

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.014

亚纳秒脉冲用于智能 GIS 局放 IED 性能试验的可行性研究

苏春强, 李 强, 王春杰, 黄东飞, 孙 浩, 张春民, 贾 涛
(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关(GIS)以其占地面积小、可靠性高而在电力系统中得到了广泛的应用,但 GIS 长期运行过程中不可避免的会产生各种各样的内部绝缘缺陷,并伴随产生局部放电现象,甚至会引起系统故障,因此为保障系统可靠运行,对 GIS 进行局部放电在线监测具有重要意义。局部放电检测具有电学、声学、化学和光学等多种检测方法,其中电学测量手段主要有脉冲电流法和特高频检测法(ultra-high frequency, UHF)。UHF 法测量局部放电辐射出来的电磁波的电场强度,而脉冲电流法测量局部放电引起的视在电荷。UHF 法相较于脉冲电流法可提取信号中的特高频成分,具有灵敏度高,可带电监测,智能 GIS 局放 IED(智能电子设备)采用 UHF + IED 的局放监测方法。文中研究了采用上升沿时间为 253.75 ps、半高宽约为 1.15 ns、最大峰值电压为 532 V(0 dB)的亚纳秒脉冲进行智能 GIS 进行局放 IED 性能试验的可行性,结果表明:UHF 传感器输出信号稳定;局放 IED 测量结果与亚纳秒脉冲峰值成正相关关系而非线性关系;当亚纳秒脉冲为 30~50 dB 时,IED 测量结果分散性较大;因此亚纳秒脉冲信号可用于进行智能 GIS 局放 IED 性能试验。

关键词: 亚纳秒脉冲; 智能 GIS; 局部放电; 局放 IED; UHF

Feasibility Study on Partial Discharge IED Performance Test of Intelligent GIS with Sub-nanosecond Pulse

SU Chunqiang, LI Qiang, WANG Chunjie, HUANG Dongfei, SUN Hao, ZHANG Chunmin, JIA Tao
(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Gas-insulated metal-enclosed switches (GIS) have been widely used in power system due to their small floor area and high reliability. However, in the long-term operation of GIS, various internal insulation defects are inevitably generated and partial discharge phenomenon may occur concomitantly, which may even cause system failure. Therefore, in order to ensure the reliable operation of the system, it is of great significance to perform partial discharge on-line monitoring of GIS. Partial discharge detection has various detection methods such as electrical, acoustical, chemical and optical. Among them, electrical measurement methods mainly include pulse current method and ultra-high frequency (UHF) method. UHF method measures the electric field strength of electromagnetic waves emitted by partial discharge, while the pulse current method measures the apparent charge caused by partial discharge. The UHF method can extract the UHF components in the signal compared with the pulse current method, which has high sensitivity and can be monitored on-line. The intelligent GIS PD IED (intelligent electronic device) adopts the UHF + IED partial discharge monitoring method. In this paper, the feasibility is studied that the sub-nanosecond pulse with a rising edge time of 253.75 ps, the FWHM is about 1.15 ns and a maximum peak voltage of 532 V(0 dB) is used to test the IED performance of the intelligent GIS. The results show that the output signal of UHF sensor is steady, IED displays positively correlation with the peak value of the sub-nanosecond pulse rather than a linear relationship, when the sub-nanosecond pulse is 30 ~ 50 dB, the results of IED are highly dispersed, so the sub-nanosecond pulse can be used to test the partial discharge IED performance test of intelligent GIS.

Key words: sub-nanosecond pulse; intelligent GIS; partial discharge; PD IED; UHF

收稿日期:2019-06-07; 修回日期:2019-08-15

0 引言

气体绝缘金属封闭开关(GIS)以其占地面积小、可靠性高而在电力系统中得到了广泛的应用^[1],但GIS长期运行过程中不可避免的会产生各种各样的诸如:自由金属微粒、金属突出物、悬浮电位或气隙缺陷等内部绝缘缺陷,并伴随产生局部放电现象,甚至会引起系统故障,因此为保障系统可靠运行,对GIS进行局部放电在线检测具有重要意义。

目前,GIS的局部放电检测方法很多,有电学、声学、化学和光学等方法^[2],其中电学测量手段主要有脉冲电流法和特高频检测法(ultra-high frequency,UHF)。UHF法测量局部放电辐射出来的电磁波的电场强度,而脉冲电流法测量局部放电引起的视在电荷。脉冲电流法具有很多优点,但需要耦合电容器等设备,通常被用于实验室检测局部放电;UHF法相较于脉冲电流法可提取信号中的特高频成分,具有灵敏度高,可带电监测且各种缺陷类型均适用等优势,智能GIS局放IED(智能电子设备)采用UHF法+IED的局放监测方法。

但UHF法在实际使用中也存在诸多问题:①频繁产生误报,导致运行人员无所适从,最终只能停止UHF局放测量系统的运行;②近年来电力系统发生多起GIS故障,给电力系统造成很大的损失,但安装的UHF传感器没有报警,令人怀疑采用UHF法检测局放的有效性;③UHF法对检测设备的技术性能要求较高,但市售的UHF法检测设备的性能各异,质量参差不齐。因此,电力系统用户对于UHF法+IED的局放监测系统的性能检验提出了要求。

