

文章编号:1000-582X(2010)11-039-07

模拟气体绝缘组合电器产生不同局部放电的试验装置研制

唐 炬, 欧阳有鹏, 王存超, 谢颜斌, 张晓星

(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 400044)

摘 要:针对现有直线型气体绝缘组合电器(GIS)局部放电模拟实验装置的不足,研制了一种可变结构的 GIS 模拟实验装置,可方便地实现对 T 型、L 型和直线型 GIS 结构的模拟。通过超高频电磁波传播特性和材料应力分析,给出了装置的结构尺寸和材料选择参数,从进行的单一和多缺陷产生的局部放电试验表明,该装置能够激发出不同绝缘缺陷产生不同频段的超高频 TE 波和 TM 波局部放电信号,且具有各自特点和差异,这为深入研究 GIS 不同绝缘下产生的局部放电电磁传播特性、产生条件、超高频检测方法以及缺陷辨识等提供了可靠地实验研究手段。

关键词:气体绝缘电器;局部放电;物理模型;电磁波;组合绝缘缺陷

中图分类号:TM835

文献标志码:A

Study on the testing device for simulating the partial discharges of different defects in gas insulated switchgear

TANG Ju, OUYANG You-peng, WANG Cun-chao, XIE Yan-bin, ZHANG Xiao-xing

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To overcome the shortage of existing experimental device for partial discharges in gas insulated switchgear(GIS), an installation for testing PD in GIS with multi-structures is designed, which can simulate T-type, L-type and line-type configurations of GIS expediently. The physical dimension and material parameter are given by calculating the characteristic of the propagation of ultra-high frequency electromagnetic waves and the stress of materials. The experiments under single defect and multiple insulation defects are carried on by using the designed 4 physical models of typical insulated defects for GIS. The results show that the built device can simulate the PD, TE mode and TM mode waves with different wave bands in GIS. The system makes a foundation for the further investigation of the electromagnetic waves propagation, the conditions of generating electromagnetic waves, testing method and pattern recognition of the PD in GIS.

Key words: GIS; partial discharges; physical model; electromagnetic waves; multiple insulation defects

气体绝缘组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)应用越来越广泛,但内部存在各种无法避免的绝缘缺陷^[1],会产生导致设备故障的局部放电

(Partial Discharge, PD);同时,由于 GIS 中产生的 PD 信号脉冲陡度可达 1~2 ns,且严重的电磁干扰和 GIS 金属封闭式结构使得微弱的 PD 信号不易被

收稿日期:2010-06-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2009CB724506);国家自然科学基金资助项目(50777070)

作者简介:唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,973 首席科学家,主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究。(Tel)023-65112739;(E-mail)cqtangju@vip.sina.com。

测量,再加上 PD 放电的模式存在多样化等特点,要准确检测和识别 PD 信号成了本领域关注的难点问题。要从根本上解决上述问题,需要在理论分析基础上,进行大量的实验室规律性模拟试验研究。日本东京电力公司对 L 型和 T 型 GIS PD 进行了仿真和初步实测研究,其研究重点集中在电磁波模波相互之间转变等方面^[2-3]。国内上海交通大学和西安交通大学的学者采用 FDTD 方法分别对电磁波在直线型、L 型和 T 型 GIS 中的传播特性进行了仿真研究^[4-5],取得了一定的理论仿真成果。这些研究成果大多基于理论仿真,用单一试验装置获得的实验结果难以对其进行验证,为此有必要构建能够模拟实际不同组合结构下的 GIS 试验装置。现有的单一 GIS 模拟实验装置都是以真实 GIS 直线段为参考的设计,存在以下不足:

1)不能完全对真实 GIS 产生 PD 的进行模拟试验。真实的 GIS 设备结构除了直线型部分,还有 T 型和 L 型连接组合部分。在 T 型和 L 型结构中,PD 信号的传播特性将发生变化,除了电磁波的折射反射现象外,还伴随有电磁波传播模式转变等复杂的电磁过程,其衰减的方式也将随电磁波模式的转变而发生变化^[2,6]。

