

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.03.004

基于  $S_{11}$  和  $S_{21}$  互比較的 GIS 局部放电特高频传感器校验仿真王路伽<sup>1</sup>, 房春旭<sup>1</sup>, 杨海涛<sup>2</sup>, 吴兴旺<sup>2</sup>, 胡啸宇<sup>2</sup>, 吴杰<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221018;

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**特高频检测法准确度高且具有故障定位功能。目前气体绝缘组合电器(gas-insulated switchgear, GIS)大多装设特高频在线监测装置用于检测局部放电。为保障检测结果的准确性,需要定期对特高频传感器进行校验。用于在线监测的特高频传感器通常安装在 GIS 的手孔处,无法拆卸,直接测量其实验室的标定指标(如等效高度、动态范围等)十分困难,而通过注入功率信号测量待校核传感器的  $S_{11}$  及其与相邻传感器之间的  $S_{21}$  却比较容易。据此,文中对基于  $S_{11}$  和  $S_{21}$  联合互比較的 GIS 局部放电特高频传感器校验方法进行仿真研究。首先,分析 GIS 特高频传感器校验时等效的  $S$  参数网络和  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  变化特性;其次,建立特高频传感器及典型因素导致的劣化传感器的模型;最后,将上述传感器按照实际情况耦合在不同结构 GIS 的手孔内,仿真得出各类传感器的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  曲线,并通过实验验证仿真模型的准确性。仿真结果表明: $S_{11}$  主要与传感器性能和手孔有关, $S_{21}$  主要与传感器性能和 GIS 结构有关。因此, $S_{11}$  和  $S_{21}$  可作为 GIS 特高频传感器现场校验的指标,通过互比較 GIS 中不同相对应位置的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  可以有效校验传感器的性能。

**关键词:**气体绝缘组合电器(GIS);局部放电;校验;特高频传感器; $S_{11}$ ; $S_{21}$ ;互比較

中图分类号:TM835

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)03-0028-09

## 0 引言

为及时发现潜在的绝缘缺陷,近年来气体绝缘组合电器(gas-insulated switchgear, GIS)大多装设局部放电特高频在线监测系统<sup>[1]</sup>。在更高的供电可靠性和系统安全性的双重要求下,“局放+保护”“局放+声光报警”等利用局部放电信号“吹哨”作为动作逻辑特征的预警是未来发展的必然趋势<sup>[2-4]</sup>。这对局部放电特高频检测系统,特别是检测的核心设备——特高频传感器的准确性和可靠性提出了更高的要求<sup>[5-7]</sup>。为此,研究多维有效的 GIS 在线监测特高频传感器校验方案势在必行。

早期对 GIS 没有特高频在线监测的需求,因此研究方向主要集中于离线校验。离线校验指将传感器从 GIS 上取下,置于实验室特制的校验设备中进行标定,主要包括:采用 TEM 传输线测试特高频传感器的等效高度<sup>[8]</sup>;以同轴腔体为测试环境对传感器进行扫频校验<sup>[9]</sup>;以及基于 GTEM 小室标定特高频传感器的等效高度、特高频检测系统的灵敏度和动态范围<sup>[10-11]</sup>。该校验方案现广泛应用于特高频检测装置的“出厂”和“入网”标定<sup>[12]</sup>。