对局部放电检测装置开展性能校验,包括实验室校验和现场校验。Judd M.D.等最早提出了横向电磁波小室测量UHF传感器有效高度的方法,初步证明了利用TEM小室开展UHF局放传感器性能检验的可行性。经过多位学者的努力,TEM小室被扩展到GHz频率段,成为UHF局放传感器重要的性能检测手段,TEM和GTEM小室的注入脉冲源采用雪崩管产生。现场校验不能在TEM小室或者GTEM小室上进行,而只能在真实GIS设备上开展,而且事情发生的场景,可能是GIS在正常工作,也可能是正在开展耐压试验工作,也就是说GIS的高压导体处于高压状态。CIGRE提出了一种UHF传感器现场校验方法,通过利用一个UHF传感器注入信号进行局放信号的等效,利用另一个UHF传感器进行局部放电检测。在现场不具备注入信号所需的UHF传感器时,可以利用外部脉冲注入方法,但需要提高

脉冲信号的幅值。李兴旺等人提出了在外部通过金属法兰孔注入局放信号的方法,其信号源上升时间小于1 ns(约340 ps),测试结果表明,基于等效场强注入方式的特高频传感器灵敏度现场检验方法可行,能找到与某放电量等效的注入电压,且局放信号的频谱与注入信号频谱相似,指出运行状态脉冲源应注入4 V,热备用状态应注入7 V^[3-16]。

局放信号的幅值等特征及IED的正常显示均对局放类型判断具有重要意义,目前的UHF传感器性能检验方法主要侧重UHF传感器性能的校验,而对于UHF检测系统的后续部分及IED的检验开展较少且没有统一方法。

因此,需要对局放IED的性能检测方法的开展更为深入的研究。

1 亚纳秒脉冲源

GIS内部发生局部放电将会产生很陡的脉冲电流,并向四周辐射特高频(300 MHz~3 GHz)的电磁波,UHF传感器通过对此类电磁波的测量,达到定位局部放电的目的。因此进行局放IED性能试验,首先需要研制一种亚纳秒脉冲源模拟特高频信号。

基于雪崩三极管的Marx电路脉冲源具有前沿短、波形抖动小、脉宽窄、可靠性高且结构紧凑等优点^[17],文中基于此研发了一款高稳定度全固态亚纳秒脉冲源,采用多只雪崩三极管构成Marx电路结构,每级仅一只雪崩管。10级负极性雪崩三级管Marx电路原理图见图1。图1中 U_{cc} 作为直流偏置电压通过充电隔离电阻 $R_{C1} \sim R_{C10}$ (均为20 k Ω)和 $R_{C1}' \sim R_{C10}'$ (均为20 k Ω)为主电容 $C_1 \sim C_{10}$ (均为60 pF)并联充电,其中充电电压为300 V,以满足雪崩三极管进入雪崩区的电压要求,此时 $T_1 \sim T_{10}$ 处于临界雪崩状态。通过触发回路向 T_1 基级注入触发信号后,将首先引起 T_1 管雪崩击穿, C_1 左端接地, C_1 右端瞬时变为 $-U_{cc}$, T_2 管集射级将被施加约为2倍的过电压,远超于其击穿电压,同时在快前沿作用下导通。以此类推, $T_2 \sim T_{10}$ 将相继引发雪崩,引起串联放电,在理想状态下,将在 C_{10} 右端得到幅值为 $-10U_{cc}$ 的高压脉冲,实际上输出脉冲幅值将远低于此值,有两方面原因:一是雪崩管导通时间非常短,脉冲幅值无法在开关响应时间内达到最大值;二是由于雪崩管在导通后存在一定的导通电阻,且放电回路中存在一定的寄生电阻和电容,将会与负载电阻进行分压,使输出脉冲幅值远小于理想状态,其放电等效回路见图2,亚纳秒脉冲源实物见图3。

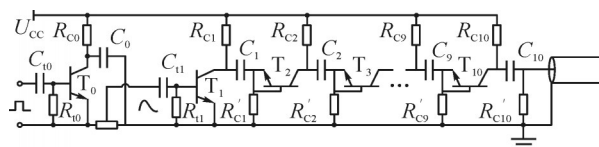


图1 雪崩管 Marx 电路图

Fig. 1 Avalanche transistor Marx circuit diagram

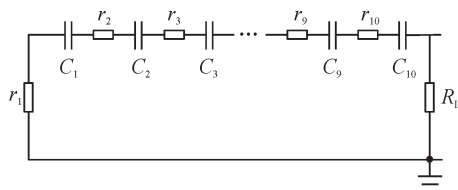


图2 雪崩管 Marx 放电等效回路

Fig. 2 Avalanche transistor Marx discharge equivalent

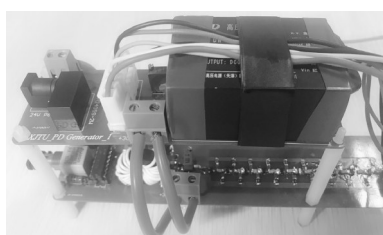


图3 亚纳秒脉冲源

Fig. 3 Sub-nanosecond pulse source

文中采用 Tektronix DPO 7254C 示波器(带宽 2.5 GHz, 采样率 40 GS/s)对亚纳秒脉冲源输出波形测量, 为亚纳秒脉冲源输出波形见图4, 亚纳秒脉冲源输出波形频谱图见图5。

