

# 局部放电UHF传感器有效高度脉冲时域和频域标定对比研究

有效高度标定现已成为国内外普遍认可的一种局部放电特高频传感器的性能评价手段,相关测试要求已经被写入了电力行业标准。在基于吉赫兹模电磁波(GTEM)的脉冲时域标定方法研究成果的基础上,提出了一种基于频域参考法的GTEM扫频标定新方法,研制开发了以网络分析仪和GTEM小室为核心的扫频标定系统。分别采用脉冲时域和频域参考法对特高频传感器的有效高度开展了测试验证和对比研究,实验验证了两种方法对于特高频传感器有效高度标定的一致性。

彭 晶 王 科/云南电网有限责任公司电力科学研究院

王 飞 刘亚洲/华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室

唐志国/华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室

## 0 引言

气体绝缘全封闭组合电器(GIS)

由于其占地面积小、可靠性高在电力系统中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。随着我国经济的快速发展,GIS的需求也急剧增加,生产厂家往往超负荷生产,在产品生产工艺、材料、运输、安装和调试等各环节均难以保障质量,这就大大增加了GIS出现故障的概率,对电力系统的安全可靠运行造成隐患<sup>[3-5]</sup>,因此针对GIS绝缘故障的检测和诊断技术备受电力部门重视。

GIS局部放电特高频检测技术由于其灵敏度高、可进行故障类型识别和定位等优点,因而近年来在国内外已经得到了大力的发展应用,并且已经成为GIS最关键的一项状态检测手段<sup>[6-9]</sup>。然而由于UHF检测技术的理论和工程应用仍不完善,相关检测技术标准的建设相对滞后,导致现场误报漏报问题十分突出,近几年来我国该领域专家正致力于局部放电特高频检测技术标准的制定。

传感器作为检测系统的关键部件之一,其性能的检定评价至关重要。国外方面,以Strythclyde大学为代表基于吉赫兹模电磁波(GTEM)传输线建立了脉冲时域参考法的特高频传感器标定方法<sup>[10-11]</sup>,以传感器有效高度来表征传感器的耦合性能。日本、韩国等均采用了类似的方法。

国内方面,以西安交通大学、重庆大学为代表采用同轴腔传输线,通过测试频率响应的手段进行传感器性能测试<sup>[12-17]</sup>。这里,同轴传输线的不足在于其匹配性能无法满足高达吉赫兹频率范围内传感器标定的要求。华北电力大学采用与Strythclyde大学相同的技术路线,建立了基于GTEM的脉冲时域参考法的特高频传感器标定系统。脉冲标定方法的特点在于通过一次脉冲信号的输入和输出,即可通过傅里叶分解的方式获得系统全频率的响应特性,测试效率高,且通过选取合适的时间窗(反射信号未到达),可以避免反射信号的影响。

从理论上讲,信号的时域和频域通过傅里叶变换是可以统一起来的,即时域和频域标定方法的结果应具有一致性。然而在工程上,脉冲测试方法主要应用于军事和科研领域,RF计量方面的国家标准均基于扫频方式建立。此外,由于GTEM小室的反射等原因,目前尚无采用扫频法测量局部放电特高频传感器有效高度的文献报道。鉴于网络分析仪属于应用广泛的一种测试仪器,在很多电科院和电力公司都有配备,如能



彭 晶/工程师

### 关键词/Keywords

特高频传感器·  
有效高度·  
时域·  
频域·  
标定·

统一特高频传感器有效高度的时域和频域测量方法, 不仅具有理论意义, 还能够给特高频的标定提供更大的灵活性, 节约可观的设备投资, 因此电力科技部门对此十分关注。

为此, 本文在基于GTEM的脉冲时域标定方法研究成果基础上, 提出了一种基于频域参考法的GTEM扫频标定新方法, 研制了相应的扫频标定系统, 并通过对比测试的方式研究了两种方法对于特高频传感器有效高度标定的一致性。