2)不方便进行多绝缘缺陷产生 PD 信号的相互影响研究。由于直线型 GIS 模拟装置结构的单一,在模拟多绝缘缺陷产生 PD 时,不能很好反映不同类型 PD 信号在同一空间中的叠加、衰减、畸变及传播等相互作用与影响,以致无法研究多 PD 源的检测和识别。

3)不便于用超高频(Ultra High Frequency, UHF)法检测 PD 的定量研究。UHF PD 放电量标定是困扰 UHF 在线监测技术发展的难题,其放电量的大小不仅与信号幅值有关,还与波形相关。与直线型结构相比,在 T 型和 L 型结构中,UHF PD 信号不论幅值还是波形都将发生改变。因此,要定量检测 UHF PD,必须深入了解其传播特性,根据采集到的 UHF 信号传播距离和经过路径以及信号的衰减,可对其进行信号的还原,以得到放电源处信号的幅值和波形,然后进行放电大小的定量研究。

笔者针对上述现有 GIS 试验装置的不足,首次研制了一种可变结构的 GIS 试验装置,通过拆分组合可以方便实现对 T 型、L 型和直线型 GIS 的绝缘缺陷模拟,并对组合绝缘缺陷产生的 PD 进行了试验,试验数据能完全满足研究需要。

1 GIS 装置本体设计

1.1 外形设计

GIS 是由一系列的直线段等值同轴波导通过 T 型或 L 型接头连接起来而形成的全封闭组合设备。因此,实验室研究所用到的 GIS 实验模拟装置要能够体现出其所有结构单元,才能得到更加有实际价值的研究结果。

笔者设计了一种可变结构的 GIS 实验模型,能方便实现对 T 型、L 型和直线型 GIS 装置产生 PD 的模拟。该模拟装置的主体由 3 个尺寸相同的直线型同轴波导和一个三通连接单元组成,通过螺栓紧固和拆分,进行结构变换,如图 1 所示。

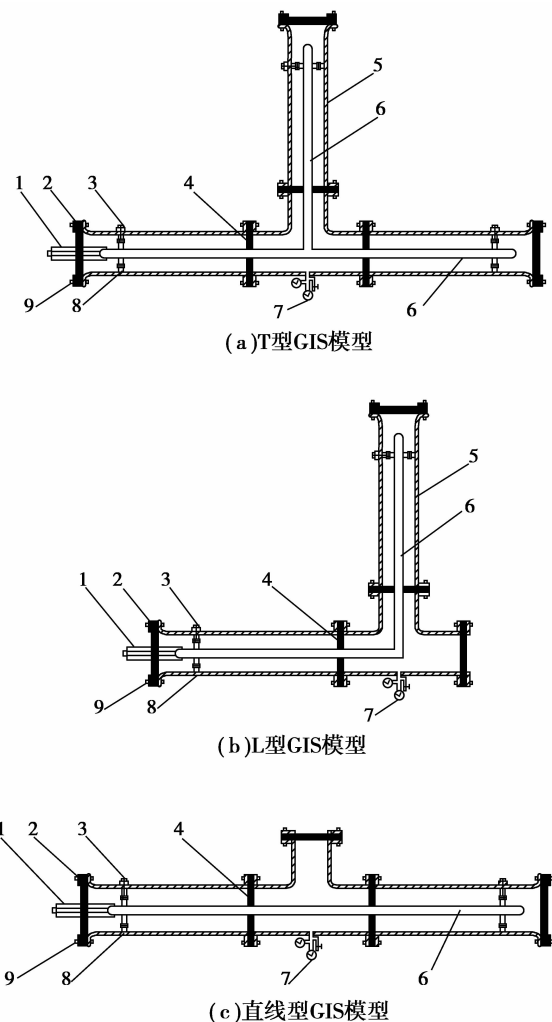


图 1 可变结构 GIS PD 实验模型

1. 铜接线柱; 2. 端盖; 3. 内置圆环 UHF 传感器出口;
4. 支撑绝缘子; 5. 接地壳体; 6. 高压电极; 7. 真空压力表及进气阀; 8. 内置圆环 UHF 传感器; 9. 螺杆及螺母

