

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.019

## 局部放电特高频检测校准影响因素研究

刘顺成<sup>1,2</sup>, 向加佳<sup>3</sup>, 陈剑<sup>1,2</sup>, 程宇<sup>4</sup>, 肖德华<sup>5</sup>, 陈全明<sup>5</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南长沙 410004; 2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004; 3. 国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心, 湖南长沙 410131; 4. 国网湖南省电力有限公司宁乡市供电分公司, 湖南长沙 410600; 5. 国网湖南省电力有限公司城步县供电分公司, 湖南邵阳 422500)

**摘要:**局部放电特高频(UHF)法广泛应用于电气设备在线监测,由于UHF信号传递函数的影响因素相当繁复,至今未能实现定量校准。为研究UHF检测技术定量校准的影响因素,分析了典型局部放电源的放电机理,通过试验研究了UHF信号的传播规律以及天线测量特性。研究表明,基于特征参量放电量的UHF检测校准可靠性与放电源有较大关联,电晕放电与悬浮放电的校准曲线更能准确表征设备绝缘缺陷的严重程度,内部气隙放电与沿面放电的准确性则相对较差。UHF信号能量衰减至平稳期所需距离随频率增高而变小,而UHF信号频率变化时不影响传感器在不同角度测量的信号能量衰减变化规律。因此,UHF信号校准必须综合考量具体的放电类型与测量条件。研究结果可为构建UHF校准体系的进一步研究提供参考,对推进UHF法在电力设备故障诊断和绝缘状态评估中的应用具有重要意义。

**关键词:**局部放电;特高频(UHF);信号能量;放电量;传播特性;校准

**中图分类号:**TM855

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2021)03-0128-07

### 0 引言

局部放电(简称“局放”)是评价电气设备绝缘状态的最重要手段之一,主要表征高压作用下的绝缘状况。特高频(ultra high frequency, UHF)检测法具有优秀的抗干扰性能与灵敏度,已普遍应用于局放的在线监测<sup>[1-3]</sup>。

UHF信号测量频率范围为0.3~3 GHz,至今尚未形成定量校准检测标准,国内外研究人员一直寻求表征设备绝缘劣化程度最为灵敏的UHF特征参量。由于局放产生的电磁场具有复杂的传播与衰减特性,在现有技术条件下,无法直接准确测量电磁场能量大小来表征局放水平,寻求其他途径来量化分析UHF信号成为必然<sup>[4-6]</sup>。英国Martin Judd等学者在上世纪末从局放产生的瞬时电流值与转移电荷量入手研究UHF信号校准,此后,国内外学者基于该思想进行了大量的研究,通过仿真、建模与试验研究论证了UHF信号积累能量与其对应视在放电量的二次方呈线性关联<sup>[7-11]</sup>。

UHF检测方法难以定量校准的主要原因是UHF信号测定的影响因素非常复杂。现有研究多集中于现场实际情况,即UHF信号在变压器腔体、气体隔离开关(gas insulated switchgear, GIS)内不同

结构、不同部位的传播特性<sup>[12-14]</sup>,或研究传播介质(如变压器油、SF<sub>6</sub>气体)对UHF信号的影响<sup>[15-19]</sup>,亦或研究测量天线传感器的优化改进<sup>[20]</sup>,鲜见聚焦于UHF信号特点、综合分析UHF测量方法定量校准影响因素的相关文献。

文中根据UHF信号的产生与测量特性,结合理论分析与试验研究,综合考察不同机理局放的放电源特性、不同频率UHF信号的传播规律以及测量传感器对于UHF检测校准的影响,为探求UHF信号更有效、更灵敏的校准方法提供一定参考,以期早日构建规范的特高频法校准体系。

### 1 放电源特性

电气设备由于本身质量或者外部损伤等原因,会在其内部、表面等部位产生绝缘缺陷,在一定条件下将引发局放。不同放电源具有不同的局放特性,根据缺陷特点一般有气隙放电、电晕放电、沿面放电和悬浮放电4种类型。

#### 1.1 气隙放电缺陷

国标和国际电工委员会推荐反映局放原理的电路如图1所示<sup>[21]</sup>,其实质为气隙放电的等效电路。其中, $R_c, C_c$ 分别为气隙的电阻与电容; $R_b, C_b$ 分别为放电气隙串联介质的电阻与电容; $R_a, C_a$ 为剩余介质的电阻与电容。

脉冲电流法的理论分析使用该气隙模型。但

收稿日期:2020-10-18;修回日期:2020-12-09

基金项目:国家电网有限公司科技项目(521A217000F)

