

doi:10.11835/j.jssn.1000-582X.2013.08.009

用于非接触式局部放电检测的盘锥天线的研制

姚陈果¹, 陈攀^{1,2}, 周电波¹, 幸琳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 400044;
2. 重庆市电力公司江北供电局, 重庆 400000)

摘要:为实现非接触检测一定范围内电气设备局部放电(PD),研究并设计了宽频带、高增益和水平面(H面)全向性的超高频(UHF)天线作为PD信号检测传感器。通过分析盘锥天线的辐射特性和特性阻抗,确定其设计为UHF信号接收天线具有优势,再通过仿真计算,对天线结构进行了优化,据此制作出离散化加工的盘锥天线,该天线频带为200 MHz~2 GHz以上,平均增益4 dB以上,达到设计要求,在对较远距离外模拟放电信号和变电站实际放电信号的接收试验中表现出良好的UHF信号接收能力。基于该天线可以开发出固定式或车载式PD监测系统,该系统可以监测整个变电站设备PD情况并且其工作不同设备发生接触。

关键词:非接触;检测;电气设备;局部放电;超高频;盘锥天线

中图分类号:TM835.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)08-053-08

Development of discone antenna for noncontact partial discharge detection

YAO Chenguo¹, CHEN Pan^{1,2}, ZHOU Dianbo¹, XING Lin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Jiangbei Power Supply Bureau, Chongqing 400000, China)

Abstract: To realize the noncontact detection of partial discharge of electrical equipment within some range, a wideband, good gain and horizontal plane omnidirectional ultra-high frequency antenna is researched, and it is used as detecting sensor of partial discharge(PD) signals. Characteristic radiation and characteristic impedance of discone antenna are analyzed, and it is found that it is dominant to design the discone antenna as UHF signal detecting antenna. Then the structure of the antenna is optimized via calculate simulation. The band of the discone antenna is from 200 MHz to above 2 GHz and its average gain is above 4 dB. It is made via discrete method according to the analysis and simulation result, satisfying the design demand. The discone antenna shows good performance to detect analog discharge signals and PD signals in substation from far away. Fixed and mounted PD monitoring system can be developed based on this antenna, and the system can monitor PD of electrical equipment within substation without contacting equipment.

Key words: noncontact; detecting; electrical equipment; partial discharge; ultra-high frequency; discone antenna

收稿日期:2013-02-09

基金项目:重庆市科技攻关计划(院士专项)(CSCT2010BC3003);国家重点实验室自主研究课题(2007DA10512709104);重庆市电力公司科学技术项目(2011 渝电科技 18#)

作者简介:姚陈果(1975-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备在线监测与故障诊断技术、生物医学的电工新技术及高压新技术研究,(Tel)13629769835;(E-mail)yaochenguo@cqu.edu.cn。

电气设备发生 PD 是其绝缘完整性退化的标志,同时 PD 的发生会造成设备老化、劣化甚至损毁,引发电力系统事故,因此对电气设备 PD 的监测和诊断对保障设备正常运行和电力系统安全具有重大意义^[1]。

国内外对监测电气设备 PD 的方法进行了大量研究,其中 UHF 法虽然提出的时间相对于其他方法较晚,但其具有灵敏度高、准确性好和抗干扰能力强的优点,从而得到广泛的研究和应用^[2-6]。目前该方法主要应用于电力变压器、气体绝缘组合开关设备(GIS)和高压电缆接头等重要电气设备的 PD 监测,具体方法是将 UHF 传感器安装于设备的内部或外表面接收 PD 信号从而进行放电检测和故障定位^[7]。国内外研制了套简单极子天线、双臂阿基米德平面螺旋天线和圆形加载单极子天线等用于电力变压器的 PD 监测,天线安装于变压器内部(一般通过油阀插入或在人孔、手孔处安装)^[8-12];而对 GIS 的 PD 监测,则是通过将内置天线安装于接地外壳上或将外置天线安装于盆式绝缘子连接处来实现,为此国内外专门研制了小环天线、微带天线和分形天线等^[13-16];目前 UHF 法应用于高压电缆接头 PD 监测还处于起步阶段,有研究将探针天线安装于便携式金属盒内,金属盒夹在电缆接头后方,既保证了传感器能检测到电缆接头处的 PD 信号又屏蔽了外部电磁干扰^[7]。UHF 法监测电气设备内部 PD 的研究和应用取得了一定成果,但目前该方法多用于监测单个设备,研制的 UHF 天线体积较小便于安装在设备内部或表面,但是其带宽和增益都较小,并且在监测过程中会同设备发生接触。