然而,用于在线监测的传感器通常为内置式,被固定于 GIS 内部手孔处,难以拆卸<sup>[13]</sup>。此外,离

线校验因未能计及 GIS 复杂的结构<sup>[14-15]</sup>和传感器在手孔内的实际工况<sup>[16-18]</sup>,导致误差较大。CIGRE TF15/33.03.05 工作组推荐了一种等效 5 pC 的现场校验方法<sup>[19]</sup>,并写入 IEC 导则。文献<sup>[20-21]</sup>在 GIS 上外接一个扩展腔体,对该腔体加压使其放电以校核监测系统;还有相关研究基于特高频信号和放电量的对应关系对 GIS 的圆盘传感器<sup>[22]</sup>、环形传感器<sup>[23]</sup>及介质窗传感器<sup>[24-25]</sup>进行定量校验。目前有两类现场校验方案应用广泛。一种是基于等效场强的人工脉冲注入校验方法,通过向 GIS 注入模拟局部放电信号的等效脉冲<sup>[26-29]</sup>,根据传感器的输出响应校验其性能<sup>[30-32]</sup>。另一种是测量两传感器之间的  $S_{21}$  参数,根据  $S_{21}$  的变化情况校验特高频传感器<sup>[33-35]</sup>。 $S_{21}$  是 GIS 两特高频传感器之间的频域传递函数(频响曲线),是反映特高频信号在两传感器间传播时经过 GIS 实际结构的固有参数,与注入信号无关。然而, $S_{21}$  是一个复数,实际校验时测试的  $S_{21}$  只是其实部,难以全面准确地评估传感器性能。 $S_{11}$  是特高频传感器在手孔耦合特性的固有参数,是传感器性能变化的本质原因,具有较高的灵敏度,同样可以作为现场校验的考核指标。

基于  $S_{11}$  和  $S_{21}$  互比較的 GIS 特高频传感器校验方法,是在额外测试传感器  $S_{11}$  的基础上,相互比较 GIS 不同相中对应位置传感器的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  在检测频带范围内的均值。该方法能够有效反映出仅

收稿日期:2025-08-18;修回日期:2025-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207180)

测试  $S_{21}$  无法发现的传感器缺陷,从而提高校验结果的准确性和灵敏性。文中建立了特高频传感器及常见因素导致性能下降的典型劣化传感器仿真模型。为模拟真实现场校验情况,将各个传感器耦合于不同结构的 GIS 手孔处,仿真研究  $S_{11}$  和  $S_{21}$  参数的基本特性以及该校验方法的可行性。

## 1 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 联合校验分析

### 1.1 S 参数网络

S 参数网络如图 1 所示,其为在网络各端口接匹配负载的条件下定义的散射参数,用于描述传输通道的频域特性。S 参数包含  $S_{11}$ (即输入信号的回波损耗)、 $S_{22}$ (即输出信号的回波损耗)、 $S_{21}$ (即双端插入损耗)和  $S_{12}$ (即隔离度)。



图 1 S 参数网络

Fig.1 S-parameter network

根据电磁波理论,有:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $a_1$  为归一化入射波的折射量;  $a_2$  为归一化入射波的反射量;  $b_1$  为归一化发射波的反射量;  $b_2$  为归一化发射波的折射量。

端口 2 接匹配负载时,  $a_2$  为 0, 式(1)可变形为:

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \\ S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \end{cases} \quad (2)$$

用于在线监测的特高频传感器常以内置方式安装在手孔处。以传感器  $C_1$  和  $C_2$  为例, GIS 特高频传感器现场校验时的波过程如图 2 所示。天线具有互易性,即同一个天线既可以注入功率信号激发特高频电磁波,也可以注入特高频电磁波耦合功率信号。因此,可将待校核传感器  $C_1$  作为发射传感器,将  $C_1$  相邻的传感器  $C_2$  作为接收传感器。

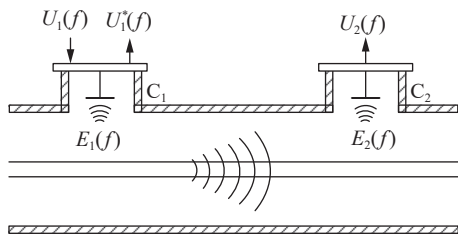


图 2 GIS 校验时的波过程

Fig.2 Wave process during GIS verification

向  $C_1$  注入功率信号  $U_1(f)$ ,  $C_1$  会激发特高频电磁波  $E_1(f)$ 。  $E_1(f)$  有一部分在手孔处形成驻波,另一部分作为行波在 GIS 腔体内传播。传感器  $C_1$  接收到自身激发的驻波后输出反射信号  $U_1^*(f)$ ; 而行波在 GIS 腔体内传播时发生多次折射、反射和叠加,到接收传感器  $C_2$  时已衰减成  $E_2(f)$ ,  $C_2$  接收到衰减的电磁波  $E_2(f)$  后输出电压  $U_2(f)$ 。