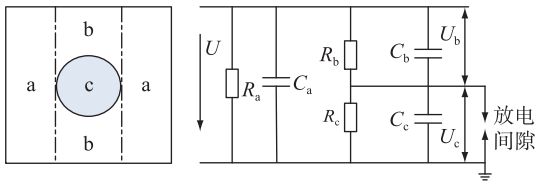


图1 气隙局放三电容等效电路

Fig.1 The three capacitances equivalent circuit of internal gas partial discharge

如果单纯使用该模型去分析所有类型的局放 UHF 信号积累能量与其放电量的关联性, 具有较大的局限性, 如电晕放电、沿面放电以及悬浮放电等几类常见局放, 其局放机理与气隙放电差别较大, 将影响其校准精确程度。因此, 分析各类局放的有效等效模型以求综合研究各种缺陷的 UHF 信号标定是非常有必要的, 同时进一步对其局放 UHF 信号与放电量的关联准确性及反应绝缘缺陷严重程度的合理性进行验证。

### 1.2 电晕放电缺陷

在局放中, 电晕放电很常见, 其放电性质按外电压大小可分为 2 个阶段。第一阶段: 外加电压低于某个阈值, 放电量与施加的电压几乎无关, 取决于形成电极的形状和尺寸。第二阶段: 外电压超过此阈值, 放电量将随着电流的加大而增加, 与外电压呈正相关, 且受气体压力、气体类型、曲率半径等因素影响。可用图 2 所示两电容模型研究其放电规律。

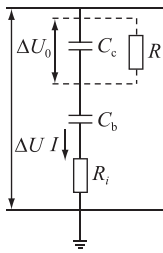


图2 两电容电晕放电等效电路

Fig.2 The two capacitances equivalent circuit of corona discharge

图 2 中,  $C_c$ 、 $C_b$  分别为放电等效电容和其他等效电容, 等效放电电阻  $R \gg C_c$ ,  $C_c \gg C_b$ , 因此计算时一般  $R$ 、 $C_b$  忽略不计。真实放电量  $q = C_c \Delta U_0$  等效于  $q = C_c \Delta U$ 。

假定气隙是理想间隙, 在外电压不变的情况下, 放电部位难以影响等效电容, 即  $C_c$  为常数。

$$C_c = \frac{\varepsilon S}{l} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{l} \quad (1)$$

式中:  $l$  为间隙距离;  $\varepsilon_0$  为真空的介电常数;  $\varepsilon_r$  为气隙中气体相对介电常数;  $\varepsilon$  为气隙相对介电常数;  $S$

为气隙横截面积。由式(1)易知,  $C_c$  由气体类型与间隙参数共同决定, 且电晕放电的视在放电量与真实放电量近似相等。因此, 其 UHF 信号积累能量与放电量的校准准确性较高, 能表征设备缺陷局放严重程度。

### 1.3 悬浮放电缺陷

设备运行过程中, 由于振动等原因会造成设备内部某些部位出现松动, 处在高电压与低电压之间金属零部件, 其对地电位由于阻抗分压的不同, 会形成相对稳定的悬浮电位, 进而导致悬浮放电。悬浮放电的间隙通常固定不变, 其耦合电容值也保持稳定, 属于容性放电, 放电稳定性强。此外, 单次放电具有相对充裕的时间来进行电荷量的转移与中和消散, 能有效避免绝缘放电前一次残余电荷影响下次放电起始电压的情况发生。所以, 当外部电压变大, 只会提高放电频率, 对  $q$  的影响很小, 视在放电量与真实放电量基本保持一致。悬浮类局放具有优质稳定的放电性能, 其 UHF 信号积累能量与真实放电量的校准准确性相对最佳。

### 1.4 沿面放电缺陷

沿面放电相对复杂, 其流注发展、闪络电压高低往往与介质有较大关联, 常在设备绝缘介质边界表面以及金属部件与绝缘介质之间发生, 常用球-板、柱-板、针-板 3 种等效模型分析。球-板等效模型主要研究切线、法线电场共同作用下形成的非均匀电场; 柱-板等效模型主要研究切线方向电场非常强的准均匀场; 针-板等效模型则研究电场法线分量非常强的电场。因此, 按照放电源特性选取相应的模型来研究。沿面放电的特性决定其 UHF 检测量研究的不稳定性, UHF 信号能量与视在放电量的关联准确性相对较低。