为保障变电站安全运行,有必要对变电站内所有高压设备的 PD 水平进行监测。然而目前研究的传感器只能对单个设备进行监测,而为相对次要、成本偏低的电气设备如绝缘子、电容器组等专门配备传感器来实现对变电站内所有电气设备 PD 水平的监测费用将十分高昂。为了解决这个问题,国外研制了一种双锥天线,将该天线组成的阵列安装于变电站主控室楼顶可以监测整个敞开式变电站设备 PD 情况,取得了一定效果^[17-18]。在前人工作的基础上,笔者研制了一种频带更宽、增益更大的 H 面全向天线用于非接触检测一定范围内电气设备 PD 发出的 UHF 信号,具有更好的灵敏度和更大的信号接收范围。基于该天线可以开发出监测变电站全站设备 PD 的系统,系统工作不会同设备发生接触,一方面提高了变电站的安全水平,另一方面可以降低设备故障检测的费用,具有较好的工程应用价值。

1 天线传感器的分析和选型

1.1 天线传感器的设计要求

要有效监测一定范围内电气设备 PD 情况,需要传感器能够接收到一定距离外因电气设备 PD 而辐射到空气中的 UHF 信号,所以必须确保天线传感器在设计上要满足以下条件

1)在 H 面具有全向性,从而保证在监测范围内有效接收来自各水平方向的 PD 信号;

2)具有合适的带宽,为尽可能多地提取放电信息要求天线工作频带至少覆盖 PD 电磁波信号能量最强频段 500 MHz~1.5 GHz;

3)具有一定的抗干扰性能,变电站内背景噪声频带一般在 200 MHz 以下,天线设计应避免上述干扰所在的频带;

4)具有较高的灵敏度,由于天线的灵敏度和其带宽成正比,因此天线工作频带应尽可能宽;

5)具有较高的增益,确保能检测到较远距离外微弱的 UHF 信号;

6)天线尺寸小、结构简单、重量轻、便于安装。

1.2 天线传感器的分析和选型

为实现上述设计要求,需要选择宽带天线进行分析和设计,双锥偶极子天线则是典型的宽带天线,比起宽度固定的振子,双锥结构具有固定角度从而半径平滑变化,可以得到比振子天线更大的带宽。将双锥天线的上锥由圆盘取代,得到盘锥天线。该天线盘地面连接同轴传输线内导体,锥台连接同轴传输线外导体,可以提供 H 面全向方向图以及上下限频率比超过 3:1 的宽带性能^[19]。

由互易定理可知,对天线接收特性和辐射特性的分析是等效的,因此笔者分析盘锥天线的辐射特性和特性阻抗。在球面坐标系 (r, θ, φ) 下,假设双锥天线两半导体均为无限锥形表面,在两导体缝隙处施加电压则电流从缝隙处沿导体表面流出,并且由此产生磁场。又假设其传输 TEM 波则电场垂直于磁场方向,在锥间区域满足公式(1)

$$J = 0; H = H_{\varphi} \hat{\phi}; H = H_{\varphi} \hat{\phi}. \quad (1)$$

由安培定律 $\nabla \times H = j\omega\epsilon E + J$ 可以将式(1)简化为式(2)

$$-\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \times H_{\varphi}) = j\omega\epsilon E_r = 0. \quad (2)$$

