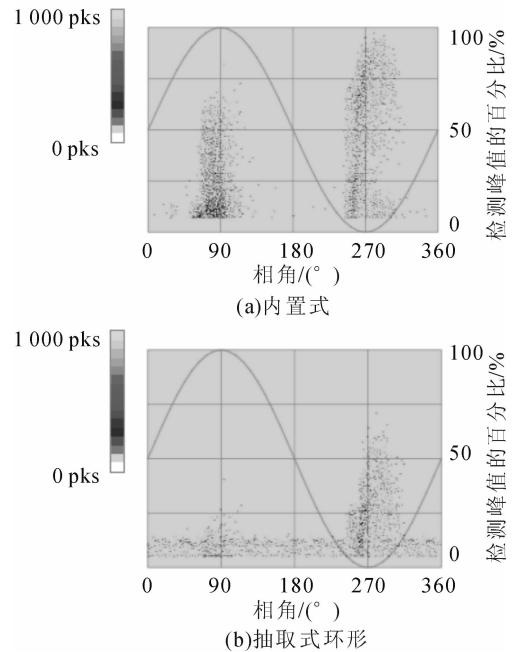


图 19 88 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 19 1PRPD under 88 kV

阶段 III:当外施电压升至 121 kV 接近 GIS 设备运行电压时,外置式传感器也可以检测到微弱的 UHF 信号,这也反映了外置式传感器的灵敏度较低。3 种传感器的 PRPD 谱图见图 20,可见,该阶段下内置式和抽取式环形的信号幅值基本达到 100% 左右,且正负放电幅值与密度已基本对称,信号稳定,呈现出典型的悬浮电位缺陷谱图。同时,相比于阶段 I 和阶段 II,因阶段 III 的外施电压较高,放电

密度最高处已逐渐偏离中心左移。

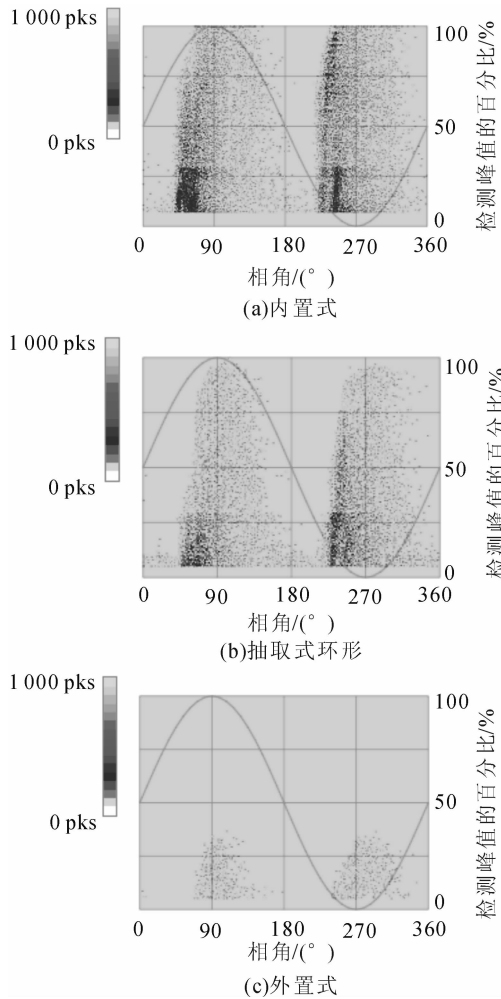


图 20 121 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 20 PRPD under 121 kV

2.3 盆式绝缘子边遗留金属垫片

阶段 I: 在外施电压 81.4 kV 下, 内置式和抽取式环形已能检测出明显的局放 UHF 信号, 而外置式无信号, 相应的 PRPD 谱图见图 21。因该缺陷置于盆式绝缘子底部, 离抽取式信号引出装置较近, 因此抽取式环形的 UHF 信号明显强于内置式传感器, 说明这两种传感器灵敏度的大小跟缺陷位置是密切相关的。PRPD 谱图表现为类似于悬浮放电的谱图, 与腔体内壁金属异物产生的电晕谱图(放电主要发生在正半周峰值附近) 有着明显区别, 这是因为盆式绝缘子底部边缘所遗留的金属垫片是斜靠在盆式绝缘子之上, GIS 腔体内壁刷有绝缘漆, 因此该金属垫片缺陷实际上属于悬浮类缺陷, 放电易于发生在金属垫片与绝缘子或绝缘漆交接缝隙处。