### 1.5 试验研究

为进一步验证不同放电源的 UHF 信号能量与其真实放电量校准可靠性并不一致, 针对以上 4 种典型缺陷做了 UHF 信号积累能量与放电量的拟合关联对比试验<sup>[16]</sup>, 实测 UHF 信号的时域波形如图 3 所示。显然 4 种典型缺陷的 UHF 信号强度、脉宽均不相同, 气隙放电、电晕放电、悬浮放电、沿面放电脉宽依次减小, 不同类型的局放机理存在差别, 表征局放强度的真实放电量与视在放电量的差值也不一致。

图 4 为 4 种不同放电源的 UHF 信号能量与视在放电量的试验拟合关系, 试验结果表明: 表征放电整体分散性的拟合优度从低到高依次为沿面放电、悬浮放电、气隙放电、电晕放电; 表征单次放电

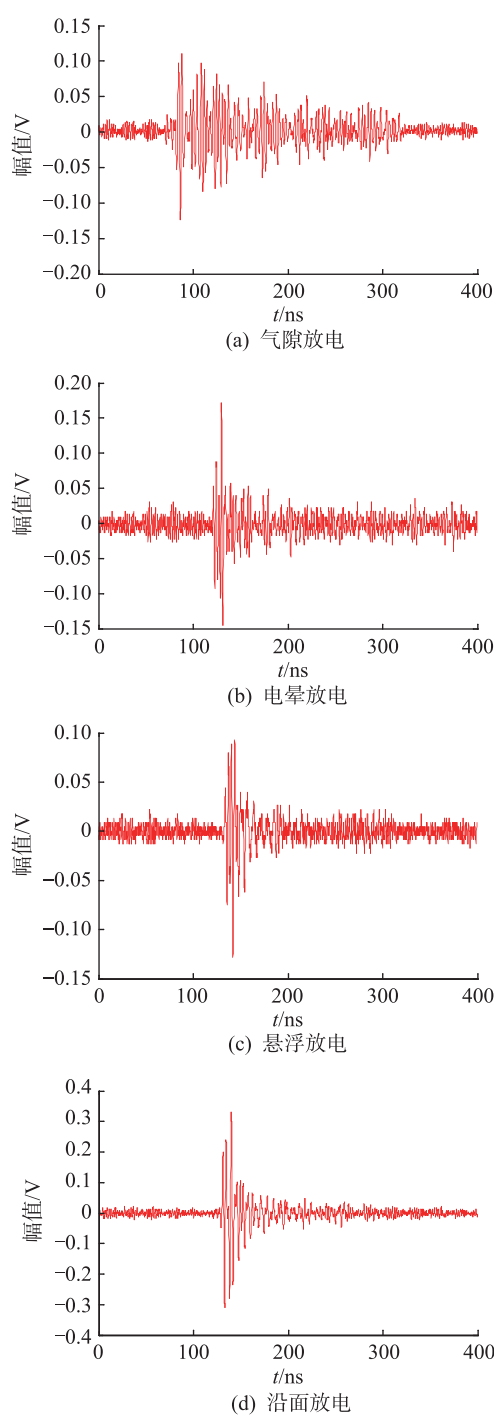


图3 4种典型局放UHF信号

Fig.3 UHF signals of four typical partial discharges

能量的样本观测点围绕样本回归线紧密程度从低到高依次为气隙放电、沿面放电、悬浮放电、电晕放电。

综合以上试验研究与理论分析易得,UHF检测的校准准确性受放电源特性的影响。就UHF信号积累能量与视在放电量关联曲线而言,4种放电源均有较好的对应关系,可用于UHF信号的定量分析,表征局放水平。就4种缺陷视在放电量与真实放电量之间的差值而言,沿面放电与气隙放电的差