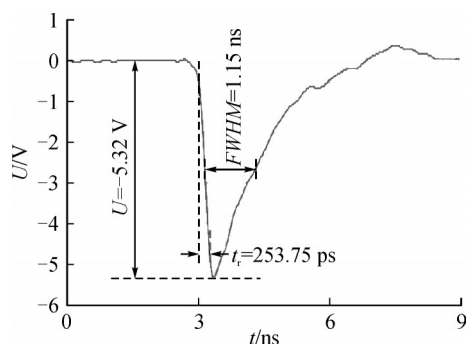


图4 亚纳秒脉冲源输出波形

Fig. 4 Sub-nanosecond pulse source output waveform

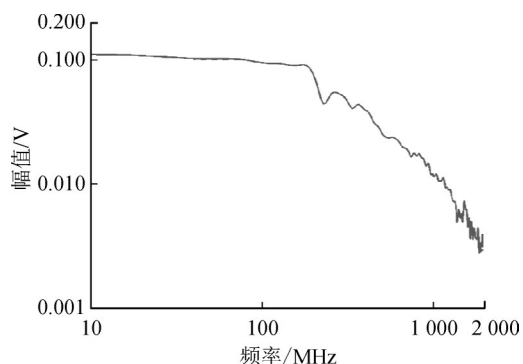


图5 亚纳秒脉冲源输出波形频谱图

Fig. 5 Spectrogram of sub-nanosecond pulse source output waveform

从图4中可以看出, 该脉冲源可输出上升沿时间(10%~90%)约为 253.75 ps、半高宽约为 1.15 ns、脉冲峰值约为 532 V 的脉冲电压(图4为衰减 100 倍后波形)。图5显示输出信号频域可覆盖 10 MHz~2 GHz 的宽频带范围, 在 200~1 500 MHz 范围内可激励出较强的电磁波信号, 符合对 UHF 局放检测系统进行校核所需频带的需求。

为测试亚纳秒脉冲源输出波形稳定性, 随机采集 10 次输出波形, 并对其进行波形叠加分析, 见图6。

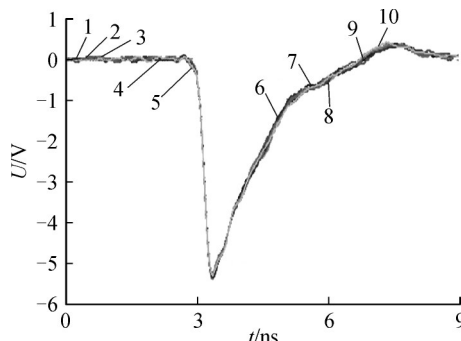


图6 亚纳秒脉冲源 10 次输出波形

Fig. 6 10 output waveforms generated by sub-nanosecond pulse source

从图6可以看出, 脉冲输出均具有良好的稳定性, 10 次波形叠加基本重合, 对 10 次输出波形的峰值、上升沿时间及半高宽进行统计并利用变异系数 α 对波形稳定性进行评估, 数据结果见表1。表1中: 峰值平均值为 532 V; 上升沿时间平均值为 261.38 ps; 半高宽平均值为 1.16 ns; 峰值抖动为 6 V; 上升沿时间抖动为 5.57 ps; 半高宽抖动为 0.03 ns; 峰值变异系数为 1.08%、上升沿时间变异系数为 2.13%; 半高宽变异系数为 2.71%。计算公式为

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \quad \text{。其中 } n \text{ 为采样次数, } x_i \text{ 为峰值、上升沿时间及半高宽的第 } i \text{ 次采样值。}$$

从表1可以看出, 脉冲幅值变异系数为 1.08%, 上升沿时间变异系数为 2.13%, 半高宽变异系数为 2.71%, 输出波形稳定度高。对上述 10 次输出波形分别进行 FFT 处理, 并将 10 次频谱进行叠加, 得到图7。

从图7 亚纳秒脉冲源 10 次输出波形频谱叠加可以看出, 10 次输出波形频谱基本重合, 一致性较高, 仅在高于 1 GHz 范围内有较小差异, 但均处于较小的动态变化范围。

亚纳秒脉冲源在输出不同峰值电压的脉冲波形见图8。由于文中采用的局放 IED 显示局放信号单位为 dBm, 因此对输出信号同样采用衰减倍数 dB

表1 亚纳秒脉冲源10次输出波形参数

Table 1 Parameters of 10 output waveforms generated by sub-nanosecond pulse source

编号	峰值/V	上升沿时间/ps	半高宽/ns
1	532	262.00	1.15
2	529	260.75	1.17
3	540	258.00	1.09
4	524	255.00	1.19
5	540	274.50	1.18
6	533	261.50	1.15
7	532	259.75	1.15
8	529	262.00	1.21
9	536	265.00	1.17
10	524	255.25	1.17