阶段 II: 随着外施电压升高至 92.4 kV 下, 两种传感器的 PRPD 谱图见图 22, 抽取式环形信号强度仍明显大于内置式。此阶段下负放电幅值仍稍强于

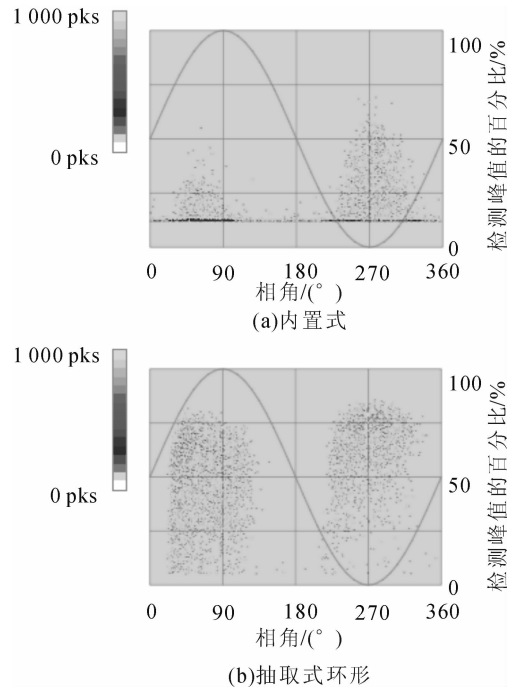


图 21 81.4 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 21 PRPD under 81.4 kV

正放电, 放电谱图类似于两座相位对称的“山丘”, 正负放电相位逐渐向过零点偏移, 放电幅值和密度逐渐增加, 信号的相位宽度也稍有加宽, 放电主要集中在 30°~145°和 210°~315°之间。

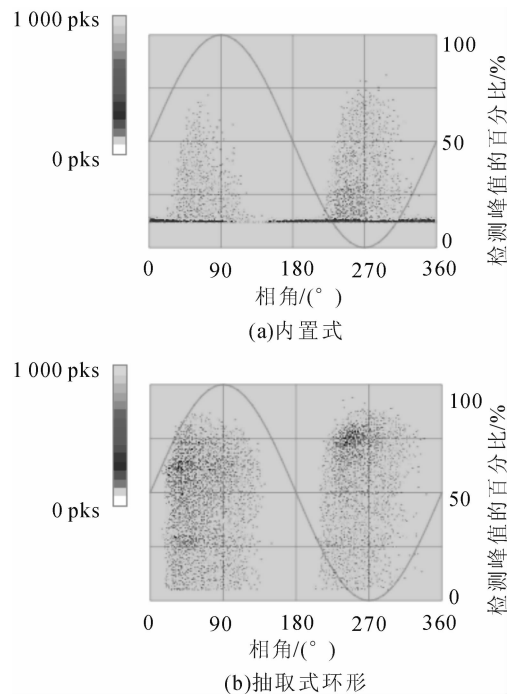


图 22 92.4 kV 下 PRPD 谱图
Fig. 22 PRPD under 92.4 kV

阶段 III: 当外施电压在 121 kV 下, GIS 已能听到明显的“嗡嗡”声, 基本接近临界闪络状态。此时 3 种传感器检测灵敏度大小依次是抽取式环形、内

置式和外置式,对应的 PRPD 谱图见图 23。该阶段的放电相位接近过零点,相位宽度和放电幅值也明显较阶段 II 增加,放电谱图类似于典型悬浮电极放电。盆式绝缘子存在金属异物类缺陷是引起 GIS 绝缘闪络的主要原因,抽取式环形传感器是十分适用于检测此类缺陷。