1.2 尺寸选择

1.2.1 罐体半径

针对 GIS 同轴结构,可以近似将电磁波在 GIS 中的传播视为同轴波导^[7],如图 2 所示。其电磁波传播表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} &= -j\omega\mu H_r \\ \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= -j\omega\mu H_\varphi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(rE_\varphi)}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} &= -j\omega\mu H_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

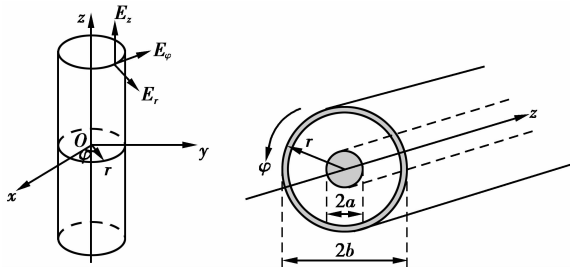


图 2 圆柱坐标中电磁波

GIS 内部绝缘缺陷产生 PD 时激发出的 UHF 电磁波,在同轴波导中传播时,不仅存在横向电磁波(TEM),而且还有横电波(TE)和横磁波(TM)。TEM 为非色散波,它能以任何频率在 GIS 中传播,而 TE、TM 波则不同,各自具有截止频率 f_c ,其值取决于 GIS 的同轴尺寸,只有当电磁波频率 $f > f_c$ 时,电磁波才能传播^[8]。电磁波在同轴波导径向尺寸为 $a < r < b$ 范围内传播时,可由式(1)推导出 TE 模波或 TM 模波在圆柱坐标系中的表达形式^[7]:

$$\frac{r}{R} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) + k_c^2 r^2 = -\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\omega^2}, \quad (2)$$

式中 $k_c = 2\pi/\lambda_c$ 为截止波数。求解上式可得同轴波导中可能存在的 TE 模波和 TM 模波的纵向分量为:

$$\frac{H_z}{E_z} = R(r)\Phi(\varphi)e^{-jz}, \quad (3)$$

式中 $\Phi(\varphi) = A \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases}$ (n 为正整数); $R(r) = B_1 J_n(k_c r) + B_2 N_n(k_c r)$, $J_n(k_c r)$ 、 $N_n(k_c r)$ 为第一、二类贝塞尔函数, A 、 B_1 、 B_2 为常数。令 $k_c^2 = k^2 - \beta^2$, 当 $k^2 = k_c^2$ 时,在同轴波导中 TE 模波和 TM 模波的传播出现截止。TE 波和 TM 波的截止频率计算如下式所示^[9]:

$$\text{TE}_{mn}: f_c \cong \frac{mc}{\pi(a+b)}, n=1; \quad (4)$$

$$f_c \cong \frac{(n-1)c}{2(b-a)}, n \geq 2; \quad (5)$$

$$\text{TM}_{mn}: f_c \cong \frac{nc}{2(b-a)}. \quad (6)$$

式中: a 为内导体半径; b 为接地外壳内半径; c 为光速; m 和 n 取任意正整数。由于在 GIS 内部 PD 激发的电磁波中,高次模波占有很大成分。为了研究高次模波所包含的 PD 信息以及其传播特性等特点,本模拟实验装置以 110 kV 实际 GIS 尺寸为参考,以 3:1 的比例缩小其尺寸,选择内导体半径为 21.2 mm,外壳内半径为 61.5 mm,可获得为 1 GHz 以下的高次模波。

1.2.2 罐体长度

用 UHF 法检测 GIS PD 的频段一般为 0.3~1 GHz,相应的波长范围为 0.1~1 m,而 GIS 实验模型尺寸与其内部 PD 激发的 UHF 电磁波的波长可比,所以分析电磁波传播时,需将 GIS 波导模型转换成分布参数电路进行分析。GIS 同轴波导实验模型波阻抗计算公式如式(7)所示:

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a}, \quad (7)$$

式中 μ 、 ϵ 分别为同轴波导填充介质后的磁导率和介电常数。

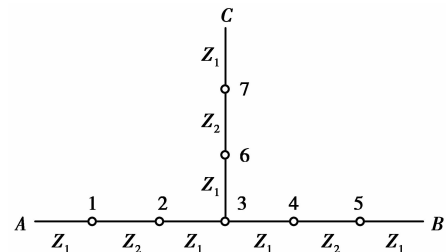


图 3 GIS 同轴波导阻抗等效图

设填充 SF_6 气体后 GIS 同轴波导波阻抗为 Z_1 ,绝缘子部分波阻抗为 Z_2 ,则图 1(a)中的 T 型 GIS 实验模型波阻抗可等效如图 3 所示。假设传感器安装在端口 A 和节点 1 之间,在 1 节点左侧发生局部放电,激发的电磁波向节点 1 和端口 A 两个方向同时传播。由于 GIS 实验模型端口 A、B 和 C 处于开路状态,电磁波在这三处将产生全反射;波阻抗 $Z_1 \neq Z_2$,在节点 1 处,电压波也将会发生折反射。从端口 A 和节点 1 反射回来的电压波加上 PD 原始波形会共同作用在传感器上,检测到的是叠加波形。这样很容易与组合绝缘缺陷产生 PD 的检测波形发生混淆。为了避免这种情况,设计端口 A 和节点 1 之间的长度为 0.8 m,可使反射波与原始 PD 信号到达传

传感器的时间之间具有可分辨的时差,以便区别原始信号与反射信号。

1.3 材料选择

本装置在选材方面,尽可能要与实际 GIS 一致,主要考虑以下方面:

1) 接地壳体。选用不锈钢材料,它具有化学稳定性好、耐腐蚀、透气率小、耐高压、易加工等特点,符合接地壳体对压力和抗腐蚀性等的要求。

2) 高压电极。由于 GIS 模拟装置在试验中处于空载状态,内导体上流过 PD 微小脉冲电流,因此内导体设计为 0.5 mm 厚且表面光洁的不锈钢管。

3) 支撑绝缘子和端盖。用于支撑内导体的绝缘子(图 1 中 4)材料选用环氧树脂。端盖(图 1 中 2)采用透紫外光高强度石英玻璃,目的是能用紫外成像仪提供研究 GIS PD 机理的图像信息^[10]。

1.4 应力计算

1.4.1 接地壳体厚度选择

实际运行的 GIS 内部充有 0.3~0.5 MPa 的 SF₆ 绝缘气体,为此,本装置设计的最高工作压力为 0.5 MPa。在实验中,首先抽真空,排出空气等杂散气体,再充以 0.3~0.5 MPa 的 SF₆ 气体,故在考虑机械强度时,应同时考虑要能承受的内外压力。

1) 承受内压力时,接地壳体厚度 S_i 应满足^[11-12]:

$$S_i = \frac{pD}{2[\sigma]} + C, \quad (8)$$

式中: p 为设计压力; D 为接地壳体内直径; C 为附加厚度; $[\sigma]$ 为使用材料许用应力,其计算式为:

$$[\sigma] = \min\left\{\frac{\sigma_b}{n_b}, \frac{\sigma_s}{n_s}\right\}, \quad (9)$$

式中: σ_b 为材料标准抗拉强度下限值; σ_s 为材料标准常温屈服点; n_b 为抗拉强度的安全系数; n_s 为屈服点的安全系数;规定 $n_b=4.0$ MPa, $n_s=2.5$ MPa。

2) 承受外压力时,接地壳体厚度 S_o 应满足^[11-12]:

$$S_o = D^3 \sqrt{\frac{P_a}{2.2E}}, \quad (10)$$

式中: P_a 为临界外压力; E 为使用材料的弹性模量,对于不锈钢,取为 172~200 GPa。

在连续 PD 试验中的热效应会使装置中气压升高。加上长期的实验, SF₆ 气体分解物对不锈钢材料有一定程度的腐蚀。故对设计参数须考虑足够的裕度。由式(5)-(7)得到的理论计算值,在保证同时满足承受内外压力的条件下,再加上适当的强度裕度,本装置接地壳体厚度设计为 8 mm。

1.4.2 密封设计

接地壳体与支撑绝缘子均属于刚性材料,在连接面处会有缝隙,而使 SF₆ 出现渗漏。再加之 GIS 内部发生 PD 可使 SF₆ 气体产生分解产物,有的分解产物具有一定的腐蚀性。因此,密封选用耐腐蚀的石棉橡胶垫片。考虑其预紧密封比压^[13] y 值为 26~35 MPa,垫片的厚度设计为 2.5 mm、宽度设计为 15 mm。