上述波过程可等效为图 1 的 S 参数网络。其中,注入传感器  $C_1$  的馈电端子为图 1 中的端口 1,  $U_1(f)$  视为  $a_1$ ,  $U_1^*(f)$  视为  $b_1$ ; 而接收传感器  $C_2$  的馈电端子为端口 2,  $U_2(f)$  视为  $b_2$ 。则根据式(2)可将 GIS 特高频传感器校验时  $C_1$  的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  实部定义为:

$$\begin{cases} S_{11} = 20 \lg \frac{U_1^*(f)}{U_1(f)} \\ S_{21} = 20 \lg \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 变化机理

不计及信号泄露与能量损失时,入射 GIS 腔体的特高频电磁波应等于其反射量与辐射量的相量和。表征反射特性的  $S_{11}$  相量和辐射特性的  $S_{21}$  相量在频域有如下关系:

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1 \quad (4)$$

现场校验时测试的 S 参数类似于频域的传递函数,均只反映物体的固有属性。 $S_{11}$  主要与传感器自身性能及手孔尺寸有关,由电磁波的驻波引起,反映特高频传感器在手孔中的工作性能;  $S_{21}$  主要与传感器自身特性和 GIS 腔体结构有关,由电磁波的行波引起,反映传感器接收来自腔体远端特高频信号的性能。由于手孔和腔体结构在校验时不可能发生变化,实际校验中  $S_{11}$  和  $S_{21}$  的变化可主要归因于传感器性能下降。若传感器性能下降,向该传感器注入信号时,反射量会增加而辐射量减少,其在自由空间处的  $S_{11}$  会不同程度增大,进而导致校验时传感器手孔处测试的  $S_{11}$  也随之增大。由式(4)可知,此时  $S_{21}$  会减小。

S 参数是相量,为复数形式,而实际校验时使用网络分析仪测试得到的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  频谱均为实部。当用网络分析仪仅测试  $S_{21}$  时,可能因其虚部变化较大而实部变化不大,导致结果不明显而漏检。因此,有必要同时测量一个传感器的  $S_{11}$  和该传感器与其相邻传感器的  $S_{21}$ , 再进行综合判断。

### 1.3 基于 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 联合互比較的校验方法

基于  $S_{11}$  和  $S_{21}$  联合互比较校验方法的核心是

GIS上安装的特高频传感器具有三相对称性。由于GIS的A、B、C相是对称的,若传感器均正常,则在不同相中对应位置测得的 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 曲线相似,计算得到的均值也相近。然而,若存在性能下降的传感器,由上述分析的 $S$ 参数变化理论,相比于其他两相,劣化传感器的 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 中至少有一个会发生明显的变化。

开始校验前,将网络分析仪校准至0 dBm。用射频线缆连接网络分析仪、待校验传感器以及待校验传感器的相邻传感器,向待校验传感器注入功率信号,测量该传感器的 $S_{11}$ 和两传感器之间的 $S_{21}$ 。在完成该相测试后,重新接线测量另外两相对应位置的 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ ,并由式(5)计算各相 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 的均值 $\bar{S}_{11}$ 、 $\bar{S}_{21}$ 。最后在A、B、C三相之间互相比对 $\bar{S}_{11}$ 和 $\bar{S}_{21}$ 。该校验方法流程如图3所示。

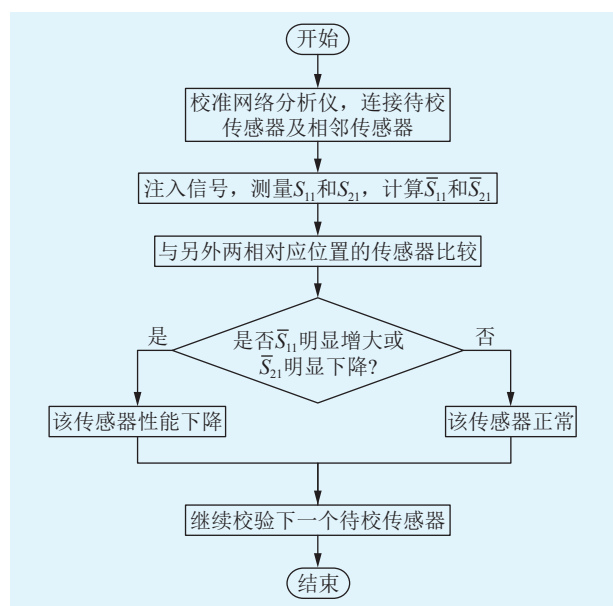


图3 基于 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 互比对的特高频传感器校验流程  
Fig.3 Ultra-high frequency sensor verification process based on  $S_{11}$  and  $S_{21}$  cross-comparison

