

# GIS 局部放电特高频传感器有效高度的比对测试

舒胜文, 陈金祥, 陈 彬, 叶兆平, 陈敏维, 游 浩

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 为提高气体绝缘金属封闭式开关设备(GIS)局部放电特高频(UHF)检测技术现场应用的有效性,有必要对 UHF 传感器耦合性能进行校核。为此,建立了基于吉赫兹横电磁波(GTEM)小室的 UHF 传感器有效高度测试平台,采用 0.3~1.5 GHz 频段内的平均有效高度和该频段内有效高度大于等于 2 mm 的百分比表征 UHF 传感器的耦合性能。基于 GTEM750 小室,采用时域脉冲和扫频参考法对 UHF 传感器的有效高度进行了比对测试,并与 GTEM1500 小室的测试结果进行了比较;基于 GTEM750 小室的时域脉冲参考法,讨论了 UHF 传感器类型、工装、安装角度对有效高度测试结果的影响。研究表明,不同方法和平台对 UHF 传感器在 0.3~1.5 GHz 频段内的平均有效高度测试结果的偏差在  $\pm 1$  mm 以内;UHF 传感器类型、工装、安装角度对有效高度有显著的影响。

**关键词:** 气体绝缘金属封闭式开关设备; 局部放电; 传感器; 有效高度; 测试; 误差

**中图分类号:** TM 561

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.025

## 0 引言

特高频 UHF(Ultra-High Frequency)法以其检测频率高、频带宽、灵敏度高、抗干扰能力强等优点,在气体绝缘金属封闭式开关设备 GIS(Gas Insulated Switchgear)的局部放电状态检测中得到了广泛应用<sup>[1-8]</sup>。近年来,用于 GIS 局部放电检测的 UHF 传感器(以下简称 UHF 传感器)质量参差不齐、配置不佳和耦合性能下降导致的检测失效(误报警、漏报警)事例越来越多,严重制约了整个 GIS 局部放电 UHF 检测行业的健康发展<sup>[9-10]</sup>。因此,为了提高 GIS 局部放电 UHF 检测技术在现场应用的有效性,有必要深入开展 UHF 传感器耦合性能的校核研究<sup>[11]</sup>。

在 UHF 传感器耦合性能的校核方面,Judd 等最早提出了利用横电磁波 TEM(Transverse Electro-Magnetic)小室测量 UHF 传感器有效高度的方法,初步证明了利用 TEM 小室对 UHF 传感器进行标定的可行性<sup>[12-13]</sup>。然而,TEM 小室的可用频率上限只有几百 MHz,难以突破 GHz,因而其应用范围受到了一定的限制,难以有效覆盖 UHF 传感器的工作频带。Konigstein 等提出的吉赫兹横电磁波 GTEM(Gigahertz Transverse ElectroMagnetic)小室将 TEM 小室改造成矩形锥同轴线结构,将工作频率提高到 2 GHz 甚至更高,从而克服了传统的 TEM 小室可用频率上限低的缺点<sup>[14]</sup>。Judd 等在总结之前经验的基础上,将传统的 TEM 小室改造成了 GTEM 小室,并实现了基于时域脉冲参考法的 UHF 传感器有效高度标定方法,取得了较好的效果<sup>[15-16]</sup>。国内的华北电力大学、广东电科院<sup>[17-19]</sup>等基于 Judd 提出的方法,对国内外多

个厂家的 UHF 传感器的有效高度进行了测量。可以看出,目前对于 UHF 传感器有效高度的标定主要是基于时域脉冲参考法。而在计量领域,对电场传感器的标定通常采用传统的扫频方法。从原理上,频域有效高度是 UHF 传感器固有的频响特性,与检测方法无关。然而,在实际的 GTEM 小室中测试时,由于 GTEM 小室自身的驻波特性及电磁波信号的反射等原因,时域脉冲参考法与传统的扫频参考法对 GIS 局部放电 UHF 传感器有效高度测量结果的一致性还有待深入研究。此外,GTEM 小室尺寸对测试结果的影响也缺乏有效的评估。综上所述,目前已有的 UHF 传感器有效高度测试方法和结果尚缺乏必要的横向和纵向比对。