其中对 r 分量和对 θ 分量如式(3)所示

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_{\varphi}) = j\omega\epsilon E_{\theta}. \quad (3)$$

非对称双锥天线的上锥锥角变为 90° 就将其变

形为盘锥天线,在此基础上根据前人研究的非对称双锥天线辐射特性就可以推导出盘锥天线的辐射特性,式(4)、(5)表达了盘锥天线远场区电场和磁场分量

$$E_{\theta} = \frac{V_0 e^{-j\beta r}}{r \sin \theta \cdot \ln \cot\left(\frac{\theta_h}{2}\right)}, \quad (4)$$

$$H_{\varphi} = \frac{V_0 e^{-j\beta r}}{\eta r \sin \theta \cdot \ln \cot\left(\frac{\theta_h}{2}\right)}, \quad (5)$$

其中: V_0 是发射机供给盘锥天线的发射电压; θ_h 是盘锥天线锥角; $\beta=2\pi/\lambda$, $\eta=\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 。

而盘锥天线的特性阻抗也可以通过非对称双锥天线的特性阻抗进行推导,非对称双锥天线的终端电压和电流如式(6)、(7)所示

$$V(r) = \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} E_{\theta} r d\theta = V_0 e^{-j\beta r}, \quad (6)$$

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_{\varphi} r \sin \theta d\varphi = \frac{2\pi V_0 e^{-j\beta r}}{\eta \cdot \ln\left[\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\cot\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right]}, \quad (7)$$

其中: θ_1 为双锥天线的上锥锥角; θ_2 为双锥天线的下锥锥角。

则任意点 r 处的特性阻抗如式(8)所示

$$Z_0 = \frac{V(r)}{I(r)} = \frac{\eta}{2\pi} \ln\left[\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\cot\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right] = 60 \ln\left[\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\cot\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right], \quad (8)$$

盘锥天线是非对称双锥天线 $\theta_1=90^\circ$ 的情况,则盘锥天线阻抗特性如式(9)所示

$$Z_0 = 60 \ln \cot\left(\frac{\theta_h}{2}\right). \quad (9)$$

从上述对盘锥天线的分析来看,相比起双锥天线,盘锥天线盘地面下方的辐射特性和双锥天线下半部分一样,而输入阻抗是对称双锥天线输入阻抗的一半,因此盘锥天线可以在更小体积的基础上实现更优秀的宽带性能和更大的增益,另外盘锥天线作为单极子天线使用同轴电缆进行信号传输,有利于接收设备接收信号。因此本文选择盘锥天线作为非接触式 PD 检测天线进行分析设计。

2 盘锥天线的仿真设计和性能实测

2.1 UHF 接收天线评价指标

设计的盘锥天线需要关注的指标为带宽、增益和方向图。工程上最常用的单极子天线带宽是指

天线驻波比 < 2 的频带。驻波表示天线和馈线的阻抗匹配程度,体现天线中正向波和反向波的情况,因此天线的驻波比带宽即为天线的阻抗带宽。驻波比 VSWR 可以用公式(10)表示,其中 K 表示反射系数

$$\text{VSWR} = \frac{1+K}{1-K}. \quad (10)$$

天线增益指在输入功率相等的情况下,实际天线与理想的辐射单元在空间同一点处所产生的信号功率密度之比。对 PD 信号的检测而言,同等信号强度条件下天线增益越大检测的距离越远。全向直立天线的增益可以用公式(11)进行计算,其中 l 表示天线长度, λ 表示天线工作的中心波长

$$G = 10 \lg(2l/\lambda). \quad (11)$$

天线方向图包括 H 面方向图和垂直面(E 面)方向图,表示天线辐射特性随着空间方向坐标的变化关系, θ 为电场强度, φ 为磁场强度,其归一化幅度方向性函数如公式(12)所示

$$F(\theta, \varphi) = |E(\theta, \varphi)| / |E(\theta, \varphi)|_{\max}. \quad (12)$$