$$\begin{cases} \bar{S}_{11} = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{11} \\ \bar{S}_{21} = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{21} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_{\min}$ 为校验时扫频的最低频点; $f_{\max}$ 为扫频的最高频点。

## 2 基于 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 互比对校验仿真分析

为验证 $S$ 参数的变化特性以及基于 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 互比对校验的可行性,在CST Studio Suite中建立特高频传感器及各类典型的劣化传感器模型,并将模拟的各传感器以内置的方式耦合在直腔体和L腔体的GIS手孔处,对各GIS特高频传感器校验的仿真结果进行互比分析。

## 2.1 特高频传感器模型

特高频传感器本质上是一个工作频带在0.3~2 GHz之间的超宽频天线,可接收该频带的电磁波并将其转化为电压信号。文中采用工程中常用的阿基米德螺旋天线构建特高频传感器模型,包括螺旋、基板以及馈电巴伦三部分。

天线螺旋由两条阿基米德螺线构成,其矢径长度随着角度的增大线性增加。数学模型为:

$$\begin{cases} r_1 = r_0 + \alpha\varphi \\ r_2 = r_1 + \alpha\varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中: $r_1$ 、 $r_2$ 为两个线臂上任意一处至坐标中心的距离; $r_0$ 为螺旋的内径; $\alpha$ 为螺旋率; $\varphi$ 为螺旋转过的角度。

根据阿基米德螺旋天线的辐射性质,螺旋的内径 $r_0$ 由天线工作的最高频率(最小波长 $\lambda_{\min}$ )确定,螺旋外径 $r_M$ 由最低频率(最大波长 $\lambda_{\max}$ )确定,一般取值依据为:

$$\begin{cases} 2r_0 < \lambda_{\min}/4 \\ 2\pi r_M > 1.25\lambda_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

考虑到GIS对内置天线小型化的要求,需要在式(7)的基础上减少天线的外径。内径和外径会影响天线的阻抗特性和馈电巴伦的安装,通过仿真调试和优化确定天线的内径和外径,并进一步根据阿基米德天线辐射面参数的关系式确定圈数 $N$ 等参数。巴伦曲线采用对数形式。文中按照表1所示参数建立特高频传感器模型 $C_1$ 。仿真模型如图4所示。

表1 传感器 $C_1$ 参数设置  
Table 1 Parameter setting for sensor  $C_1$

参数	数值
螺旋内径 $r_0$ /mm	5
螺旋外径 $r_M$ /mm	83
螺旋圈数 $N$	3.7
螺旋厚度 $D$ /mm	0.035
基板半径 $r$ /mm	90
基板厚度 $d$ /mm	0.15
基板相对介电常数 $\epsilon_r$	4.6

对大量性能下降的特高频传感器的测试研究表明,传感器劣化的主要原因包括老化、锈蚀、故障等。老化是在线监测特高频传感器劣化的最常见原因。天线在长期持续工作下,其理化性质会发生改变,在仿真中,可通过增大天线的螺旋和基板的相对介电常数,模拟该部分因受热而导致的电特性变差。少部分特高频天线的螺线出现锈蚀,影响天线的阻抗特性和工作频带,可通过调节螺线的线