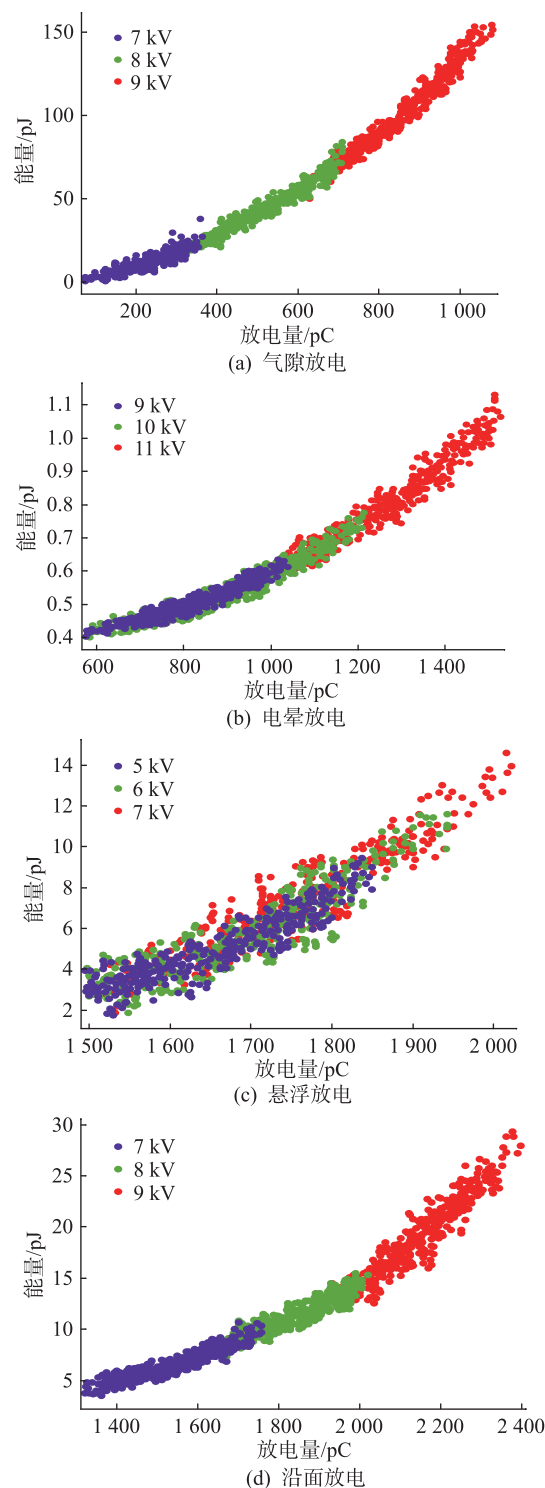


图4 不同放电源UHF信号能量与视在放电量的关系

Fig.4 Relationship between UHF signal energy and apparent discharge quantity of different discharge sources

值不定性较大,即UHF信号能量表征局放水平的可信度需打折扣,而电晕放电与悬浮放电相对可靠,作为中间量的视在放电量可较好描述局放强度,UHF信号能量反映局放水平的可信度较高。因此,定量校准UHF检测信号时,电气设备绝缘缺陷放电源类型须作为重要影响因素进行考察。

## 2 UHF 信号传播特性的影响

UHF 定量检测准确性的最主要决定性因素是其信号的传播与测量,文中使用能便捷、平滑调整主要参数的 UHF 信号发生装置<sup>[22]</sup>分析 UHF 信号的传播与测量规律,搭建图 5 所示试验平台,屏蔽箱参数为  $5.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ ,试验选在深夜进行,将周围噪音及电磁影响降至最低。为保证模拟信号的带宽,发射天线选用  $0.3\sim 1.5\text{ GHz}$  的全向盘锥天线,为检测测量装置的特性,分别选用响应特性各异的微带、单极子、双锥天线来测量信号,定义  $d$  为测量距离,  $\varphi$  为相对测量角度。

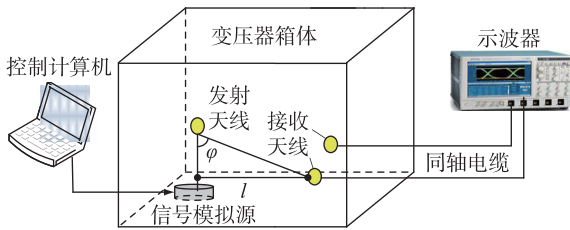


图 5 试验平台  
Fig.5 Test platform

### 2.1 传播距离的影响

UHF 信号有效频域非常宽广,信号能量的衰减不仅取决于传播距离,与频率也密切相关。绝缘缺陷发生局放时分散性、随机性较大,各个频率的 UHF 信号所携带的能量也不尽相同。因此,局放 UHF 信号在各频率点随传播距离的辐射衰减特性对 UHF 定量检测意义重大。

试验中,通过调节测量天线传感器与发射天线的间距,频率间隔为  $0.1\text{ GHz}$ ,测量不同频率 UHF 信号能量随距离的变化,测量结果如图 6 所示。试验选择  $0.3\sim 1.4\text{ GHz}$  的输出信号,对应的信号波长则为  $21.43\sim 100\text{ cm}$ 。电磁波测量有远区场和近场区之分,测距小于一个波长为近区场测量,大于一个波长的区域为远区场测量。图 6 中箭头所标注距离为该频率的电磁远、近测量的临界点。