2.2 盘锥天线的仿真设计

盘锥天线从 1945 年首先提出起至今,经过大量理论计算和实验研究表明,天线锥角为 25° ,盘地面和锥台间连接轴高度同锥台上表面半径相等的情况下天线阻抗匹配最佳^[18]。大量使用经验还表明盘锥天线的高度和其增益成正相关,同时天线高度对其工作频带也有影响,一般而言天线高度的增加会使天线的频带向低频移动。盘锥天线目前在微波领域被大量应用,但是主要将其高度设计为 10 cm 以下应用于 3 GHz 以上频段,将盘锥天线高度增加至 30 cm,该尺寸的天线便于安装用于一定范围内电气设备 PD 检测,同时天线频带下移至 PD 信号所在的频带,增益也有所增加。

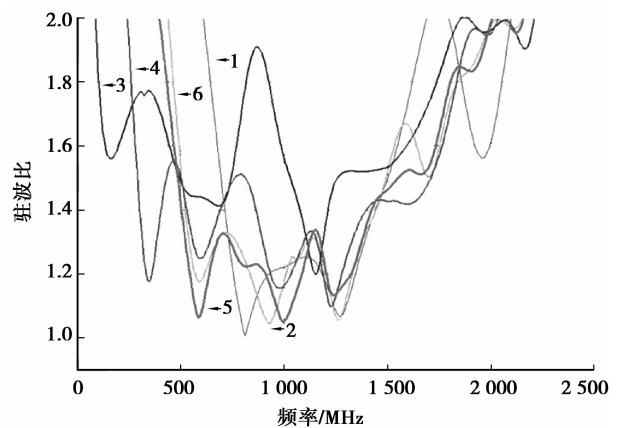


图 1 30 cm 高盘锥天线不同盘半径驻波比情况

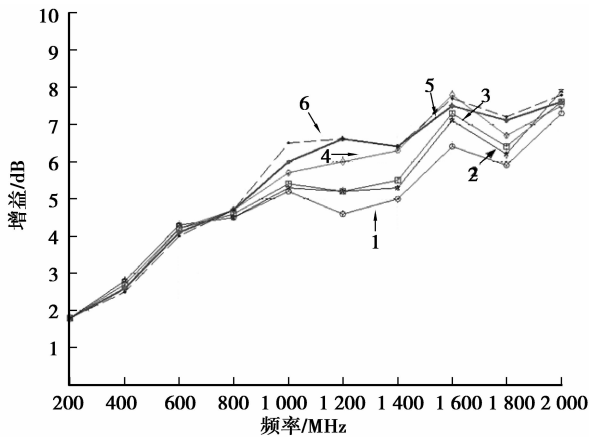


图 2 30 cm 高盘锥天线不同盘半径增益情况

研究用 Ansoft HFSS 软件对高 30 cm、锥角 25° 的盘锥天线的盘半径(分别选择 0.5、10、15、20、25、30 cm)进行优化,使其增益和频带达到 PD 检测的最优指标。如图 1 和图 2 所示,曲线 1、2、3、4、5、6 分别表示盘半径为 0.5、10、15、20、25、30 cm 的盘锥天线的阻抗带宽和增益情况。当盘半径为 10、20、25、30 cm 时天线阻抗带宽满足 PD 信号检测的要求,盘半径为 0.5 cm 的情况下天线下限频率超过 500 MHz,盘半径为 15 cm 的情况下天线下限频率低于 200 MHz 因而不符合设计要求。就增益而言,1 GHz 以下频段增益随盘半径的变动变化很小,而 1 GHz 以上频段盘半径 20、25、30 cm 的情况下增益要明显优于盘半径 0.5、10、15 cm 的情况。

考虑到设计为检测 PD 的传感器,选择锥角为 25° 、高度为 30 cm、盘半径为 20 cm 的盘锥天线进行加工设计,仿真结果显示其带宽为 0.24~2 GHz,在满足 PD 检测频带要求的前提下比其他盘半径情况具有更大带宽,平均增益达 5 dB 以上,同其他盘半径情况相比也比较理想。