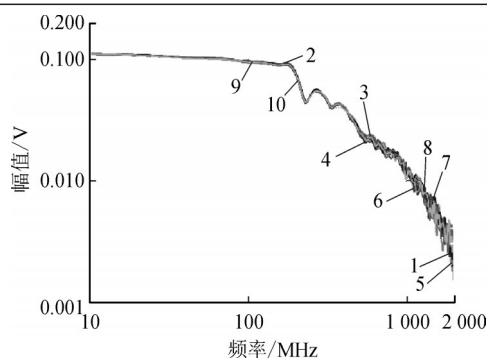


图7 亚纳秒脉冲源10次输出波形频谱

Fig. 7 Spectrograms of 10 output waveforms generated by sub-nanosecond pulse source

(基准值为532 V)进行表述。

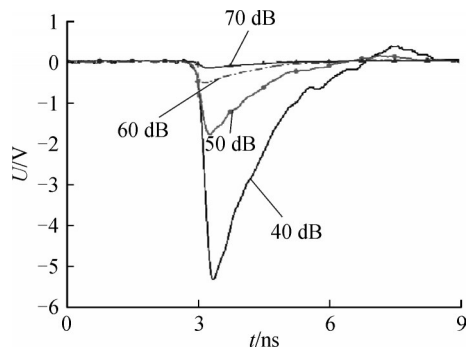


图8 不同峰值电压脉冲波形

Fig. 8 Pulse waveforms with different peak voltage

从图8中波形可以看出,不同峰值脉冲波形上上升时间、半高宽及波形均相同,同时对其进行FFT处理,得到不同峰值脉冲波形的频谱图,见图9。

从图9可以看出,不同峰值电压波形的频谱形状、频带宽度及相对幅值基本一致。为确定输出波形稳定性,对不同峰值的输出波形分别采集10次波形,得出不同输出波形的峰值、上升沿时间及半高宽见图10。

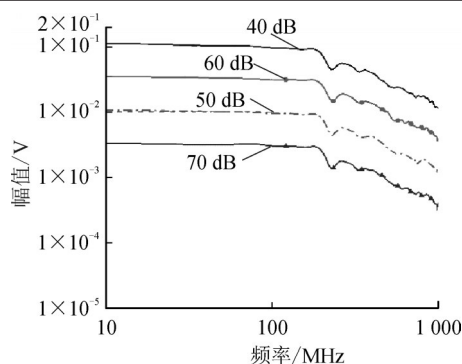


图9 不同峰值电压脉冲波形频谱

Fig. 9 Spectrograms of pulse waveforms with different peak voltage

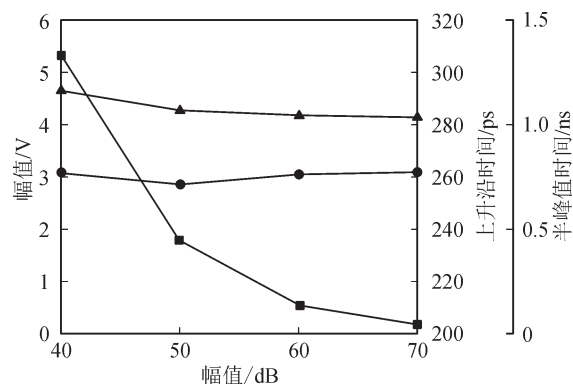


图10 不同输出波形峰值、上升沿时间及半高宽

Fig. 10 Pulse waveforms with different peak voltage, rising edge time and FWHM

从图10可以看出,不同输出波形峰值、上升沿时间及半高宽稳定性较高。经计算,脉冲幅值变异系数<1.3%,上升沿时间变异系数<2.2%,半高宽变异系数<2.8%,因此亚纳秒脉冲源能够稳定输出上升沿时间约为253.75 ps、半高宽约为1.15 ns、幅值可调的亚纳秒脉冲信号。

2 UHF传感器输出性能

UHF传感器信号采集准确度对局放类型判断具有重要意义,采用研制的亚纳秒脉冲源在性能校核平台对某厂家的UHF传感器输出波形进行研究见图11。

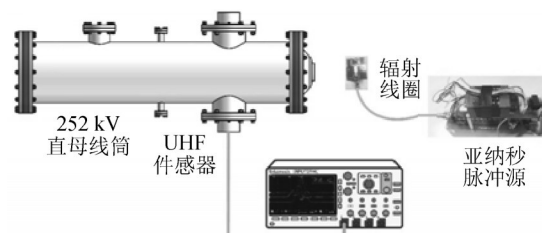


图11 UHF传感器性能校核平台

Fig. 11 UHF sensor performance check platform

UHF传感器安装于252 kV GIS母线筒上,采用辐射线圈对亚纳秒脉冲信号激发电磁波进行辐射,

该电磁波通过盆式绝缘子上的缝隙及小孔透入到母线筒内部,最终耦合至UHF传感器。采用Tektronix DPO 7254C示波器进行测量UHF传感器输出波形。

亚纳秒脉冲信号所激发的特高频电磁波通过UHF传感器输出后信号会进一步衰减,文中选择0、5、10、15、20、25、30 dB的亚纳秒脉冲信号进行试验,当亚纳秒脉冲峰值为0 dB时,UHF传感器10次随机信号见图12。