分析可知,各个频段的 UHF 信号能量衰减主要在近区场,进入远区场则较为平稳。近区场中信号随距离呈断崖式衰减,究其原因是电场与磁场在此区间不均匀度很大,无明确关系,故能量衰减急剧。进入远场区,电磁能量以电磁波形式向外辐射,因而信号衰减相对较慢,信号的衰减呈非线性,不同频率信号的衰减斜率各不相同。总体上,信号的衰减斜率与距离呈负相关,即信号衰减幅度随距离增加而减小;信号进入衰减平稳期(信号能量相对稳定)的距离与频率成负相关,即 UHF 信号随着频率

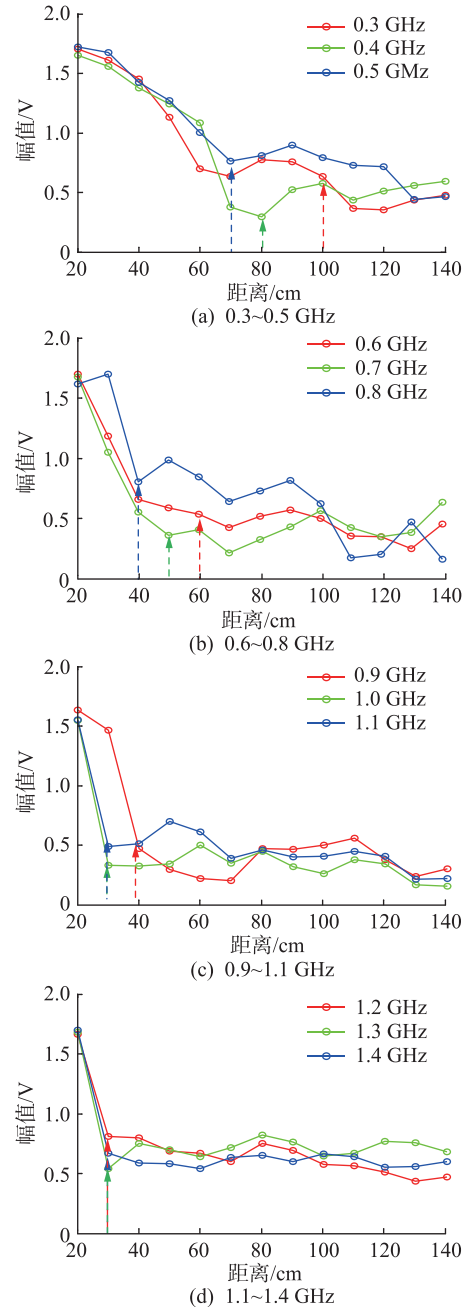


图 6 不同频率下 UHF 信号幅值与传播距离的关系  
Fig.6 The relationship of UHF signal amplitude and measuring distance under different frequencies

的增加,其衰减曲线斜率出现拐点的位置离信号源越近,且当信号频率大于等于某一数值时(大致为  $1\text{ GHz}$ ),其进入平稳期的位置达到最小值。此外,在测量距离最远处信号强度均有一定增幅,其原因是该处接近箱壁,箱体内折反射叠加较强。

### 2.2 相对测量角度的影响

根据天线辐射理论,通常使用球面积分求得测量端信号强度,而积分面积受测量角度影响,因此在 UHF 检测中,放电源与测量天线的相对位置和相对角度变化会影响最终的定量测量,文中试验探究相对测量角度对各频率信号的影响情况,  $0.3\sim 1.5$

GHz 的 UHF 信号波长范围为 0.2~1 m,信号源与检测天线间隔固定为 1.2 m,即保证测量位置始终在远区场,与电力设备实际局放测量类型匹配。

图 7 为根据实测数据绘制的信号强度与相对角度关系,分析易知,测量传感器所获信号能量受相对角度影响较大,角度由 0°向 90°逐渐增大时,测量 UHF 电磁信号强度依次减弱且各频率点信号强度衰减规律基本相同,即 UHF 信号由相对测量角度不同的衰减与其自身频率无关。

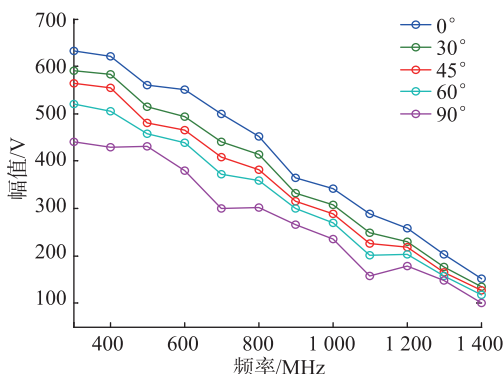


图 7 不同频率下 UHF 信号幅值与测量角度的关系  
Fig.7 The relationship of UHF signal amplitude and measuring angle at different frequencies