2.3 盘锥天线的加工制作和性能测试

加工设计锥角 25° 、高度 30 cm、盘半径 20 cm 的盘锥天线。如图 3 所示该天线在加工上采用了离散化方式,每个面都用 12 根盘杆代替,在天线增益和带宽等性能不受影响的基础上既减轻了重量同时使得该天线各部分可拆卸,便于携带和安装。

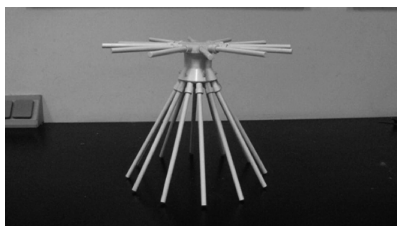


图 3 离散化加工的盘锥天线

天线加工完成后对其阻抗带宽、方向图和增益进行实测。如图 4 所示,由 AV3629 矢量网络分析仪测试得到盘锥天线阻抗带宽为 200 MHz~2 GHz 以上,同仿真结果吻合,完全满足设计的带宽要求。盘锥天线是 H 面全向天线,因此只考察其 E 面的方向图性能,如图 5 所示天线 E 面方向图最大增益方向在天线下方,适合接收从低处传来的信号。利用 AV1487B 信号源和 HP8592L 频谱分析仪测试得到天线在工作频带内平均增益大于 4 dB,对全向宽带天线而言该增益较为理想,但实测增益小于仿真结果,是加工和测试条件造成的误差。

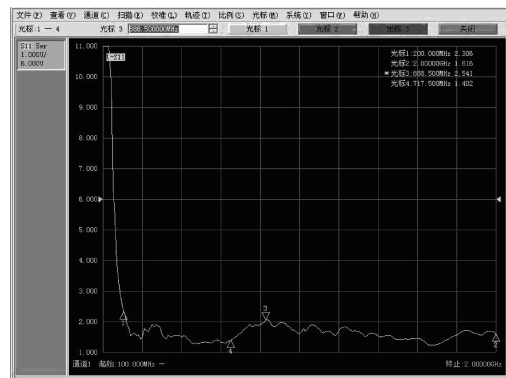
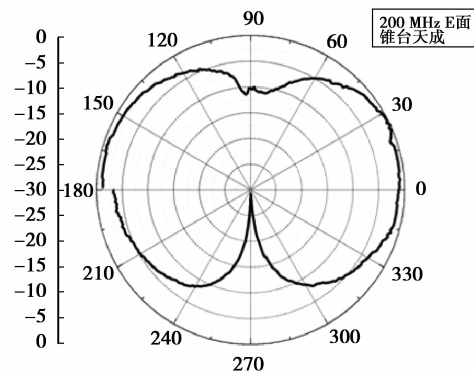
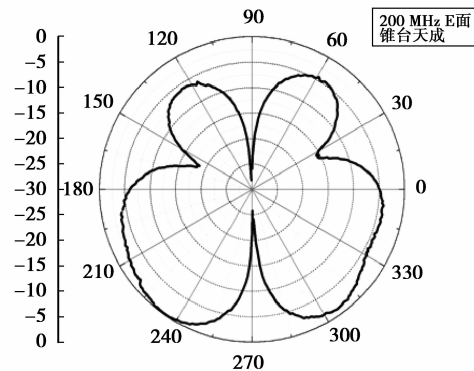