针对上述问题,本文建立了基于 GTEM750 小室的 UHF 传感器有效高度标定平台,采用 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度和该频段内有效高度大于等于 2 mm 的百分比表征 UHF 传感器的耦合性能;基于构建的 GTEM750 小室,采用时域脉冲和扫频参考法对 UHF 传感器的有效高度进行了比对测试,并将测试结果与某 GTEM1500 小室的测试结果进行了比对;基于 GTEM750 小室,利用时域脉冲参考法讨论了 UHF 传感器的类型、工装、安装角度对有效高度测试结果的影响。本文研究旨在通过对 UHF 传感器的耦合性能进行入网和定期校核,提升 GIS 局部放电 UHF 检测技术的现场应用水平。

## 1 测试原理和方法

### 1.1 UHF 传感器有效高度的定义

采用频域有效高度来标定 UHF 传感器的耦合性能,其值为 UHF 传感器输出电压  $U_o(f)$  与入射电场  $E_i(f)$  的比值,即:

$$H_{\text{sens}}(f) = \frac{U_o(f)}{E_1(f)} \quad (1)$$

其中,输出电压  $U_o(f)$  的单位为 V,入射电场  $E_1(f)$  的单位为 V/m,故有效高度  $H_{\text{sens}}(f)$  的单位为 m。由于  $H_{\text{sens}}(f)$  一般较小,通常其单位取为 mm。

### 1.2 UHF 传感器有效高度的参考标定法

本文基于 GTEM 小室同时实现了 UHF 传感器有效高度的时域脉冲和扫频参考法标定。由于有效高度是在频域内定义的,所以时域脉冲参考法需要对时域波形进行傅里叶变换。图 1 为有效高度参考标定法的实现原理图。

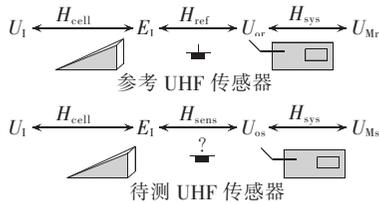


图 1 参考法的实现原理图

Fig.1 Schematic diagram of reference method

图 1 中,通过标定信号源注入电压  $U_1$  至 GTEM 小室,在 GTEM 小室内部建立电场  $E_1$ ,参考 UHF 传感器和待测 UHF 传感器耦合输出的电压分别为  $U_{or}$  和  $U_{os}$ ,经过测量系统后输出的电压分别为  $U_{Mr}$  和  $U_{Ms}$ 。设 GTEM 小室的传递函数为  $H_{\text{cell}}$ ,参考 UHF 传感器的传递函数(有效高度)为  $H_{\text{ref}}$ ,待测 UHF 传感器的传递函数(有效高度)为  $H_{\text{sens}}$ ,测量系统的传递特性为  $H_{\text{sys}}$ ,则参考和待测 UHF 传感器的测量系统输出可分别表示为:

$$\begin{cases} U_{Mr} = U_1 H_{\text{cell}} H_{\text{ref}} H_{\text{sys}} \\ U_{Ms} = U_1 H_{\text{cell}} H_{\text{sens}} H_{\text{sys}} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可推导得到:

$$H_{\text{sens}} = \frac{U_{Mr}}{U_{Ms}} H_{\text{ref}} \quad (3)$$

由式(3)可知,通过测量待测 UHF 传感器和参考 UHF 传感器在同一电压下的频率响应特性,根据参考 UHF 传感器的有效高度,即可计算得到待测 UHF 传感器的有效高度。