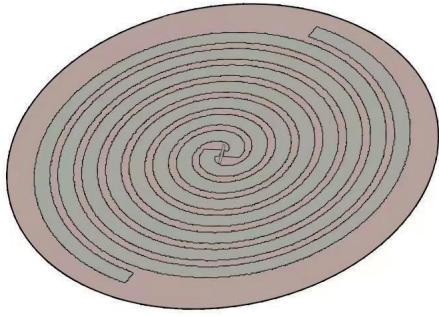


图4 特高频天线仿真模型正面  
Fig.4 Front of ultra-high frequency antenna simulation model

宽和圈数,模拟该部分因锈蚀而失去作用。传感器故障导致馈电口没有足够的电流流过,难以激发充足的电磁波。因此,传感器故障可以通过断开天线的馈电口等效模拟。

根据上述对劣化特高频传感器的模拟方法以及实际劣化传感器的参数特征,在特高频传感器  $C_1$  的基础上调试部分参数,建立典型的老化模型  $C_2$ 、锈蚀模型  $C_3$  和故障模型  $C_4$ 。各劣化传感器的参数调整如表2所示。

表2 各种典型劣化传感器参数调整  
Table 2 Parameter adjustment for each typical deteriorated sensor

传感器编号	参数调整
$C_2$	基板局部的相对介电常数增大至6
$C_3$	螺旋圈数 $N$ 减小至1.7
$C_4$	断开天线的馈电口

在上述模型的基础上,将天线的馈电口设置为波端口。由于能量密度主要集中在 1.5 GHz 及以下,设置仿真频率为 0.3~1.5 GHz。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  在自由空间中仿真得到的  $S_{11}$  曲线如图5所示。

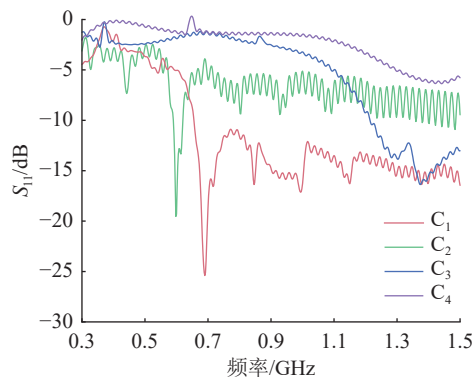


图5 不同性能传感器的  $S_{11}$   
Fig.5  $S_{11}$  of sensors with different performances

由图5可知,  $S_{11}$  在不同频点差异较大且有一定振荡。这主要是因为特高频传感器在不同频率有

不同的特性。 $S_{11}$  曲线有一最低值,该频点为该传感器的谐振点。

$C_1$  在 0.65 GHz 及以上频带的  $S_{11}$  均小于 -10 dB,其性能满足工程应用的要求。 $C_2$  因局部相对介电常数的调整而无法产生相等反相的电流,激发的电磁波不充分,相比  $C_1$  整体性能较差。 $C_3$  由于圈数减少,有效工作频带发生变化,检测频带内  $S_{11}$  显著上升。 $C_4$  由于馈电口断裂,馈电性能严重下降,全频带能够有效辐射的电磁波大量减少。按式(5)计算检测频带内的均值,计算结果汇总于表3。

表3 各传感器模型的  $\bar{S}_{11}$   
Table 3  $\bar{S}_{11}$  for each sensor model

传感器编号	$\bar{S}_{11}/\text{dB}$
$C_1$	-11.343
$C_2$	-6.607
$C_3$	-5.459
$C_4$	-2.315

由表3数据可知,由于各劣化传感器  $S_{11}$  曲线增大,其均值必然增大。 $\bar{S}_{11}$  可作为辨识传感器性能的特征参数。

## 2.2 GIS 特高频传感器校验模型

仿真模拟 500 kV GIS 中最常见的直腔体和 L 腔体结构。为减少电磁波泄露,在 GIS 的两端设置盆式绝缘子以封闭腔体。在 GIS 外壁打通手孔 A 和 B,并将传感器耦合于手孔处,传感器的接受面需朝向 GIS 腔体。为不引起腔体原有电场畸变,传感器接受面不得低于 GIS 外壁。

将 GIS 高压导杆的内径设置为 100 mm,外径设置为 500 mm,外壁壳体厚度设置为 10 mm,两传感器在 GIS 中的距离均为 2 000 mm。外壳和内导体的材料均设置为理想电导体(perfect electric conductor, PEC),盆式绝缘子材料设置为环氧树脂。仿真模型如图6所示。