1.4.3 端盖设计

在 GIS 模拟装置的 3 个端口处采用圆形端盖封口,材料选用透紫外线的高强度石英玻璃,其厚度计算公式^[14]为:

$$\delta = D_c \sqrt{(0.31 + 1.91 \frac{W_p h_G}{q D_c^3}) \frac{q}{[\sigma]}}, \quad (11)$$

式中: D_c 为垫片平均直径; W_p 为螺栓载荷; h_G 为螺栓孔到垫片平均直径的距离; q 为内压。同接地壳体厚度选择原则相同,在理论计算的基础上,再适当考虑一定的裕度。端盖厚度选择为 20 mm。

2 GIS 试验研究平台

构建的 GIS PD 实验室研究平台主要由无晕交流试验电源、可变结构的 GIS 模拟装置和 PD 信号检测系统组成,其实验接线如图 4 所示。实验中,根据试验研究需要,变换 GIS 模拟装置结构,将研制的各种绝缘缺陷物理模型放入装置中,用真空泵对 GIS 模拟元件抽真空,并静置 10~12 h 后,通过观察真空压力表及进气阀数值检查 GIS 模拟元件密封性能良好。最后通过真空压力表及进气阀对 GIS 模拟元件充入 SF₆ 气体,直至气压达到实验所需气压为止,再静置 10~12 h,通过观察真空压力表及进气阀数值检查 GIS 模拟元件密封性能良好,确定密封性完好之后,便可进行试验研究。