## 2 测试平台和步骤

### 2.1 平台接线图

图 2 所示为 UHF 传感器有效高度标定平台的接线图。基于时域脉冲(扫频)参考法的 UHF 传感器有效高度测试平台由脉冲(扫频)信号源、GTEM 小室、参考 UHF 传感器、高速数字示波器、测控计算机和标定软件及各种线缆附件等构成。

### 2.2 平台设备和参数

GTEM 小室根据隔板到地板的高度可分为不同的型号,其中高度通常取 250、500、750、1000、1250、1500、1750、2000 mm。本文主要比对了 GTEM750 和

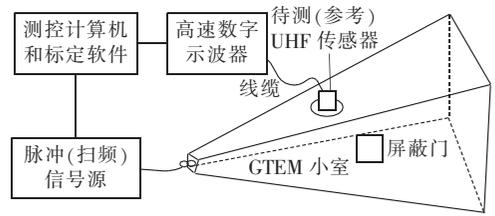


图 2 测试平台接线图

Fig.2 Wiring diagram of test platform

GTEM1500 这 2 种小室对 UHF 传感器有效高度测量结果的影响。待测 UHF 传感器共 5 个,分别编号为  $S_1$ — $S_5$ 。GTEM750、GTEM1500 平台的设备名称及其主要技术参数如下。

(1)GTEM750 平台的设备主要有 GTEM750 小室和力科示波器,其中,GTEM750 小室的尺寸为  $4.2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ ,电压驻波比不超过 1.5;力科示波器的带宽为 4 GHz,采样率为 40 GS/s。

(2)GTEM1500 平台的设备主要有 GTEM1500 小室和安捷伦示波器,其中,GTEM1500 小室的尺寸为  $6.95 \text{ m} \times 3.58 \text{ m} \times 2.55 \text{ m}$ ,电压驻波比不超过 1.5;安捷伦示波器的带宽为 4 GHz,采样率为 20 GS/s。

(3)两平台共用设备有脉冲信号源、艾法斯扫频信号源、参考传感器、同轴电缆线及附件、测控计算机和标定软件。

a. 脉冲信号源的电压输出范围为 0.5~200 V,重复频率为 200 Hz,20%~80%  $U_m$  ( $U_m$  为脉冲幅值)的脉冲上升沿时间不过 350 ps。

b. 艾法斯扫频信号源的频率范围为 9 kHz~2.01 GHz,最大输出功率为 13 dBm。

c. 参考 UHF 传感器采用半径为 0.65 mm、长度为 25 mm 的单极标准探针。

d. 长同轴电缆线为 10 m,短同轴电缆线为 3 m,采用 N-BNC、N-SMA 转接头。

e. 测控计算机的内存为 4 GB,主频为 1.7 GHz。

f. 标定软件采用 Labview 开发,可以自动计算、保存、打印结果。

### 2.3 平台性能

采用网络分析仪测试 GTEM750 小室馈电端口的电压驻波比及时域反射(TDR)阻抗,结果分别如图 3 和 4 所示。图 4 中, $l$  为测试点距馈电端口的距离。

由图 3 的测试结果可以看出,GTEM750 小室在 0.3~1.5 MHz 频段内的电压驻波比均可满足小于 1.5 的要求(依据 IEC61000-4-20 标准),驻波比出现振荡是由 GTEM 小室端口的感容特性引起的,微小的变化不会影响实际测试。

由图 4 可知,GTEM750 小室在后 2/3 区域内的 TDR 阻抗均可以满足  $(50 \pm 5) \Omega$  的要求(依据 IEC 61000-4-20 标准)。