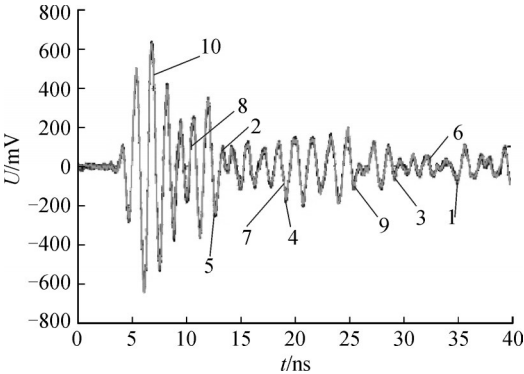


图12 0 dB下UHF传感器10次输出波形

Fig. 12 UHF sensor 10 output waveforms at 0 dB

从图12可以看出,UHF传感器10输出波形叠加基本重合,对10次输出波形的峰值进行统计,见表2。表2中:峰值的平均值为613.94 mV;抖动为19.96 mV;变异系数为3.25%。

表2 UHF传感器10输出波形峰值统计

Table 2 Peak value statistic of 10 output waveforms from

UHF sensor			
编号	峰值/mV	编号	峰值/mV
1	624.25	6	584.06
2	600.19	7	632.41
3	640.16	8	632.94
4	616.00	9	624.00
5	592.00	10	593.41

从表2可以看出,UHF传感器输出波形峰值基本稳定,抖动为19.96 mV,而变异系数为3.25%,具有较高稳定性。上述10次输出波形进行FFT处理后,得到其频谱见图13。

从图13可以看出,0 dB下UHF传感器10次输出波形的信号频谱分布可覆盖200 MHz~1.5 GHz,其主频带落在400~900 MHz内,且10次频谱基本重合,一致性较好。在200~400 MHz的低频段及900 MHz~1.5 GHz高频段内频谱存在一定差异,但由于其波动幅值范围较小,不会对检测结果产生明显影响。

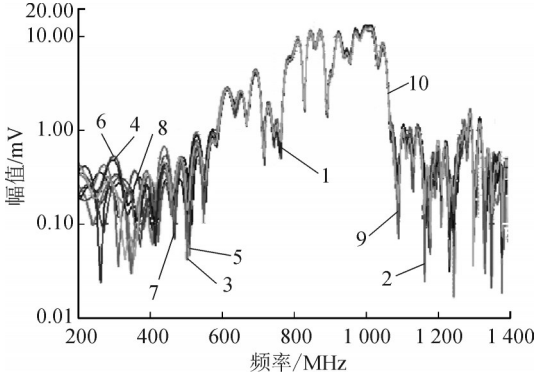


图13 0 dB下UHF传感器10次输出波形频谱

Fig. 13 Spectrograms of 10 output waveforms from UHF sensor

0、5、10、15、20、25、30 dB的亚纳秒脉冲信号下UHF输出波形见图14,相应频谱见图15。

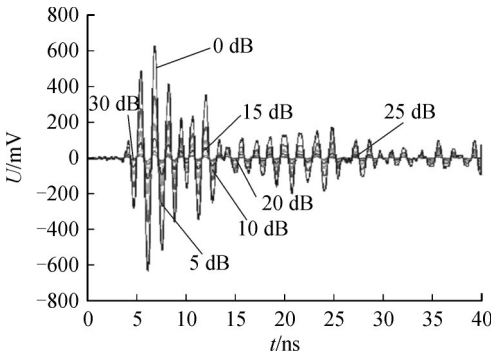


图14 不同亚纳秒脉冲峰值下UHF传感器输出波形

Fig. 14 Output waveforms from UHF sensor under different sub-nanosecond pulse peak values

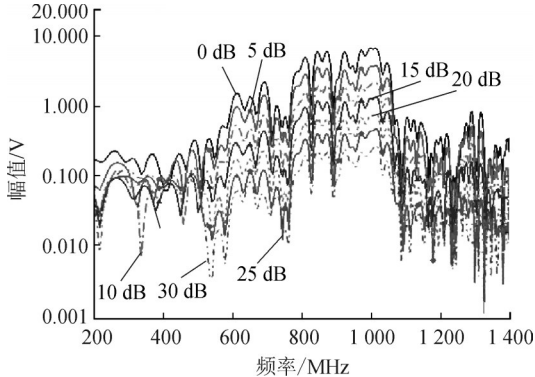


图15 不同亚纳秒脉冲峰值下UHF传感器输出波形频谱

Fig. 15 Spectrograms of output waveforms from UHF sensor under different sub-nanosecond pulse peak values

从图14、15可以看出,不同亚纳秒脉冲峰值下所激励的特高频电磁波经UHF传感器输出后的波形及频谱均基本一致,输出波形峰值、抖动及变异系数见表3。

从表3可以看出,不同亚纳秒脉冲峰值激励下的UHF传感器输出波形变异系数均小于3.3%,符合研究局放IED的要求。UHF传感器耦合特性线性度拟合曲线见图16。

表3 不同亚纳秒脉冲峰值下UHF传感器输出波形参数
Table 3 Parameters of 10 output waveforms from UHF sensor under different sub-nanosecond pulse peak values