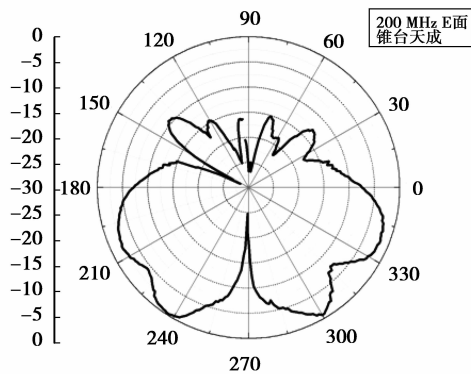
图 4 盘锥天线的实测驻波比图



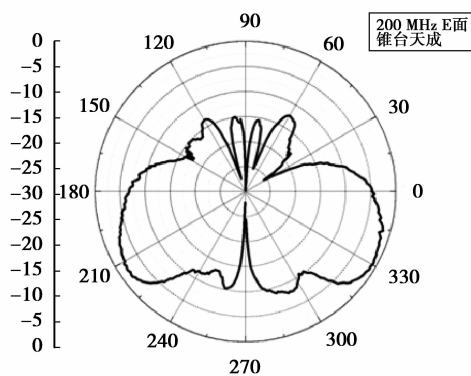
(a) 200 MHz 的 E 面方向图



(b) 600 MHz 的 E 面方向图



(c) 1 000 MHz的E面方向图



(d) 1 500 MHz的E面方向图

图 5 盘锥天线的实测 E 面方向图

3 盘锥天线的信号接收试验

3.1 模拟放电信号接收试验

为检验盘锥天线作为 PD 传感器的性能,对其进行 UHF 信号接收测试。实施方案是在固定位置放置盘锥天线,用已知放电量的放电源在一定距离外发射 UHF 信号,观察天线接收到的信号幅值的情况,按一定规律调整天线和放电源间的距离再重复测试,从而验证天线对 UHF 信号的接收能力并观察天线接收到的 UHF 信号幅值随距离增加的衰减情况。由于通过试验变压器对缺陷模型加压产生 UHF 信号的模拟放电源在实验室内,测试在室外进行故无法使用。选取压电点火器作为模拟放电源,压电点火器直接对电缆线芯进行放电可以激发出 UHF 电磁波,用 IEC 60270 方法对压电点火器放电量进行标定^[19],其放电量约为 10 000 pC(±10%误差)。

试验选择在空旷场地进行,测试地点实测背景噪声干扰非常小(不到 5 mV)。天线放置在约 7 m 高的房屋上,通过 8 m 长的信号电缆接到示波器。

信号发射点距离天线 10~80 m,每隔 10 m 发送信号 20 次,信号幅值的平均值则认为是天线在该距离上接收到的 10 000 pC 放电量的模拟放电源发射的 UHF 信号幅值。图 6 是 10~80 m 外天线接收到的来自压电点火器发射的 UHF 信号平均幅值情况,可以看出接收距离越远信号幅值越小,在距离 60 m 之后天线不能确保每次都可以接收到信号,尤其距离 80 m 外示波器只采集到约一半次数的信号。如图 7 所示,天线接收到 80 m 外压电点火器的 UHF 信号幅值平均为 24 mV,证明天线作为电气设备 PD 信号检测的传感器具有良好的接收性能。