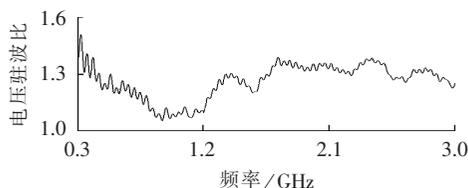


图 3 GTEM750 小室电压驻波比测试结果  
Fig.3 Measured VSWR of GTEM750 cell

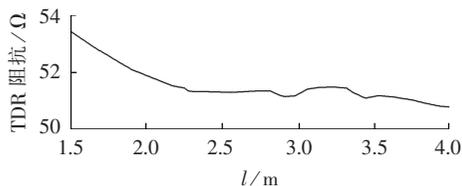


图 4 GTEM750 小室 TDR 阻抗测试结果  
Fig.4 Measured TDR impedance of GTEM750 cell

### 3 测试结果及分析

#### 3.1 方法验证

针对高度为 50 mm 的单极标准探针天线,分别采用基于 GTEM750 小室的时域脉冲和扫频参考法测试其频域有效高度曲线,结果如图 5 所示,为方便对比,图 5 中还给出了其理论计算曲线。

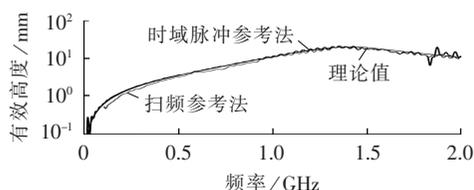


图 5 50 mm 单极探针天线的有效高度曲线  
Fig.5 Effective height curve of 50 mm monopole probe antenna

通过图 5 所示的频域有效高度曲线可以得到该单极标准探针天线在 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度及在该频段上有效高度大于等于 2 mm 的百分比  $p_{\geq 2}$ 、有效高度最大值及标准差,如表 1 所示。

表 1 50 mm 单极探针天线的有效高度参数

Table 1 Effective height parameters of 50 mm monopole probe antenna

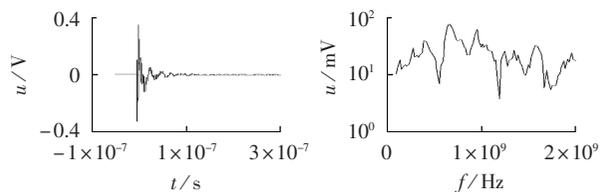
标定方法	平均有效高度/mm	$p_{\geq 2}/\%$	有效高度最大值/mm	有效高度标准差/mm
时域脉冲参考法	10.19	99.67	20.42	5.98
扫频参考法	9.63	96.34	21.40	6.10
理论值	10.17	99.00	19.92	6.15

由图 5 及表 1 可以看出,基于时域脉冲参考法和扫频参考法的 50 mm 高单极标准探针天线的频域有效高度测试结果与理论计算值相符合,2 种方法求得的有效高度与理论值的偏差均小于 0.7 mm;2 种方法求得的 0.3~1.5 GHz 之间有效高度的最大值与理论值的偏差均小于 1.5 mm;试验测试数据与理论计算数据的标准差非常接近,说明 3 组数据的一

致性较好,从而验证了方法的有效性。

#### 3.2 不同平台和结果对比

图 6 为时域脉冲参考法和扫频参考法得到的待测 UHF 传感器典型时域电压波形和幅频特性曲线。据此可由前述方法计算得到待测 UHF 传感器的有效高度。



(a) 时域脉冲参考法 (b) 扫频参考法

图 6 不同方法得到的传感器时域和频域输出结果

Fig.6 Time-domain sensor output and frequency-domain sensor output by different methods

图 7 为分别基于 GTEM750 和 GTEM1500 小室的测试平台,采用时域脉冲参考法和扫频参考法获得的 UHF 传感器  $S_2$  的频域有效高度曲线。由此可以得到该 UHF 传感器在 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度及在该频段上有效高度大于等于 2 mm 的百分比,如表 2 所示。

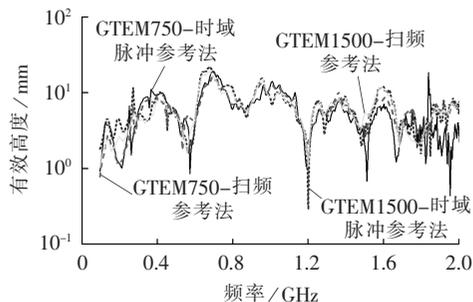


图 7 不同平台和方法的有效高度曲线对比

Fig.7 Comparison of effective height curve among different methods and platforms

表 2 不同平台和方法的有效高度参数对比

Table 2 Comparison of effective height parameters among different methods and platforms