亚纳秒脉冲峰值/ dB	峰值 平均 值/mV	峰值衰减 倍数/dB	抖动	变异系 数/%
0	613.4	55.75	19.96	3.25
5	348.92	50.85	4.90	1.40
10	192.28	45.68	5.35	2.78
15	111.87	40.97	1.24	1.11
20	63.26	36.02	1.11	1.76
25	35.65	31.04	0.99	2.77

从图16可以看出,传感器输出信号与注入脉冲幅值之间线性度较高,最大相对误差约为1.5%。经合理外推可知,当亚纳秒脉冲信号峰值衰减到0.168 V时,传感器输出信号幅值约为0.465 mV,输出幅值变动范围约为1 340倍,可基本覆盖UHF传感器所能检测的整体动态范围。

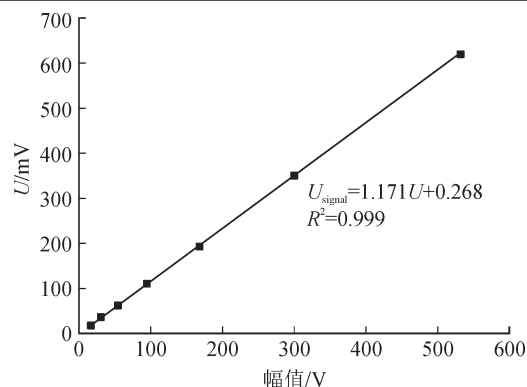


图16 线性度拟合曲线

Fig. 16 Linearity fitting curve

3 IED性能试验

IED对局放信号的正确显示有利于局放信号类型的判断,将前述传感器输出信号传输至IED,进行局放IED性能试验,该IED能够显示局放信号峰值、均值、PRPD及PRPS图谱,幅值(纵坐标)单位均为dBm。采用IED进行性能试验,亚纳秒脉冲幅值分别为15、20、25、30、35、40、45、50 dB时,IED测量显示PRPD图谱见图17,PRPS图谱见图18。

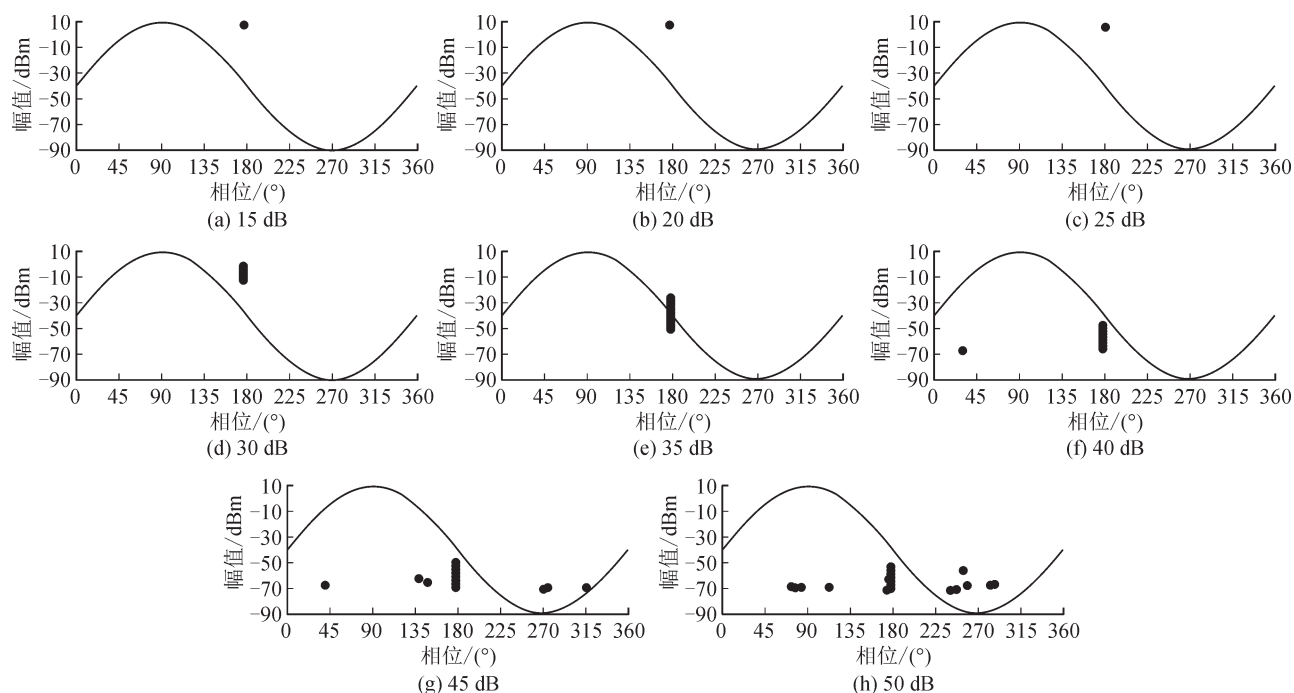


图17 不同亚纳秒脉冲下IED显示PRPD图谱

Fig. 17 PRPD displayed by IED under different sub-nanosecond pulse peak values

图17及图18所示为亚纳秒脉冲幅值从15 dB减小到50 dB时,IED测量局放水平与亚纳秒脉冲源激励电压之间存在相关性,但30~50 dB下的IED测量结果分散性较大,其中相位不在180°处的局放信号为干扰信号。不同峰值下的IED测量系统的峰值及均值图谱见图19。