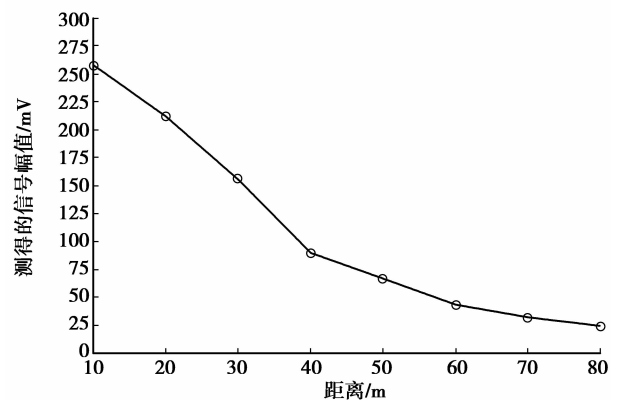


图 6 压电点火器 UHF 信号幅值和距离的关系

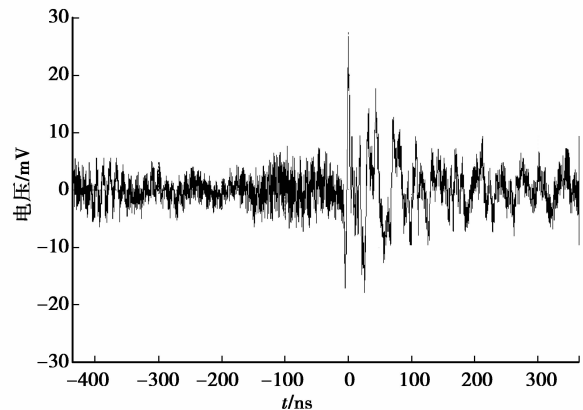


图 7 天线 80 m 外检测到的点火器 UHF 信号幅值

3.2 变电站放电信号实测及放电源定位

在某 220 kV 敞开式变电站用 4 个盘锥天线组成矩形阵列(如图 8 所示)进行 PD 信号接收和基于信号到达时间差算法的定位试验,每个天线均用 8 m 长的信号电缆连接到示波器,并用脉冲注入法对系统时延误差进行标定以确保后面时间差求取的准确性。如图 9 所示,该变电站靠近进门处为 220 kV 开关场,内部包括隔离开关(CB)、电流互感器(CT)和

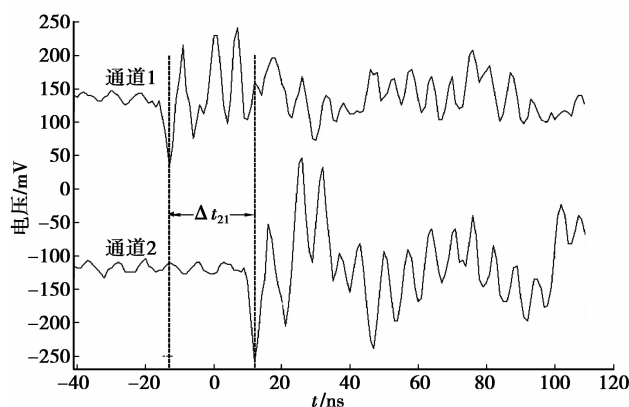


图 12 两天线信号时间差读取

从现场测量的结果看,天线成功检测到了水平距离 35 m 外的 PD 信号,证实其具有良好的远距离 UHF 信号接收能力,可以很好地用于监测一定范围内电气设备 PD 情况。

4 结 论

1)通过分析辐射特性和特性阻抗,确定了将盘锥天线设计为用于非接触检测一定范围内电气设备 PD 的 UHF 传感器并通过仿真优化确定其结构,加工出的天线带宽为 0.2~2 GHz 以上,平均增益达 4 dB 以上。

2)在接收模拟放电信号和变电站放电信号的试验中,盘锥天线接收到了来自 80 m 外的标定放电量为 10 000 pC 的放电信号(平均幅值达 24 mV),在变电站接收到了 35 m 外 CB 处发出的空气绝缘放电信号,证实了该天线具有良好的远距离 PD 信号接收能力。

3)未来将基于设计的盘锥天线开发出固定式或移动式变电站全站设备 PD 监测系统,系统工作时不同设备发生接触,通过更多现场实测开展基于 UHF 法的变电站设备 PD 水平监测及故障早期预警的研究。

参考文献:

- [1] 关根志,贺景亮. 电气设备的绝缘在线监测与故障维修[J]. 中国电力,2000,33(3):46-50.
Guan Genzhi, He Jingliang. On-line insulation monitoring techniques and condition based maintenance [J]. Electric Power,2000,33(3):46-50.
- [2] 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.
- [3] 钱勇,黄成军,江秀臣,等. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术,2005,29

(1):40-43,55.

Qian Yong, Huang Chengjun, Jiang Xiuchen, et al. Presentsituation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear [J]. Power System Technology,2005,29(1):40-43,55.