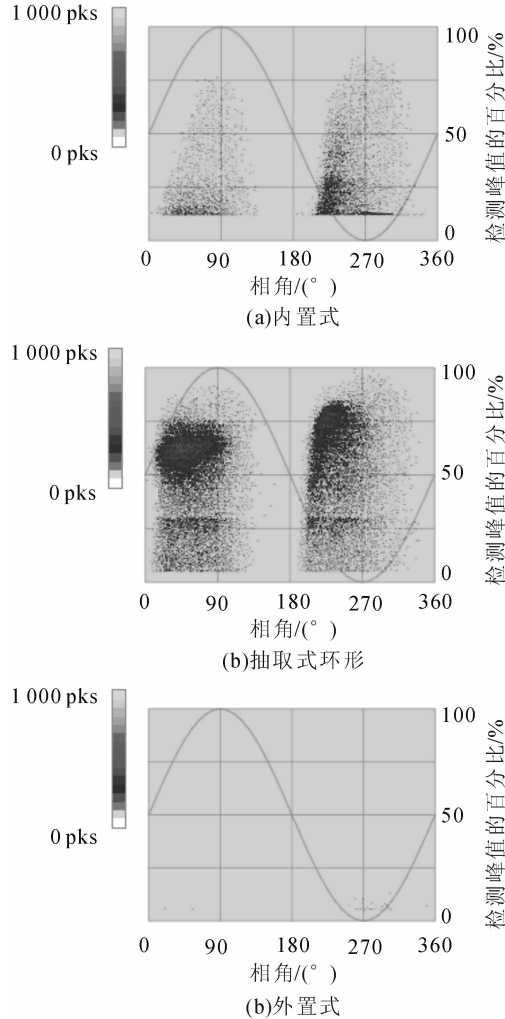


图 23 121 kV 下 PRPD 谱图

Fig. 23 PRPD under 121 kV

2.4 自由金属颗粒缺陷

阶段 I: 在外施电压 44 kV 下,此时由于金属颗粒开始在电场作用下跳动,可能跳至电场稍小的地方而不再跳动,因此在外施电压较低情形下,放电并不是十分稳定无法累积成 PRPD 谱图,此阶段为颗粒“跳动”阶段。3 种传感器在该电压下,50 个电压周期的 UHF 谱图见图 24,可见,3 种传感器的信号幅值大小依次是内置式、抽取式环形和外置式。当电场力超过颗粒自身重力时,金属颗粒将开始离开腔体底部舞动,放电就是金属颗粒重新落回腔体底部产生的,正放电在 180°和负放电 0°附近更易落回腔体底部,因此反映在谱图上放电虽然没有明显的相位特征,但在过零点附近放电脉冲相对密集一些。

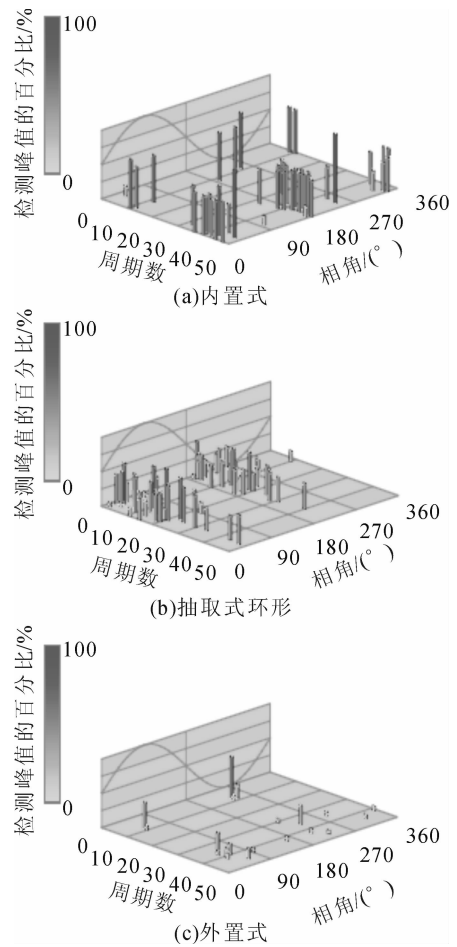


图 24 44 kV 下 PRPD 谱图

Fig. 24 PRPD under 44 kV

阶段 II: 当外施电压逐渐升至 52.8 kV 下,此时电场力比阶段 I 时增加不少,使得基本上所有金属颗粒都可以开始舞动,说明放电已进入另一阶段为“舞动”阶段。见图 25,此时内置式传感器的信号幅值和密度都很高,幅值已基本接近检测峰值。外置式传感器的脉冲幅值和密度仍然较小,说明外置式对此类缺陷的灵敏度也较低。

阶段 III: 当外施电压升至 77 kV 时,3 种传感器的 PRPD 谱图见图 26。此时,抽取式环形的幅值也达到了检测峰值,说明放电很是剧烈。此阶段的金属颗粒有可能向上跳动至高压导体,在高压导体上产生放电脉冲,当局部的电晕放电转变为先导放电时,有可能使 GIS 设备击穿放电。此阶段的放电密度很大,PRPD 谱图已呈现出一定的相位特征,正负放电对称,类似于悬浮放电,说明金属颗粒已从“舞动”阶段进入“滑移(shuffling)”阶段^[26-29]。