从图19可以看出,IED测量峰值及均值均与亚纳秒脉冲幅值成正相关关系但非完全线性关系,同样在30~50 dB下的IED测量结果分散性大,分析上述现象的原因为IED采样率较低或数据采集及处理过程造成。因不同幅值的亚纳秒脉冲信号经UHF传感器输出后信号稳定,而IED测量对象即为UHF

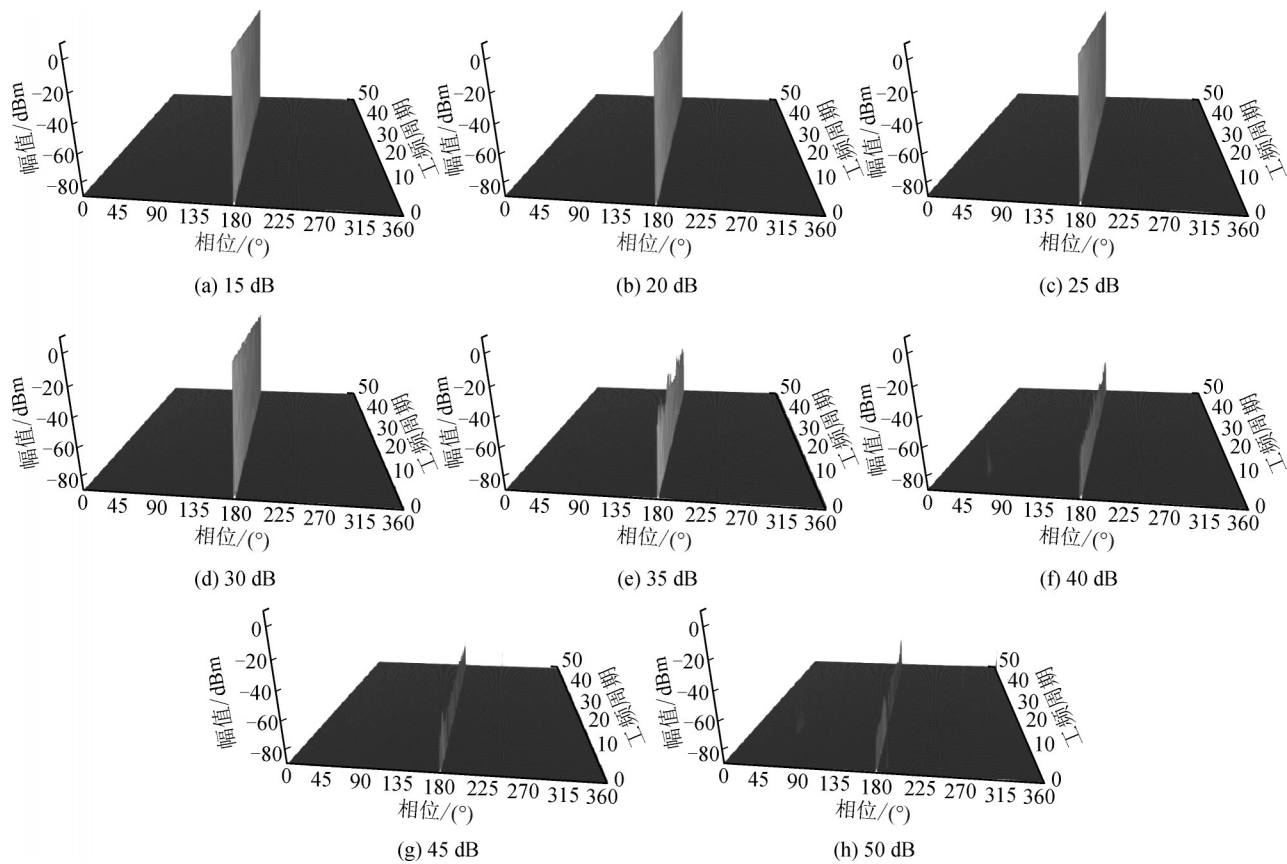


图 18 不同亚纳秒脉冲下 IED 显示 PRPS 图谱

Fig. 18 PRPS displayed by IED under different sub-nanosecond pulse peak values

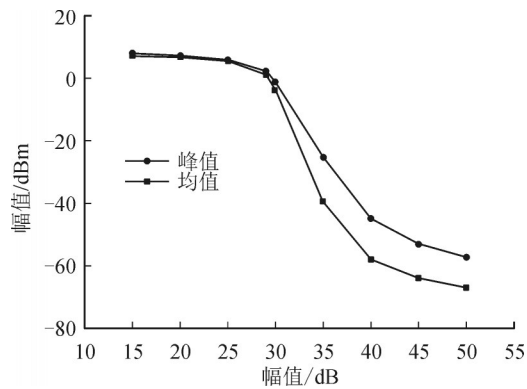


图 19 不同亚纳秒脉冲下 IED 显示峰值及均值

Fig. 19 Peak and average value curve displayed by IED under different sub-nanosecond pulse peak values