将特高频传感器  $C_1$  始终置于手孔 A 处,在另一个手孔 B 处分别放置  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$ ,可得到 4 个不同的直腔体校验模型和 L 腔体校验模型。向手孔 B 输入相同的功率信号,分别测试直腔体和 L 腔体的 4 个模型手孔 B 处传感器的  $S_{11}$  和两传感器间的  $S_{21}$  曲线。由于各个传感器性能不同,激发的行波与 GIS 内的波过程不同,各 GIS 模型可分别得到各性能下降传感器的  $S_{11}$  曲线以及正常传感器与各性能下降传感器之间的  $S_{21}$  曲线。

端口和仿真频率设置与天线仿真设置相同。边界条件设置为开放边界,采用时域全波仿真。直



图6 GIS各特高频传感器校验模型  
Fig.6 GIS model for each ultra-high frequency sensor verification

腔体 GIS 手孔 B 处的传感器  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  的  $S_{11}$  如图 7 所示。 $C_1$ - $C_1$ 、 $C_2$ - $C_1$ 、 $C_3$ - $C_1$  和  $C_4$ - $C_1$  等两个传感器间的  $S_{21}$  如图 8 所示。

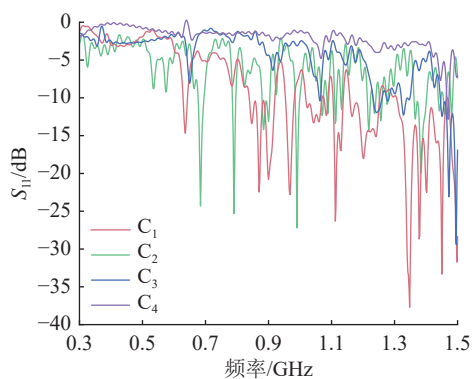


图7 直腔体 GIS 中各传感器的  $S_{11}$   
Fig.7  $S_{11}$  for each sensor in straight cavity GIS

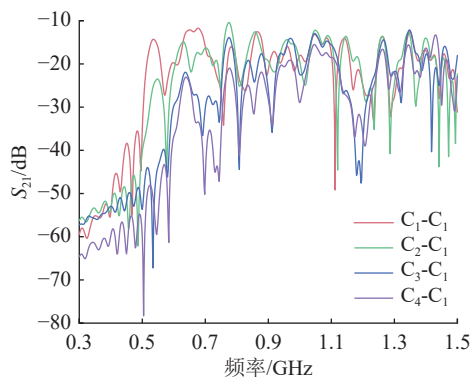


图8 直腔体 GIS 中各传感器之间的  $S_{21}$   
Fig.8  $S_{21}$  between each sensor in straight cavity GIS

根据图 7 的  $S_{11}$  和图 8 的  $S_{21}$ ，按式(5)计算检测频带内的均值，计算结果汇总于表 4。

对于 L 腔体 GIS，手孔 B 处的传感器  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  的  $S_{11}$  如图 9 所示。 $C_1$ - $C_1$ 、 $C_2$ - $C_1$ 、 $C_3$ - $C_1$  和  $C_4$ - $C_1$  等两个传感器间的  $S_{21}$  如图 10 所示。

表 4 直腔体 GIS 中各传感器的  $\bar{S}_{11}$  和  $\bar{S}_{21}$

Table 4  $\bar{S}_{11}$  and  $\bar{S}_{21}$  for each sensor in straight cavity GIS 单位: dB

传感器编号	$\bar{S}_{11}$	$\bar{S}_{21}$
$C_1$	-9.264	-24.513
$C_2$	-6.382	-25.681
$C_3$	-4.610	-29.520
$C_4$	-2.052	-33.441