3 结语

笔者搭建了 252 kV GIS 局放实验平台,实验与仿真研究了 3 种 UHF 传感器的频响特性及局部的

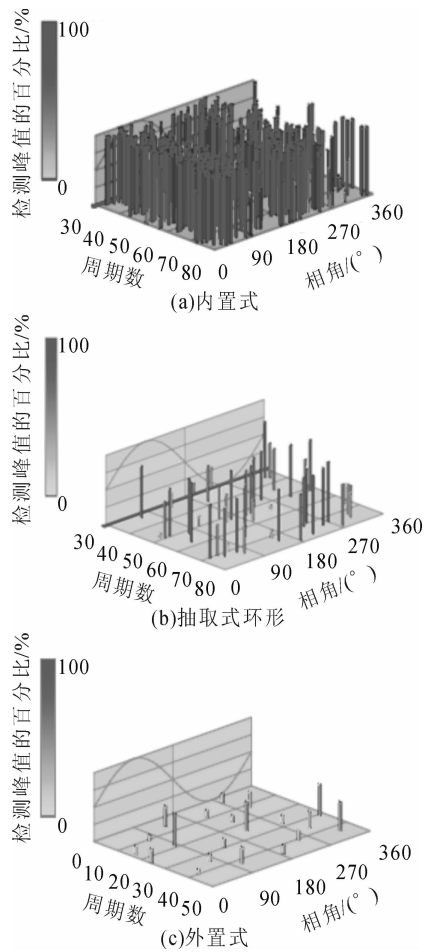


图 25 52.8 kV 下 PRPD 谱图

Fig. 25 PRPD under 52.8 kV

检测特性,结果表明,按放电谱图的变化和严重程度,4种绝缘缺陷可分别分为几个阶段来讨论,各个阶段的放电幅值、密度、相位均有各自明显的特征。

缺陷所处的位置和传感器安装位置是决定传感器灵敏度的重要因素;对于发生腔体中间的缺陷,检测灵敏度分别是内置式>抽取式环形>外置式传感器,对于发生在盆式绝缘子边缘底部缺陷则是抽取式环形传感器的灵敏度最高。

参考文献:

[1] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京:中国电力出版社,1999:86-88.
 [2] 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.
 [3] 李 信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究[D]. 北京:华北电力大学,2005.
 [4] 胡泉伟,吴 磊,季盛强,等. 利用局部放电评价 GIS 典型缺陷危险性的研究[J]. 高压电器,2012,48(2):19-22.
 HU Quanwei,WU Lei,JI Shengqiang,et al. Study on risk of failure of defects in GIS based on partial discharge[J].

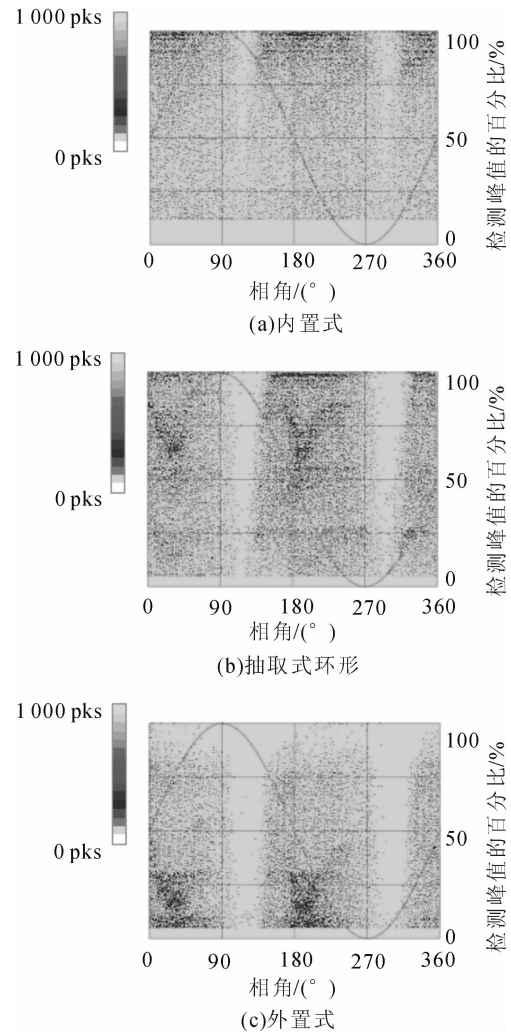


图 26 77 kV 下 PRPD 谱图

Fig. 26 PRPD under 77 kV

High Voltage Apparatus,2012,48(2):19-22.

[5] 陈温良,董 燕,贾 华. 对金属化电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(1):31-36.
 CHEN Wenliang,DONG Yan,JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2008,29(1):31-36.
 [6] 夏建中,李洪臣. 对电力电容器局部放电的理解与对策[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(2):7-9.
 XIA Jianzhong,LI Hongchen. Research and countermeasure on partial discharge of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2009,30(2):7-9.
 [7] 耿弼博. GIS 金属颗粒放电发展的试验研究[J]. 电网与清洁能源,2011,27(7):16-20.
 GEGN Bibo. Experimental study on developing processes of metallic particle discharges in GIS[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(7):16-20.
 [8] 齐 波,李成榕,耿弼博,等. GIS 设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术,2011,37(7):1719-1727.