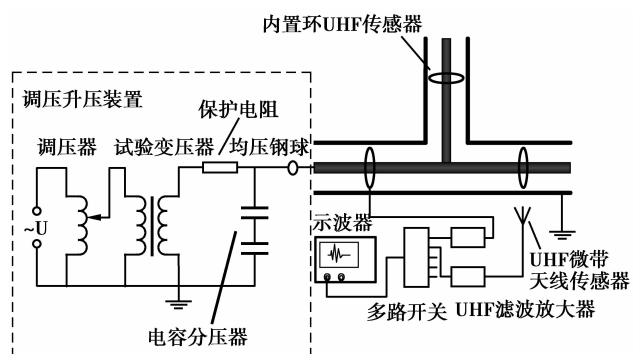


图 4 GIS PD 试验平台

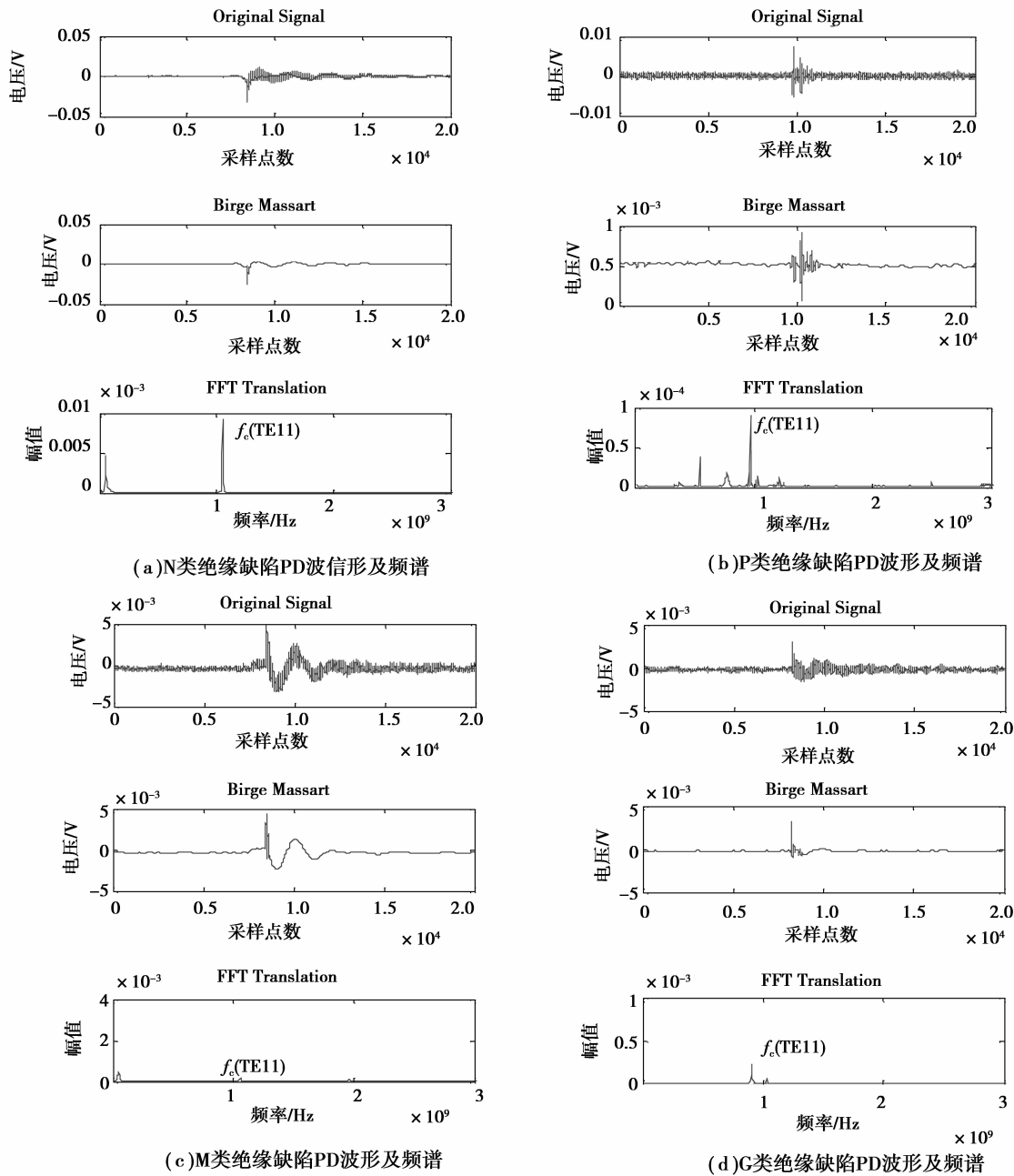


图 5 4种绝缘缺陷实测典型 PD UHF 信号及其频谱

2.1 信号传感与采集

传感器是 GIS PD 试验中信号检测系统的基础,其性能好坏直接影响获取试验数据的准确性。笔者采用研制的高性能内置环 UHF 传感器对 PD 信号进行检测。由于 GIS 腔体为全封闭金属外壳接地,外界电磁波很难进入腔体内部,因此腔体内几乎不受外界电磁环境的干扰,用研制的内置环传感器^[15]可直接接收 GIS 内 PD 辐射的电磁波,该传感器的方波响应为 1.8 ns,能够检测感应 mV 级 PD 电压信号。PD 信号采集用研制的模拟带宽 1 GHz、采样率为 20 GS/s、存储深度 2×48 MB 的高速数字系统。

2.2 人工绝缘缺陷模型

为了模拟 GIS 内常见绝缘缺陷产生的 PD,采用文献[16]成功设计的 4 种典型绝缘缺陷物理模型,即金属突出物(Needle,简称 N 类)缺陷、自由金属微粒(Particle,简称 P 类)缺陷、绝缘子表面污染(Metal,简称 M 类)缺陷和绝缘气隙(Gap,简称 G 类)缺陷。在进行单一绝缘缺陷试验研究时,分别将其放入 GIS 模拟装置;在进行组合绝缘缺陷试验研究时,可将 4 种单一绝缘缺陷进行不同的组合后,置于 GIS 模拟实验装置内。