- [4] Hampton B F, Meats R J. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations [J]. IEEE Proceedings,1998,135(2):137-144.
- [5] Judd M D, Li Y, Hunter B B. Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors PartI: Sensors and Signal Interpretation [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2005,21(2):5-14.
- [6] Takao K, Toshihiro H, Shigeo F J, et al. Location of partial discharge in air by detecting phase difference of electromagnetic waves [J]. ElectricalEngineering in Japan,2008,163(3):627-634.
- [7] Tenbohlen S, Denissov D, Hoek S M. Partial Discharge measurement in the ultra high frequency(UHF) range [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(6):1544-1552.
- [8] Judd M D, Cleary G F, Bennoch C J. Applying UHF partial discharge detection to power transformers[J]. IEEE Power Eng. Rev. ,2002,22(8):57 - 59.
- [9] Tang Z G, L IC R, Cheng X, et al. Partial discharge location in power transformers using wideband RF detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,13(6):1193-1199.
- [10] Judd M D, Farish O, Pearson J S, et al. Power transformer monitoring using UHF sensors: installation and testing[C]. 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, USA, 2000: 373-376.
- [11] 孟延辉. 变压器局部放电检测与套简单极子天线的研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [12] Judd M D, Farish O, Hampton B F. The exciting of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996,3(2):213-228.
- [13] 唐炬,魏刚,侍海军,等. 气体绝缘组合电器局部放电的超高频检测[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2004,27(4):1-5.
Tang Ju, Wei Gang, Shi Haijun, et al. Analysis of UHF method used in partial discharge detection in GIS[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition,2004,27(4):1-5.
- [14] 李立学,滕乐天,黄成军,等. GIS 局部放电超高频信号的包络分析与缺陷识别[J]. 高电压技术,2009,35(2): 260-265.

- Li lixue, Teng Letian, Huang Chengjun, et al. Envelope analysis and defects identification of partial discharge UHF signals in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 260-265.
- [15] 张晓星, 刘王挺, 杨孝华. 检测 GIS 局放的 Hilbert 分形天线及便携式监测系统 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 263-168.
Zhang Xiaoxing, Liu Wangting, Yang Xiaohua, et al. A Hilbert fractal antenna and portable monitoring system for partial discharge detection in gas insulated substations [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2009, 32(3): 263-268.
- [16] Philip J. Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (3): 2264-2272.
- [17] Iliana E. RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 20-29.
- [18] Warren L. Stutzman, Gary A Thiele. Antenna Theory and Design [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [19] IEC60270, Ed. 3. 0, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements [S], 2001.

(编辑 侯 湘)

(上接第 52 页)

- [12] 胡振涛, 潘泉, 杨峰, 等. 基于多模型粒子滤波的机动多目标跟踪算法 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(4): 136-141.
HU Zhentao, PAN Quan, YANG Feng, et al. Maneuvering multiple target tracking algorithm based on multiple model particle filter [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(4): 136-141.
- [13] 胡士强, 敬忠良. 粒子滤波原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 唐志远, 阮艳莉. 锂离子电池容量衰减机理的研究进展 [J]. 化学进展, 2005, 17(1): 1-7.
TANG Zhiyuan, RUAN Yanli. Progress in capacity fade mechanism of Lithium ion battery [J]. Progress in Chemistry, 2005, 17(1): 1-7.
- [15] 李伟善, 邱仕洲. 锂离子电池容量衰减的原因分析 [J]. 电池工业, 2001, 6(1): 21-24.
LI Weishan, QIU Shizhou. Causes for capacity decrease in Li ion batteries [J]. Chinese Battery Industry, 2001, 6(1): 21-24.
- [16] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian bayesian state estimation [J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1993, 140(2): 107-113.
- [17] Carpenter J, Clifford P, Fearnhead P. Improved particle filter for nonlinear problems [J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 1999, 146(1): 2-7.
- [18] Saha B, Goebel K. Uncertainty management for diagnostics and prognostics of batteries using Bayesian techniques [C] // Proceedings of the 2008 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2008, Big Sky, MT. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-8.

(编辑 詹燕平)