### 2.3 传播路径的影响

局放 UHF 信号传递函数的确定对其定量校准极其重要。而影响传递函数的因素除前文所述放电源、传播距离、测量角度以及 2.4 节将要研究的测量传感器之外,还有信号经过各种路径遇到的复杂折反射。发生局放的电气设备或故障部位不同,其信号经过路径结构、介质、阻挡物等将各不相同,会产生大量繁复的折反射,影响传递函数的确定。基于其复杂性,需通过一系列专门的仿真、试验方能系统全面地进行研究。文中通过综合查阅相关文献研究成果来阐述传播路径的影响,并未直接进行研究。通常,发生在 GIS 内的局放,UHF 信号通过 T 型、L 型结构时分别出现 10 dB,6.8 dB 左右的衰减,通过盆式绝缘子有 3.5 dB 左右的衰减,同时信号衰减情况受 GIS 腔体尺寸影响。电力变压器的构造更为复杂,测量传感器不论采用外置式还是内置式,测量端信号都经过相当程度的折反射与绕射,外置传感器还将受到衍射影响。因此,在建立 UHF 检测校准体系时,应将信号的传播路径作为一个重要影响因素来确定传递函数,以保证校准的可靠有效。

### 2.4 传感器特性的影响

测量传感器性能直接决定所测信号的带宽、强度和精度,是测量的最后一个环节,考虑电磁测量的特性,也是最关键的环节。参数特性不同的测量

天线,其测量数据会不尽相同。文中选取微带、单极子和双锥 3 种较有代表性的天线作为检测传感器,通过试验探究天线性能的影响情况。

试验采取远区场测量,保持测距为 1.2 m,试验过程中,发射信号维持 5 V 的强度,天线具体参数见表 1,其增益比对情况见图 8。

表 1 天线性能参数

Table 1 The performance parameters of antenna

天线类型	带宽/GHz	驻波比	增益/dB	方向图	不圆度/dB
双锥天线	0.3~1.5	<2.3	>2	水平全向	<1
单极子天线	0.1~0.4	<2	>1.2	水平全向	<1.8
微带天线	0.34~0.44	<2.1	>5.25	非全向	

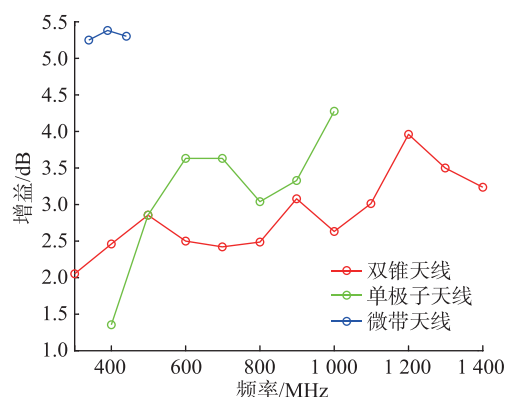


图 8 3 种天线的实测增益对比  
Fig.8 The measured gain comparison of the three antennas

试验结果见图 9。试验表明,在天线带宽内所测量信号稳定且强度高,频带外的信号衰减严重,离频带中心距离越远的频率点,其信号衰减程度越高。带宽决定 UHF 信号检测强度。另外,对比天线实测增益和所测信号幅值的变化规律,关联图 8 和图 9 发现,测量端信号的幅值随频率的变化规律与天线的实测增益曲线相同。

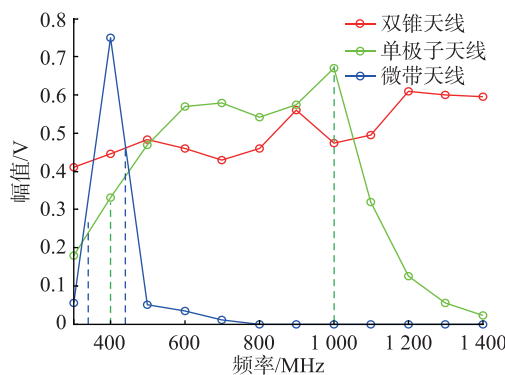


图 9 不同频率下天线测量结果  
Fig.9 The measuring results of antennas at different frequencies

### 3 结论

文中研究典型局放源的放电机理、UHF 信号的传播规律以及天线测量特性,得出以下结论。

(1) 结合 4 种典型实测局放 UHF 信号波形,分析了局放源对 UHF 检测校准可靠性的影响。试验验证了三电容等效模型的适用范围,提出使用两电容等效模型分析电晕放电。