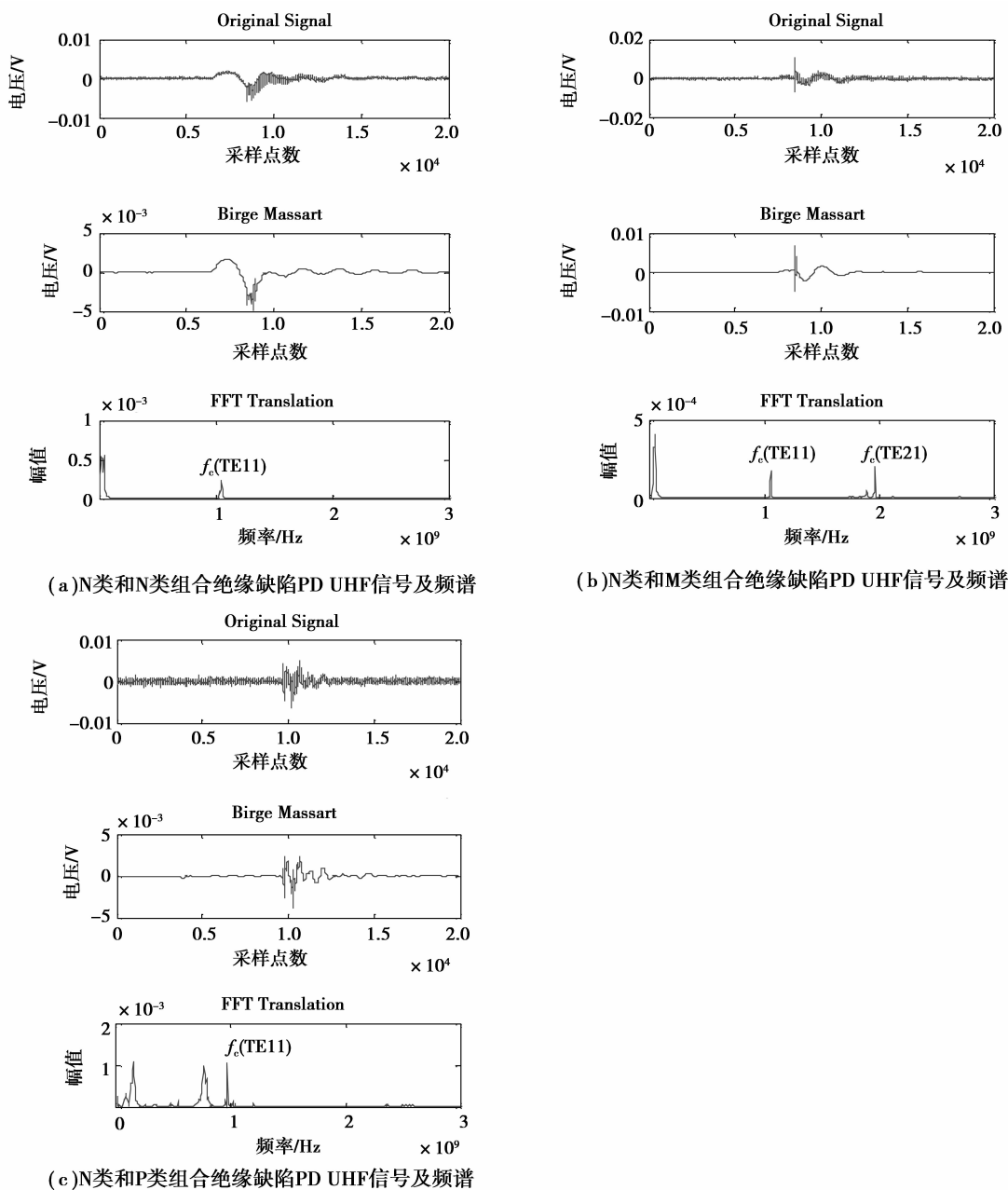


图 6 组合绝缘缺陷产生的 PD UHF 信号

3 PD 模拟试验

3.1 单一绝缘缺陷的 PD 试验

为检验本装置是否能够可靠进行 PD 模拟试验,并能获得 PD 产生的超高频信号,首先进行单一缺陷下的模拟试验,对获得的 PD 信号波形进行频谱分析,图 5 为获得的 4 种单一缺陷产生的 PD 信号波形和频谱。可以看出,单一绝缘缺陷模型能产生稳定的 PD,并能激发出不同频段超高频成分的电磁波,且放电波形有明显的差异,这对后续的缺陷类型辨识奠定了试验基础。