平台-方法	平均有效高度/mm	$p_{\geq 2}/\%$
GTEM750-时域脉冲参考法	7.53	97.00
GTEM750-扫频参考法	7.51	98.67
GTEM1500-时域脉冲参考法	7.83	97.50
GTEM1500-扫频参考法	7.48	98.33

由图 7 可以看出,基于不同平台和方法测试得到的 UHF 传感器  $S_2$  频域有效高度曲线趋势基本一致。由表 2 可知,基于不同平台和方法测试得到的 UHF 传感器  $S_2$  在 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度偏差不超过  $\pm 0.5$  mm,该频段内有效高度大于等于 2 mm 的百分比偏差不超过  $\pm 2\%$ 。同理,可对剩余的待测 UHF 传感器进行测试,结果表明:基于不同平台和方法测试得到的 UHF 传感器  $S_1$ — $S_5$  在 0.3~1.5 GHz 之

间的平均有效高度偏差均不超过  $\pm 1$  mm,该频段内有效高度大于等于 2 mm 的百分比偏差不超过  $\pm 3\%$ 。

### 3.3 不同类型 UHF 传感器的结果比对

基于 GTEM750 小室的测试平台和时域脉冲参考法,对 UHF 传感器  $S_1$ — $S_5$  在 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度进行测试,结果如表 3 所示。

表 3 不同类型传感器的有效高度参数比对

Table 3 Comparison of effective height parameters among different sensor types

UHF 传感器	平均有效高度/mm	$p_{\geq 2}/\%$
$S_1$	8.57	100.00
$S_2$	7.53	97.00
$S_3$	4.74	84.17
$S_4$	6.83	100.00
$S_5$	9.79	97.83

从表 3 可知,不同厂家和类型的 UHF 传感器有效高度测试结果差异很大,0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度最大相差超过 2 倍。若按 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度需大于等于 8 mm 的要求,UHF 传感器  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  均不合格。这也说明了开展 UHF 传感器耦合性能校核的必要性。

### 3.4 不同工装的结果比对

在进行 UHF 传感器有效高度的实验室测试时,通常将 UHF 传感器置于绝缘板上,即进行开域场测量。实际运行中的 GIS 局部放电 UHF 测量结构包含裸盆子和浇注孔 2 种工装<sup>[20]</sup>。对 UHF 传感器  $S_1$  和  $S_4$  在绝缘板、裸盆子和浇注孔(45 mm×20 mm)3 种工装下的有效高度进行了测量比对,结果如表 4 所示。

表 4 不同工装传感器的有效高度参数比对

Table 4 Comparison of effective height parameters among different installation modes

UHF 传感器	工装类型	平均有效高度/mm	$p_{\geq 2}/\%$
$S_1$	绝缘板	8.57	100.00
	裸盆子	12.39	99.67
	浇注孔	4.45	70.33
$S_4$	绝缘板	6.83	100.00
	裸盆子	9.71	100.00
	浇注孔	3.16	56.57

从表 4 可以看出,裸盆子式 UHF 传感器的平均有效高度约为绝缘板式 UHF 传感器的平均有效高度的 1.5 倍,浇注孔式 UHF 传感器的平均有效高度约为绝缘板式 UHF 传感器的平均有效高度的 50%。这是因为裸盆子式工装更容易形成有效的电磁泄漏窗口,绝缘板式工装的电磁信号更发散;而对于带有浇注孔的屏蔽式工装,因电磁泄漏口很小,所以信号受到了不同程度的衰减,UHF 传感器不能有效地接收到相应频段的信号,其有效高度相对裸盆子式 UHF 传感器的有效高度显著降低,降低幅度与浇注孔的尺寸有关。因此,当电磁泄漏窗口大小为合适的中间