## 1 基于GTEM的脉冲时域参考法

目前, 国内外已经普遍认可通过有效高度来表征特高频传感器的接收性能, 其定义为

$$H_e(f) = \frac{U_o(f)}{E_i(f)} \quad (1)$$

式中,  $E_i(f)$ 为传感器待检测的入射场 $E_i(t)$ 的频域, V/m;  $U_o(f)$ 为传感器的输出电压 $u_o(t)$ 的频域, V;  $H_e(f)$ 为传感器对于入射场 $E_i(t)$ 到其输出电压 $u_o(t)$ 的传递函数, mm。

### 1.1 标定系统

基于GTEM小室的脉冲时域标定系统由标定脉冲源、GTEM小室、单极标准探针、高速数字示波器、测控计算机、测控分析软件及各种线缆附件等构成。图1为标定系统构成示意图, 其中标定脉冲波形如图2所示, 上升沿时间为0.3 ns (10%~90%)。

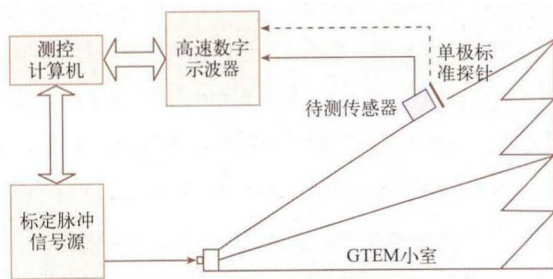


图1 特高频局部放电传感器时域脉冲标定系统

### 1.2 标定原理

采用脉冲时域参考法标定特高频传感器有效高度在文献[18]中已有详细介绍, 这里仅对其基本原理予以简要说明, 如图3所示。

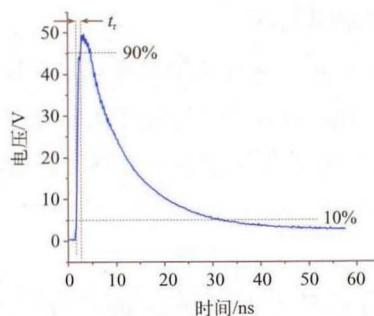


图2 标定脉冲源波形

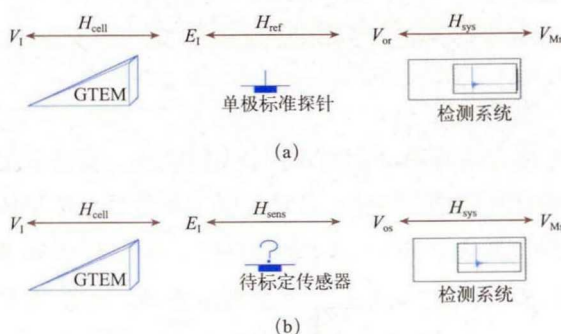


图3 特高频局部放电传感器标定原理

为了表述方便, 这里用频域方式表示各物理量。通过标定信号源注入脉冲电压 $V_1$ 至GTEM小室, 分别采用参考传感器和被测传感器测量GTEM内部产生的电场 $E_1$ , 产生的电压输出分别为 $V_{or}$ 和 $V_{os}$ 。设GTEM小室的传递函数为 $H_{cell}$ ; 参考天线传感器的传递函数为 $H_{ref}$ ; 待测传感器的传递函数为 $H_{sens}$ ; 高速示波器的传递特性为 $H_{sys}$ ; 参考传感器和待测传感器的电压响应分别为 $V_{Mr}$ 和 $V_{Ms}$ , 则可建立下述关系

$$\begin{cases} V_{Mr} = V_1 H_{cell} H_{ref} H_{sys} \\ V_{Ms} = V_1 H_{cell} H_{sens} H_{sys} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)中的上下两式左右相除, 即可得到用参考传感器的有效高度来表示的待测传感器的有效高度, 即

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

采用这种方式的优点在于回避了脉冲电场难以准确测量的问题。参考传感器可选择短单极探针, 其传递函数可以通过准确的数学模型计算得到, 并且已经通过了严格的实实验验证。