(2) 研究 4 种典型局放 UHF 信号能量与放电量的关联关系,其 UHF 信号积累能量与视在放电量呈较好的二次函数关联,可用于 UHF 信号定量分析,但其校准可靠性不一。其中,电晕、悬浮放电可靠性较高,气隙、沿面放电则相对较差。

(3) 试验研究了 UHF 检测传播特性与测量传感器的影响。结果表明,UHF 信号在近区场急速衰减,进入远区场则基本趋于稳定,且不同频率的 UHF 信号随距离变化的衰减斜率存在差异,UHF 信号自身频率影响其随距离的衰减程度,却不影响其相对测量角度变化的衰减。

(4) 天线的带宽限制 UHF 信号的有效测量频率。有效带宽内测量信号强度变化与天线的增益、驻波比匹配。因此,必须综合考虑各种因素对 UHF 检测校准的影响,确定更加准确合理的校准传递函数,提高校准可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局放检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.  
LI Junhao,HAN Xutao,LIU Zehui,et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2583-2601.
- [2] 宋辉,代杰杰,李喆,等. 运行条件下 GIS 局放严重程度评估方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1231-1241.  
SONG Hui,DAI Jiejie,LI Zhe,et al. An assessment method of partial discharge severity for GIS in service[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(4):1231-1241.
- [3] 李鹏飞,周文俊,杨帅,等. 特高频传感器对局放信号失真的影响因素分析[J]. 高电压技术,2018,44(5):1580-1588.  
LI Pengfei,ZHOU Wenjun,YANG Shuai,et al. Analysis on partial discharge signal distortion phenomenon caused by UHF sensors[J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1580-1588.
- [4] 周玮,张传计,张军,等. 局放 UHF 检测仪校准方法研究[J]. 电测与仪表,2016,53(13):100-106.  
ZHOU Wei,ZHANG Chuanji,ZHANG Jun,et al. Study on calibration method of UHF partial discharge detector[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2016,53(13):100-106.
- [5] JUDD M D,FARISH O,HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1996,3(2):213-228.

- [6] JUDD M D. In-service measurements of UHF attenuation in a gas insulated substation[C]//11th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 99). London, UK. IEE,1999:309-312.
- [7] HOSHINO T,MARUYAMA S,NAKAJIMA T,et al. Development of coaxial-to-waveguide antenna attached outer GIS for detecting partial discharge[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China. IEEE,2008:854-858.
- [8] 刘卫东,金立军,黄家旗,等. 日本 SF<sub>6</sub> 电器局放监测技术研究近况[J]. 高电压技术,2001,27(2):76-77,81.  
LIU Weidong,JIN Lijun,HUANG Jiaqi,et al. Review of recent researches on partial discharge monitoring in gas insulated equipment in Japan[J]. High Voltage Engineering,2001,27(2):76-77,81.
- [9] 王辉,郭志红,云玉新,等. GIS 四种缺陷局放 UHF 信号标定技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):7-13.  
WANG Hui,GUO Zhihong,YUN Yuxin,et al. Research of UHF calibration technique for four kinds of partial discharge defects in GIS[J]. Power System Protection and Control,2012,40(21):7-13.
- [10] KURRER R,FESER K. The application of ultra-high-frequency partial discharge measurements to gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1998,13(3):777-782.
- [11] KANG W,LEE D,HAM S,et al. Development of a UHF partial discharge detection system to estimate the dielectric condition of a medium voltage switchgear[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver,BC,Canada. IEEE,2008:377-380.
- [12] 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.  
ZHANG Xiaoxing,TANG Junzhong,TANG Ju,et al. Relationship between UHF signals and discharge magnitude from typical partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Engineering,2012,38(1):59-65.
- [13] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS 中局放特高频信号与放电严重程度的关联分析[J]. 高压电器,2014,50(9):6-11.  
DINGDengwei,GAO Wensheng,LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and partial discharge severity in GIS[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(9):6-11.
- [14] 卓然,唐炬,张晓星,等. 空气绝缘输电线路中不同气压对 UHF 信号与放电量之间关系的影响[J]. 高电压技术,2014,40(5):1475-1480.  
ZHUO Ran,TANG Ju,ZHANG Xiaoxing,et al. Relationship between UHF signals and discharge quantity under various pressures in air insulated transmission line[J]. High Voltage Engineering,2014,40(5):1475-1480.
- [15] 弓艳朋,彭江,毕建刚,等. GIS 特高频传感器现场校验有效性影响因素[J]. 中国电力,2018,51(12):101-106,113.  
GONG Yanpeng,PENG Jiang,BI Jian'gang,et al. Study on