3.2 组合绝缘缺陷的 PD 试验

由于真实 GIS 设备内部可能同时存在多绝缘缺陷产生的 PD 情况,而现有的模拟实验装置大都只能做单一 PD 试验。本实验装置可以方便地将不同绝缘缺陷物理模型放入 GIS 装置中,以模拟多绝缘缺陷下产生的混合 PD。

图 6 是利用本装置获得的组合绝缘缺陷产生的混合 PD 波形及其频谱,可以看出,混合 PD 波形频谱同样包含具有超高频成分的 TE 波和 TM 波;同时,由于绝缘缺陷位置的不同,产生的每一个单一绝缘缺陷产生的 PD 放电信号到达传感器存在时间

差,说明混合 PD 信号具有叠加性,频谱和总能量分部与单一缺陷产生的 PD 信号有一定差异,这为深入地研究多绝缘缺陷共同产生 PD 的混合特性、信号分离和绝缘缺陷辨识等提供了试验手段和基础数据。

4 结 论

1)在分析现有直线型 GIS 模拟实验装置不足的基础上,成功研制了一套能够模拟 T 型、L 型和直线型可变结构的 GIS 模拟实验装置,通过超高频电磁波传播特性和材料应力分析,给出了该装置的结构尺寸和参数选择,搭建出了模拟 GIS 局部放电的试验研究平台。

2)将构建的 4 种常见绝缘缺陷物理模型以单一和组合的形式分别置于该模拟实验装置中,进行不同绝缘缺陷下产生 PD 的试验,通过该实验装置的信号采集系统,可获取不同绝缘缺陷下产生局部放电的超高频信号。

3)从获取的不同 PD 信号分析表明,各种单一和多绝缘缺陷产生的 PD 均可激发含有超高频成分的 TE 波和 TM 波,且具有各自特点和差异,这为深入研究 GIS 不同绝缘下产生的局部放电电磁传播特性、产生条件、超高频检测方法以及绝缘缺陷辨识等提供了试验保证。

参考文献:

- [1] GIGRE JOINT WORKING GROUP 33/23. 12. Insulation co-ordination of GIS;return of experience, on site tests and diagnostic techniques[J]. Electra, 1998 (176):67-97.
- [2] YOSHIMURA M, MUTO H, NISHIDA C, et al. Propagation properties of electromagnetic wave through T-branch in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2):328-333.
- [3] OKABE S, YUASA S, KANEKO S, et al. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4):855-861.
- [4] 刘君华,郭灿新,姚明,等.局部放电电磁波在 GIS 中传播路径的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(5):1044-1048.
LIU JUN-HUA, GUO CAN-XIN, YAO MING, et al. Analysis on the propagation routes of electromagnetic waves of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5):1044-1048.
- [5] 李军浩,司文荣,杨景,等.直线及 L 型 GIS 模型电磁波传播特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10):1280-1284.
LI JUN-HAO, SI WEN-RONG, YANG JING, et al. Electromagnetic wave propagation characteristics in straight and L-Type gas insulation switchgear [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10):1280-1284.
- [6] HOSHINO T, MARUYAMA S, SAKAKIBARA T, et al. Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in GIS using FDTD [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):153-159.
- [7] KANEKO S, OKABE S, YOSHIMURA M, et al. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in actual GIS structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5):1329-1339.
- [8] OKABE S, KANEKO S. Electromagnetic wave propagation in a coaxial pipe GIS model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5):1161-1169.
- [9] OKADA F. Microwave engineering [M]. Tokyo: Gakken-sha Co., 1999.
- [10] CUI T, DU L, SUN C X. Detection of point-plane corona discharges using the solar blind photosensitive tube[C] // ICEMS 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, October 17-20, 2008: [2009-02-02]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4770803.
- [11] 丁伯民,蔡仁良.压力容器设计—原理及其工程应用[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [12] 黄家琥.压力容器材料实用手册—特种材料[M].北京:化学工业出版社,1983.
- [13] 《压力容器实用技术丛书》编写委员会.压力容器设计知识[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [14] 李建国.压力容器设计的力学基础及其标准应用[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [15] 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, TANG 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.
- [16] ZHOU Q, TANG J, XU Z R, et al. Study on partial discharge of metallic outshoot insulation defect in GIS [J]. Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005(2):654-657.