### 1.3 脉冲法测试过程

1) 按图3中, 将脉冲信号源输出与GTEM输入端口相连, 调节脉冲信号源幅值为50 V。

2) 分别将参考传感器和待测传感器输出端口与示波器相连, 读取相应波形并作傅里叶变换得  $V_{Mr}$  和  $V_{Ms}$ 。

最后依据式(3)计算被测传感器的有效高度曲线。

## 2 基于频域参考法的扫频标定

### 2.1 标定系统

该方法同样以GTEM小室为传输线, 保证系统在宽频内良好的匹配, 信号源则采用信号分析领域通用的测试设备——网络分析仪。基于频域参考法的扫频标定系统还包括参考传感器、测控计算机、测控分析软件及各种线缆附件, 如图4所示。

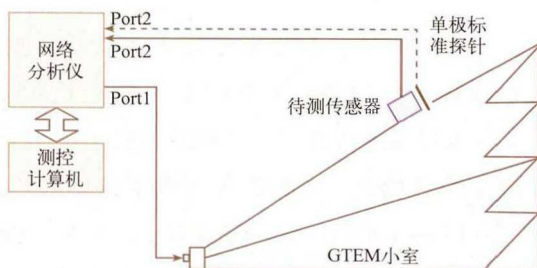


图4 特高频局部放电传感器扫频法标定系统

### 2.2 标定原理

图4中, 通过网络分析仪port1注入扫频电压  $V_1$  至GTEM, 分别将参考传感器和待测传感器产生的电压输出接至网络分析仪的port2端口, 并测量两种情况下的  $S_{21}$  参数, 则有下式成立

$$\begin{cases} S_{21s} = 20\lg\left(\frac{V_{Ms}}{V_1}\right) = 20\lg(H_{\text{cell}} H_{\text{sens}} H_{\text{sys}}) \\ S_{21r} = 20\lg\left(\frac{V_{Mr}}{V_1}\right) = 20\lg(H_{\text{cell}} H_{\text{ref}} H_{\text{sys}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S_{21s}$  和  $S_{21r}$  分别为接入被测传感器和参考传感器情况下的  $S_{21}$  参数;  $V_1$  为网络分析仪port1端口注入GTEM小室的扫频电压, 相应参考传感器和被测传感器产生的电压输出分别为  $V_{or}$  和  $V_{os}$ ;  $V_{Mr}$  和  $V_{Ms}$  为网络分析仪port2端口实测电压;  $H_{\text{cell}}$ 、 $H_{\text{ref}}$  和  $H_{\text{sens}}$  分

别为GTEM小室、参考传感器和被测传感器的传递函数;  $H_{\text{sys}}$  为网络分析仪接收端口的传递函数。由式(4)中上下两式左右相减可得式(5)

$$H_{\text{sens}} = 10^{\frac{S_{21s} - S_{21r}}{20}} H_{\text{ref}} \quad (5)$$

同时域参考法相似, 通过参考传感器的传递函数和接入两种传感器情况下的  $S_{21}$  曲线即可求得待测传感器的等效高度。

### 2.3 扫频法测试过程

1) 首先设置网络分析仪测试参数: 扫频范围(100 kHz~3 GHz)、扫频点数(1 601)和输出功率0 dBm。

2) 校准网络分析仪。

3) 依据图4分别接入参考传感器和待测传感器。port1输出接GTEM输入端口, 参考传感器/待测传感器输出接port2输入端口, 传感器放置在GTEM上面开窗的中心位置。

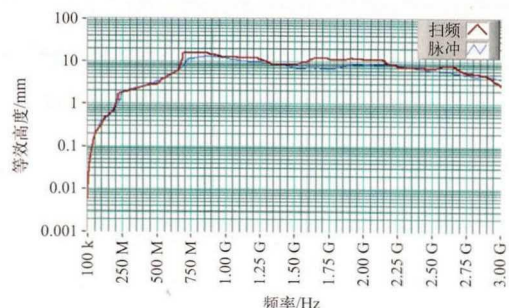
4) 分别测试参考传感器和待测传感器的  $S_{21}$  参数  $S_{21r}$  和  $S_{21s}$ 。