值时,有效高度测试值最高。

### 3.5 不同安装角度的结果比对

在实际测试中,由于条件的限制使得 UHF 传感器无法较理想地被安装于各种工装上。以 UHF 传感器  $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_4$  为测试对象,采用裸盆子式工装,基于 GTEM750 小室的时域脉冲参考法,分别测试 UHF 传感器在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  安装角度下的平均有效高度和有效高度大于 2 mm 的百分比,结果如表 5 所示。

表 5 不同安装角度下传感器的有效高度参数比对

Table 5 Comparison of effective height parameters among different installation angles

UHF 传感器	安装角度/ $(^\circ)$	平均有效高度/mm	$p_{\geq 2}/\%$
$S_1$	0	12.39	99.67
	90	2.08	36.17
	180	12.18	99.33
$S_3$	0	7.30	84.33
	90	3.00	50.83
	180	7.44	86.17
$S_4$	0	9.71	100.00
	90	6.04	57.67
	180	9.84	100.00

由表 5 可知,不同的安装角度对 UHF 传感器的有效高度有显著的影响。 $0^\circ$  和  $180^\circ$  安装角度下 UHF 传感器的有效高度基本一致,而在  $90^\circ$  安装角度下 UHF 传感器有效高度明显下降,相差 1.5~6 倍。这一结论证明了 UHF 传感器具有方向性。

## 4 结论

本文基于 GTEM 小室,建立了 UHF 传感器有效高度的时域脉冲和扫频参考测试平台,并验证了其有效性。通过大量的比对测量,得到了以下结论。

a. 基于不同平台和方法测试得到的 UHF 传感器在 0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度偏差在  $\pm 1$  mm 以内,该频段内有效高度大于等于 2 mm 的百分比偏差在  $\pm 3\%$  以内。

b. 不同厂家和类型的 UHF 传感器的有效高度测试结果差异很大,0.3~1.5 GHz 之间的平均有效高度最大相差超过 2 倍。

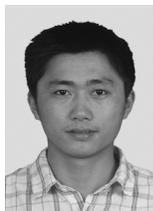
c. 裸盆子式 UHF 传感器的平均有效高度约为绝缘板式 UHF 传感器的平均有效高度的 1.5 倍,浇注孔式 UHF 传感器的平均有效高度约为绝缘板式 UHF 传感器的平均有效高度的 50%。因此,当电磁泄漏窗口大小为合适的中间值时,有效高度测试值最高。

d. 不同的安装角度对 UHF 传感器有效高度有显著的影响, $0^\circ$  和  $180^\circ$  安装角度下 UHF 传感器的有效高度基本一致,而在  $90^\circ$  安装角度下 UHF 传感器的有效高度明显下降,相差 1.5~6 倍,证明了 UHF 传感器具有方向性。