传感器输出信号,因此 IED 测量结果不应存在较大分散性;同时从图 16 可知,UHF 传感器输出信号与亚纳秒脉冲信号信号成线性关系,因此 IED 测量结果也应与亚纳秒脉冲信号成线性关系,因此亚纳秒脉冲信号能用于智能 GIS 局放 IED 性能试验。

4 结论

1)文中研制了一种能够产生上升沿时间为 253.75 ps、半高宽约为 1.15 ns、最大峰值电压为 532 V 的亚纳秒脉冲源,其波形频谱 200 MHz~1 500 MHz

范围内可激励出较强的电磁波信号,可用于智能 GIS 局放 IED 性能试验。

2)亚纳秒脉冲信号经 UHF 传感器输出后信号稳定,信号频谱分布可覆盖 200 MHz~1.5 GHz,其主要频带落在 400 MHz~900 MHz。

3)亚纳秒脉冲信号能够通过 IED 正常显示,且测量结果同亚纳秒脉冲信号成正相关关系,但非线性关系。

4)当亚纳秒脉冲峰值在 30~50 dB 时,IED 测量结果分散性较大。

参考文献:

[1] 甄昊涵,曹 玮,沈 华,等. 500 kV GIS 变电站隔离开关操作引起的 VFTO 研究[J]. 华东电力,2014,42(10): 2051-2055.
ZHEN Haohan, CAO Yi, SHEN Hua, et al. VFTO caused by disconnecting Switch operation in 500 kV GIS substation [J]. East China Electric Power, 2014, 42(10): 2051-2055.
[2] 局部放电测量:GB/T 7354—2003[S].2003.
Partial Discharge measure:GB/T 7354—2003[S].2003.
[3] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Partial discharge diagnostics for gas insulated substations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation,

- 1995, 2(5):893-905.
- [4] JUDD M D, LI Yang, HUNTER I B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: Sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 5-14.
- [5] JUDD M D, LI Yang, HUNTER I B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: Field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.
- [6] TENBOHLEN S, DENISOV D, HOEK S M, et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.
- [7] 覃 剑, 王昌长, 邵伟民. 特高频在电力设备局部放电在线监测中的应用[J]. 电网技术, 1997, 12(6): 33-36.
- QIN Jian, WANG Changchang, SHAO Weimin. Applying UHF to partial discharge on-line monitoring of electric power apparatus[J]. Power System Technology, 1997, 12(6): 33-36.
- [8] 邵 涛, 周文俊, 朱宜飞, 等. 特高频法检测GIS局部放电的试验研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 15-16.
- SHAO Tao, ZHOU Wenjun, ZHU Yifei, et al. Experimental research of UHF method for the detection of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 15-16.
- [9] 邱毓昌. 用特高频法对GIS绝缘进行在线监测[J]. 高压电器, 1997, 33(4): 36-40.
- QIU Yuchang. On-line monitoring of GIS insulation by UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 1997, 33(4): 36-40.
- [10] 姚 勇, 岳彦峰, 黄兴泉. GIS超高频/超声波局放检测方法的现场应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 422-424.
- YAO Yong, YUE Yanfeng, HUANG Xingquan. Application of GIS UHF/ultrasonic PD detection method[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 422-424.
- [11] JUDD M D, FARISH O, PEARSON J S. UHF couplers for gas-insulated substations: A calibration technique[J]. IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, 1997, 144(3): 117-122.
- [12] JUDD M D, FARISH O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4): 875-880.
- [13] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, GAUTSCHI D, et al. UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification[C]//Proceedings of ETG-Symposium VDE High Voltage Technology. Berlin, Deutschland: VDE, 2016: 1-9.
- [14] 李兴旺, 黎 量, 唐志国, 等. 外置式UHF校验信号注入方法的可行性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 71-76.
- LI Xingwang, LI Liang, TANG Zhiguo, et al. Feasibility analysis of radiating UHF verification signal through small hole in metal flange[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 71-76.
- [15] 庞小峰, 李兴旺, 吕 鸿, 等. 500 kV GIS断路器内置特高频传感器灵敏度校验方法[J]. 广东电力, 2014, 27(10): 112-115.
- PANG Xiaofeng, LI Xingwang, LYU Hong, et al. Verification method for sensitivity of built-in frequency sensor in 500 kV GIS breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(10): 112-115.
- [16] HOSHINO T, MARUYAMA S, NOJIMA K, et al. A unique sensitivity verification combined with real-time partial-discharge identification method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1890-1896.
- [17] 李军浩, 王 晶, 王 颂, 等. 一种亚纳秒高压脉冲源的研制[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 77-80.
- LI Junhao, WANG Jing, WANG Song, et al. Development of a sub-nanosecond pulse source[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(1): 77-80.
- 苏春强(1987—), 男, 工程师, 硕士, 从事高电压绝缘试验方面的研究工作。