最后依据式(5)计算被测传感器的有效高度曲线。

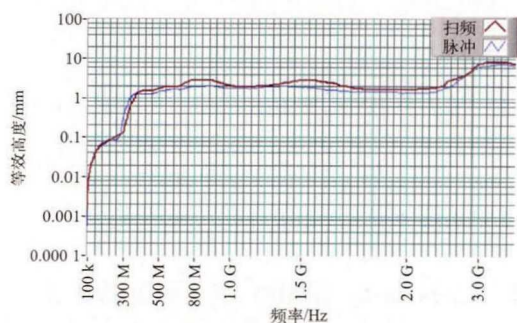
## 3 实验验证

以课题组研发的两只特高频天线为测试对象(其中I号正常, II号已损坏), 分别采用时域参考法和扫频参考法对其开展对比测试, 结果如图5所示。

测试结果表明, 所测I号传感器在300~1 500 MHz的平均等效高结果分别为11.5 mm和11.3 mm, 偏差1.77%; 所测II号传感器的结果分别为2.6 mm和2.5 mm, 偏差为3.8%; 基于频域参考法的扫频测



(a) I号传感器(正常)



(b) II号传感器 (已损坏)

图5 两种方法得到的UHF传感器的频域等效高度对比曲线

量方式适用于局部放电特高频传感器有效高度的标定,与脉冲时域测量方法具有良好的一致性。

## 4 结束语

1) 提出了一种基于频域参考法的GTEM扫频标定新方法。

2) 研制了以网络分析仪和GTEM小室为核心的扫频标定系统。

3) 分别采用脉冲时域和扫频标定方法对课题组开发的两只特高频传感器有效高度进行了对比测试,结果偏差小于5%,实验验证了两种方法测试特高频传感器有效高度的一致性。

## 参考文献

- [1] 罗学琛. SF<sub>6</sub>气体绝缘全封闭组合电器 (GIS) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 曹华威, 张素红. SF<sub>6</sub>全封闭组合电器 (GIS) 探讨 [J]. 河南科技, 2013 (16): 54.
- [3] 王斌. 220 kV GIS设备事故及原因分析 [J]. 高电压技术, 2002, 28 (11): 56-57.
- [4] 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.
- [5] 徐世山, 孟可风, 刘文泉. 一起363 kV GIS充电闪络故障的原因分析 [J]. 高电压技术, 2007, 43 (1): 74-76.
- [6] 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.
- [7] Tang Zhiguo, Wang Caixiong, Chang Wenzhi, et al. A combined noise-rejection method for UHF PD detection on-site [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19 (3): 917-924.
- [8] 高文胜, 丁登伟, 刘卫东, 等. 采用特高频检测技术的局部放电电源定位方法 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (11): 2680-2684.
- [9] 张晓星, 唐俊忠, 唐炬, 等. GIS中典型局放缺陷的UHF信号与放电量的相关分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (1): 59-65.
- [10] Judd M D, Farish O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1998, 47 (4): 875-880.
- [11] Judd M D. Transient calibration of electric field sensors [J]. IEE Proceedings - Science Measurement and Technology, 1999, 146 (3): 113-116.
- [12] 王颂, 吴晓辉, 袁鹏, 等. 局部放电超高频检测系统标定方法的研究现状及发展 [J]. 高压电器, 2007, 43 (1): 59-61, 64.
- [13] 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.
- [14] 唐炬, 侍海军, 孙才新, 等. GIS局部放电两种内置传感器响应特性分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (2): 29-31.
- [15] 王建生, 邱毓昌, 吴向华, 等. 用于GIS 局部放电检测的超高频传感器频率响应特性 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (8): 42-45.
- [16] 谢彦召, 刘顺坤, 王赞基, 等. 电磁脉冲传感器的时域和频域标定方法及等效性 [J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24 (4): 395-399.
- [17] 胡岳, Chiampi M, Crotti G, 等. 基于放电图谱仿真的局部放电检测仪性能评估方法及系统研制 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (5): 87-93.
- [18] Harrison C. The radian effective half-length of cylindrical antennas less than 1.3 wavelengths long [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2003, 11 (6): 657-660.

(收稿日期: 2016-05-18) EA