## 参考文献:

- [1] 胡岳,司良奇,张卫东,等. 自主脉冲标定式特高频局部放电带电检测相位同步方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):44-48.  
HU Yue,SI Liangqi,ZHANG Weidong,et al. Phase synchronization based on independent reference pulse for online UHF PD detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):44-48.
- [2] 刘卫东,刘尚合. 基于小波分解与滑动峰态的微弱放电信号联合检测方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):152-156,164.  
LIU Weidong,LIU Shanghe. Weak partial discharge signal detection based on wavelet decomposition and sliding kurtosis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):152-156,164.
- [3] 彭超,雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系[J]. 高电压技术,2014,39(2):348-353.  
PENG Chao,LEI Qingquan. Relationship between characteristic in time and frequency domain of partial discharge ultra-high frequency signals and the radiation distance[J]. High Voltage Engineering,2014,39(2):348-353.
- [4] 廖瑞金,段炼,汪可,等. 基于时频分析和2DNMF的局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):20-25.  
LIAO Ruijin,DUAN Lian,WANG Ke,et al. Partial discharge pattern recognition based on time-frequency analysis and 2DNMF[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):20-25.
- [5] HIKITA M,OHTSUKA S,WADA J,et al. Study of partial discharge radiated electromagnetic wave propagation characteristics in an actual 154kV model GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):8-17.
- [6] HIKITA M,OHTSUKA S,WADA J,et al. Propagation characteristics of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with L branch structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(5):1678-1685.
- [7] 胡岳,司良奇,张卫东,等. 局部放电超高频脉冲分段采集及相角计算方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):70-74,93.  
HU Yue,SI Liangqi,ZHANG Weidong,et al. Segmental acquisition of partial discharge UHF pulses and its phase angle calculation[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):70-74,93.
- [8] GAO Wensheng,DING Dengwei,LIU Weidong,et al. Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial-discharge detection using the UHF method in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):38-47.
- [9] 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.
- [10] ITO T,KAMEI M,UETA G,et al. Improving the sensitivity verification method of the UHF PD detection technique for GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(6):1847-1853.
- [11] CIGRE TF 15/33.03.05. Partial discharge detection system for GIS:sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[J]. Electra,1999(183):74-87.
- [12] JUDD M D,FARISH O,PEARSON J S. UHF couplers for gas-insulated substations:a calibration technique[J]. IEE Proceedings-Science,Measurement and Technology,1997,144(3):117-122.
- [13] JUDD M D,FARISH O,HAMPTON B F. Broadband couplers for UHF detection of partial discharge in gas-insulated substation[J]. IEE Proceedings-Science,Measurement and Technology,1995,142(3):237-243.
- [14] KOENIGSTEIN D,HANSEN D. A new family of TEM-cells with enlarged bandwidth and optimized working volume[C]// Proceedings of 7th international symposium on EMC. Zurich,Swiss:[s.n.],1987:127-132.
- [15] 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.
- [16] JUDD M D,YANG L,HUNTER I B,et al. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part 1: sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2005,21(2):5-14.
- [17] 李兴旺,卢启付,唐志国,等. GIS局部放电特高频传感器接收特性表征研究[J]. 广东电力,2013,26(9):55-60.  
LI Xingwang,LU Qifu,TANG Zhiguo,et al. Study on receiving characteristics of the UHF sensor for GIS partial discharge[J]. Guangdong Electric Power,2013,26(9):55-60.
- [18] 李兴旺,卢启付,唐志国,等. GIS局部放电特高频传感器灵敏度研究[J]. 高电压技术,2012,38(增刊):1-4.  
LI Xingwang,LU Qifu,TANG Zhiguo,et al. Study on sensitivity of UHF sensors for GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering,2012,38(Supplement):1-4.
- [19] 王增彬,吕鸿,李兴旺,等. 基于网络分析仪的GIS局部放电在线监测特高频传感器现场校核技术[J]. 广东电力,2014,27(11):90-96.  
WANG Zengbin,LÜ Hong,LI Xingwang,et al. Spot check technology for GIS partial discharge on-line monitoring ultra-high frequency sensor based on network analyzer[J]. Guangdong Electric Power,2014,27(11):90-96.
- [20] 王亮,郑书生,李成榕,等. GIS浇注孔传播内部局部放电UHF电磁波的特性[J]. 电网技术,2014,38(1):241-247.  
WANG Liang,ZHENG Shusheng,LI Chengrong,et al. Distribution of electric field strength and spectral characteristic of UHF signal of partial discharge inside GIS at resin sprue of metal ring[J]. Power System Technology,2014,38(1):241-247.