- factors affecting validity of field calibration of GIS UHF sensors [J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 101-106, 113.
- [16] 刘顺成,王琛,杜林. 变压器油中典型缺陷的局放特高频信号标定[J]. *高电压技术*, 2017, 43(9): 2983-2990.  
LIU Shuncheng, WANG Chen, DU Lin. UHF signals calibration for typical partial discharge defects in transformer oil[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9): 2983-2990.
- [17] 张强,李成榕,刘齐,等. 变压器升高座内部套管局放特高频信号传播特征[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1332-1337.  
ZHANG Qiang, LI Chengrong, LIU Qi, et al. Research on propagation of UHF signals by partial discharges in ascending flanged base[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1332-1337.
- [18] 李清泉,李斯盟,司雯,等. 基于局放的电力变压器油纸绝缘状态评估关键问题分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(8): 2558-2565.  
LI Qingquan, LI Simeng, SI Wen, et al. Analysis of the key problem about insulation condition assessment of oil-paper in power transformers based on partial discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(8): 2558-2565.
- [19] 卢斌先,冯启琨,李晓,等. 考虑金属异物存在时 220 kV 紧凑型 GIS 内电场分布精确分析[J]. *高电压技术*, 2018, 44(11): 3493-3501.  
LU Binxian, FENG Qikun, LI Xiao, et al. Precise analysis on distribution of electric field in 220 kV compact GIS considering metal protrusion[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(11): 3493-3501.
- [20] 周文俊,刘宇舜,李鹏飞,等. 基于特高频法检测电气设备局放的改进 Vivaldi 天线[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(12): 259-267.  
ZHOU Wenjun, LIU Yushun, LI Pengfei, et al. Modified vivaldi antenna applied to detect partial discharge in electrical equipment based on ultra-high frequency method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(12): 259-267.
- [21] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
GUAN Genzhi. *High voltage engineering foundation*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [22] 杜林,刘顺成,杨贤,等. 多参数调节的超高频局放信号模拟源研制[J]. *高电压技术*, 2016, 42(1): 163-171.  
DU Lin, LIU Shuncheng, YANG Xian, et al. Development of UHF signal simulator with multiple adjustable parameters[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(1): 163-171.

作者简介:



刘顺成

刘顺成(1989),男,硕士,工程师,从事电气设备在线监测及故障诊断研究工作(E-mail: cqulsc@foxmail.com);

向加佳(1990),女,硕士,讲师,研究方向为电力系统和电工学方向教学与研究;

陈剑(1974),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电网规划研究工作。

### Calibration influence factors of UHF partial discharge detector

LIU Shuncheng<sup>1,2</sup>, XIANG Jiajia<sup>3</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>, CHENG Yu<sup>4</sup>, XIAO Dehua<sup>5</sup>, CHEN Quanming<sup>5</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Economical and Technical Research Institute, Changsha 410004, China;

2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China;

3. Technical Skills Training Center, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410131, China;

4. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Ningxiang Power Supply Branch, Changsha 410600, China;

5. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Chengbu Power Supply Branch, Shaoyang 422500, China)

**Abstract:** Ultra high frequency (UHF) partial discharge detection technology has been widely used in on-line monitoring of electrical equipment. However, the calibration of UHF method is still not realized until now, because the influence factors of UHF signal on transfer function are complicated. In order to study the calibration influence factors of UHF partial discharge (PD) detector, the discharge mechanism of typical PD defects is analyzed, and the relative experimental research in propagation characteristics and sensor characteristics of UHF signals are performed. It is concluded that significant difference is found between UHF signal energy and discharge capacity of different discharge source for calibration reliability. The calibration curve of corona discharge and suspended discharge represents the severity of equipment insulation defect more accurately, while the calibration curve of internal air gap discharge and dielectric surface discharge does ineffectively. The distance of UHF signal energy decays to stable period decreases with the increase of frequency, and the decay of UHF signal energy is irrelevant to its frequencies by measuring in different directions. Therefore, in order to calibration the UHF signal, it is necessary to consider the specific discharge type and measurement condition comprehensively. The results provide the favorable reference for further studies to build calibration system of UHF measurement, and promote effective application of UHF method in sensor characteristic fault diagnosis and insulation evaluation of electrical equipment.

**Keywords:** partial discharge; ultra high frequency (UHF); signal energy; discharge capacity; propagation characteristic; calibration

(编辑 钱悦)