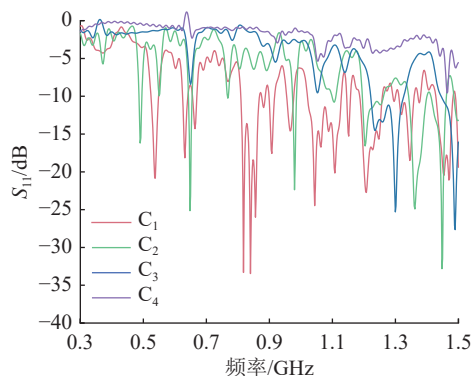


图9 L腔体 GIS 中各传感器的  $S_{11}$   
Fig.9  $S_{11}$  for each sensor in L-cavity GIS

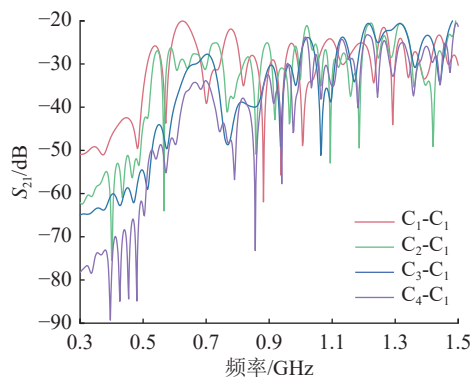


图10 L腔体 GIS 中各传感器之间的  $S_{21}$   
Fig.10  $S_{21}$  between each sensor in L-cavity GIS

同理，将 L 腔体各特高频传感器的  $\bar{S}_{11}$  和传感器之间的  $\bar{S}_{21}$  汇总于表 5。

表 5 L 腔体 GIS 中各传感器的  $\bar{S}_{11}$  和  $\bar{S}_{21}$

Table 5  $\bar{S}_{11}$  and  $\bar{S}_{21}$  for each sensor in L-cavity GIS 单位: dB

传感器编号	$\bar{S}_{11}$	$\bar{S}_{21}$
$C_1$	-9.584	-31.995
$C_2$	-6.544	-34.451
$C_3$	-4.618	-37.168
$C_4$	-1.888	-41.973

对表 4 和表 5 计算的数据进行分析：

(1) 用于在线监测的特高频传感器耦合于手孔处时，由于手孔近似等效为圆形波导，对于  $S_{11}$  具有

“高通”特性,而低频段在手孔内反复折反射,  $S_{11}$  有明显的上升。相比自由空间,传感器在手孔内工作时低频性能会恶化。

(2) 当特高频传感器性能下降时,该传感器对信号的有效辐射能力减弱而反射信号增多,自由空间的  $\bar{S}_{11}$  上升,进而导致传感器在手孔内的  $\bar{S}_{11}$  也会上升。 $S_{11}$  可作为现场校验的指标。受无源互易  $S$  参数网络的限制,该传感器与相邻传感器之间的  $\bar{S}_{21}$  必然下降。 $S_{21}$  可作为现场校验的指标。

(3) 由于  $S$  参数是相量,校验时所测的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  均为实部,若单独将  $S_{11}$  或  $S_{21}$  作为校验指标,当特高频传感器性能下降时,可能出现其实部变化不大的情况,进而影响校验结果的准确性。因此在校验时应同时互比较传感器的  $\bar{S}_{11}$  和  $\bar{S}_{21}$ 。综合  $\bar{S}_{11}$  上升或  $\bar{S}_{21}$  下降的情况,即使另一个  $S$  参数指标变化不大,也应该进一步检查该传感器。

(4) 安装于直腔体和 L 腔体 GIS 中的传感器的  $\bar{S}_{11}$  变化都很小, L 腔体 GIS 传感器间的  $\bar{S}_{21}$  相比直腔体相同模型的传感器间的  $\bar{S}_{21}$  下降了约 8 dB。这是因为行波在经过 L 型结构的拐弯时会有较大的衰减。在传感器相同的情况下,  $S_{11}$  主要与手孔结构有关,而  $S_{21}$  主要与传感器间 GIS 的结构有关。因此,  $S_{11}$  还可以校验少部分不对称 GIS 结构或多传感器劣化的情况。

### 2.3 仿真模型验证

为验证所建立仿真模型的正确性,选择某 500 kV GIS 中一个典型的 L 型气室,用网络分析仪实测该 L 型气室 A、B、C 三相特高频传感器的  $S_{11}$  和  $S_{21}$ 。记录实测波形如图 11 和图 12 所示。