## 作者简介:



舒胜文

舒胜文(1987—),男,江西宜春人,高级工程师,博士后,主要从事高压电器、气体放电机理、电力系统内过电压及其抑制技术方面的研究(E-mail:shushengwen@whu.edu.cn);

陈金祥(1973—),男,福建福州人,高级工程师,博士,主要从事电力设备智能化检测技术的研究。

(下转第197页 continued on page 197)

- Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.I.]:IEEE,2010: 183-188.
- [14] 王晓远,高森,赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):106-110.  
WANG Xiaoyuan,GAO Miao,ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):106-110.
- [15] 刘晓明,赵洋,曹云东,等. 基于多特征融合的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电网技术,2014,38(3):795-801.  
LIU Xiaoming,ZHAO Yang,CAO Yundong,et al. Multi-feature fusion based diagnosis of series arc faults in AC system[J]. Power System Technology,2014,38(3):795-801.
- [16] 束洪春,刘振松,彭仕欣. 同塔双回线电弧故障单端测距算法[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):11-15.  
SHU Hongchun,LIU Zhensong,PENG Shixin. Single terminal arc fault location for two parallel transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12): 11-15.
- [17] GREGORY G D,WONG K,DVORAK R. More about arc fault circuit interrupters[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2004,40(4):1006-1011.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 电气火灾监控系统 第4部分 故障电弧探测器:GB 14287.4—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.

#### 作者简介:



王尧

王尧(1981—),男,河北石家庄人,讲师,博士,主要研究方向为电器智能化技术与电器设备电磁兼容(**E-mail**:wycolor@163.com);

韦强强(1992—),男,江苏新沂人,硕士研究生,主要研究方向为电器智能化技术(**E-mail**:weiqiangstrong@163.com);

李奎(1965—),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为

开关设备可靠性与智能化(**E-mail**:likui@hebut.edu.cn)。

## Series AC arc fault detection based on high-frequency components of arc current

WANG Yao<sup>1</sup>, WEI Qiangqiang<sup>1</sup>, GE Leijiao<sup>2</sup>, NIU Feng<sup>1,3</sup>, LI Kui<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>4</sup>

(1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Zhejiang High and Low Voltage Electric Equipment Quality Inspection Center, Wenzhou 325603, China)

**Abstract:** The performance of high-frequency components of arc current with typical load in time domain is quite different from that in frequency domain, based on which, a detection method is proposed for series AC arc fault. The ratio of arc current variation rate to its RMS and the current amplitude of 6kHz~12kHz band are used as the characteristic parameters to identify the series AC arc fault. Since the duration of load startup current is far shorter than that of arc current, the time threshold of arc fault is set accordingly to reduce the influence of load startup process on the arc fault detection. Test results show that the proposed method can easily realize the rapid detection of series AC arc fault with simple hardware.

**Key words:** arc fault; high-frequency component; characteristic parameter; fault identification

(上接第170页 continued from page 170)

## Comparative test of effective height of UHF sensor for partial discharge in GIS

SHU Shengwen, CHEN Jinxiang, CHEN Bin, YE Zhaoping, CHEN Minwei, YOU Hao

(Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The coupling performance of UHF (Ultra-High Frequency) sensor has to be checked to improve the site application effectiveness of UHF detection technology for partial discharge in GIS (Gas Insulated Switchgear). A test platform based on the GTEM (Gigahertz Transverse ElectroMagnetic) cell is built to test the effective height of UHF sensor. The average effective height within 0.3~1.5 GHz and the percentage of effective height above 2 mm are adopted to characterize the coupling performance of UHF sensor. Based on the GTEM750 cell, the time-domain pulse method and sweep-frequency reference method are applied to comparatively test the effective height of UHF sensor. The test results are compared between GTEM750 cell and GTEM1500 cell. Based on the GTEM750 cell and the time-domain pulse reference method, the influences of sensor type, installation mode and installation angle on the tested effective height of UHF sensor are discussed. Research results show that, the deviation of average effective height within 0.3~1.5 GHz between different platforms or methods is within  $\pm 1$  mm; the sensor type, installation mode and installation angle have obvious influences on the average effective height.

**Key words:** GIS; partial discharge; sensors; effective height; test; error