- QI Bo, LI Chengrong, GENG Bibo, et al. Severity diagnosis and assessment of the partial discharge provoked by high-voltage electrode defect on GIS insulator surface[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7):1719-1727.
- [9] DING D W, GAO W S, YAO S J, et al. Analysis of excitation characteristics of ultra high frequency electromagnetic waves induced by PD in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8):1893-1901.
- [10] 李成榕, 王浩, 郑书生. GIS 局部放电的超声波检测频带试验研究[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1):41-45.
LI Chengrong, WANG Hao, ZHENG Shusheng. Experiment research on ultrasonic band selection of GIS partial discharge detection[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1):41-45.
- [11] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2004.
- [12] KAWADA M. Fundamental study on locating partial discharge source using VHF-UHF radio interferometer system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2003, 144(1):32-41.
- [13] JUDD M D, HAMPTON B F. The excitation of UHF signal by partial discharge in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2):213-228.
- [14] JUDD M D, FARISH O, COVENTRY P F. UHF couplers for GIS-sensitivity and specification[C]//10th International Symposium on High Voltage Engineering. Montreal, Canada: [s.n.], 1997:14-17.
- [15] KANEKO S, OKABE S, MUTO H, et al. Detecting characteristics of various type antennas on partial discharge electromagnetic wave radiating through insulating spacer in gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(5):1462-1472.
- [16] LI Tianhui, RONG M Z, ZHENG C, et al. Development simulation and experiment study on UHF partial discharge sensor in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4):1421-1430.
- [17] 徐华, 胡文堂, 陈金法, 等. GIS 中电磁波传播特性的试验研究[J]. 浙江电力, 2012, 31(11):1-4.
XU Hua, HU Wentang, CHEN Jinfa, et al. Experimental study on propagation characteristics of electromagnetic wave in GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(11):1-4.
- [18] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002:466-468.
- [19] TACCHINI A, GROSSI D, VINCETTI L, et al. Electromagnetic analysis of PD detection in GIS systems[C]//2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Asia-Pacific: [s.n.], 2012:889-892.
- [20] 卢启付, 郑书生, 李兴旺, 等. GIS 金属法兰孔特高频信号传播特性研究与外置式发射天线开发[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2303-2309.
- LU Qifu, ZHENG Shusheng, LI Xingwang, et al. Study on propagation characteristics of UHF signal via hole of GIS mental flange and development of external radiating antenna[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2303-2309.
- [21] 龙锦壮, 王克涛, 赵鑫, 等. 一种工程实用的 GIS 定量检漏方法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6):67-70.
LOMNG Jinzhuang, WANG Ketao, ZHAO Xin, et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6):67-70.
- [22] 倪学锋, 谢诚. 极对壳绝缘局部放电试验对电容器绝缘老化的评定[J]. 电力电容器, 2005, 26(1):35-38.
NI Xuefeng, XIE Cheng. Predication of the insulation ageing for power capacitor according to the pole-to-case in insulation partial discharge test[J]. Power Capacitor, 2005, 26(1):35-38.
- [23] RAIZER Y P. Gas discharge physics[M]. Heidelberg:Springer-verlag, 1991.
- [24] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002:72-74.
- [25] 李继胜, 赵学风, 杨景刚, 等. GIS 典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2440-2445.
LI Jisheng, ZHAO Xuefeng, YANG Jinggang, et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2440-2445.
- [26] MEIJER S, SMIT J J. UHF defect evaluation in gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2):285-296.
- [27] 王江, 钱勇, 刘君华, 等. GIS 中局部放电与超高频电磁波关系的仿真研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5):456-459.
WANG Jiang, QIAN Yong, LIU Junhua, et al. Simulating the relationship between PD waveform and UHF electromagnetic wave in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5):456-459.
- [28] 李云阁, 尚勇, 施荣, 等. 750 kV GIS 中 VFTO 现场实测波形分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11):25-29.
LI Yunge, SHANG Yong, SHI Rong, et al. Analysis of VFTO waveforms on-site measured on 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11):25-29.
- [29] 李云阁, 侯清川, 周斌, 等. 750 kV GIS 中 VFTO 峰值[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12):8-11.
LI Yunge, HOU Qingchuan, ZHOU Bin, et al. VFTO magnitude values on the 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12):8-11.
- 邵先军(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事 GIS 局部放电检测与诊断、气体放电物理等方面的工作。