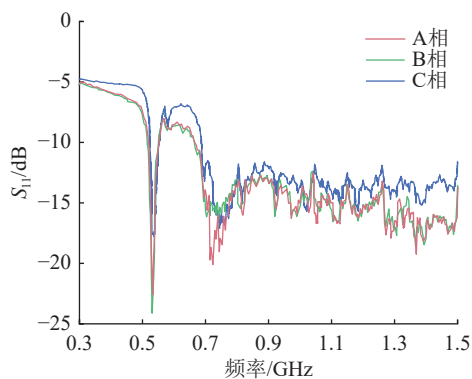


图 11 实测三相 GIS 中传感器的  $S_{11}$

Fig.11 Measured  $S_{11}$  of sensors in three-phase GIS

实测的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  与仿真得到的波形基本类似,但由于现场存在一定的电磁干扰,曲线振荡相比仿真更加剧烈。 $S_{11}$  在低频段性能较差,且有最低的谐振点; $S_{21}$  在低频段较小,随着频率的增大而增大,到

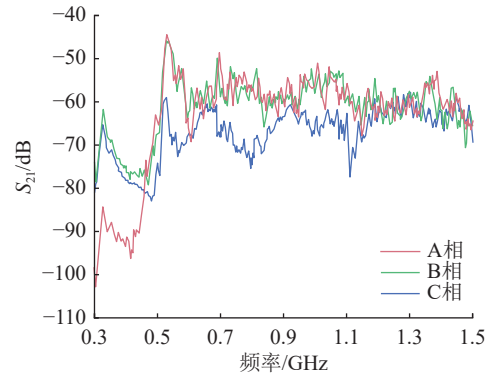


图 12 实测三相 GIS 中传感器之间的  $S_{21}$

Fig.12 Measured  $S_{21}$  between sensors in three-phase GIS

达最高点后开始下降并不断振荡。而  $S_{21}$  整体较低的原因是实际的 GIS 中两个相邻传感器间隔较远,双端插入损耗更大。

将实测的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  均值计算结果汇总于表 6。

表 6 实测三相 GIS 中传感器的  $\bar{S}_{11}$  和  $\bar{S}_{21}$

三相	$\bar{S}_{11}$	$\bar{S}_{21}$
A相	-14.246	-62.270
B相	-14.007	-61.253
C相	-12.386	-67.003

单位: dB

根据 1.3 节提出的校验流程分析:该 L 型气室 GIS 中 A 相、B 相特高频传感器的  $\bar{S}_{11}$  和  $\bar{S}_{21}$  彼此较为接近。然而, C 相传感器的  $\bar{S}_{11}$  相比 A 相增大了 13.06%, 相比 B 相也增大了 11.57%。C 相传感器之间的  $\bar{S}_{21}$  相比 A 相减小了 7.60%, 相比 B 相减小了 9.39%。因此,该气室 C 相的传感器性能可能下降。将该特高频传感器从 GIS 拆卸后进一步检查,该传感器确实发生老化,进而与手孔处的波阻抗匹配不佳。

### 3 结论

文中搭建的仿真模型验证了 GIS 特高频传感器校验时  $S_{11}$  和  $S_{21}$  的基本特性。当特高频传感器因老化、锈蚀、短路故障等各种常见因素导致性能下降时,  $S_{11}$  和  $S_{21}$  可作为传感器的特征参量和现场校验指标。由于  $S$  网络参数是相量,当传感器性能下降时,在某些情况下  $S_{21}$  可能变化不大,应同时测量待校传感器的  $S_{11}$  及其与相邻传感器之间的  $S_{21}$ , 综合  $S_{11}$  和  $S_{21}$  变化情况做出判断。利用 GIS 的三相对称性,在传感器正常时,三相对应位置传感器的  $S_{11}$  及  $S_{21}$  应该基本相似,均值接近。当传感器性

能下降时,相较于其他相对应位置的传感器会出现 $\bar{S}_{11}$ 上升或 $\bar{S}_{21}$ 下降。基于 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 互比对的方法可有效校验现场特高频传感器的性能。此外,该仿真模型真实准确,可作为GIS特高频传感器校验后续相关研究的基础。

### 致谢

本文得到国网安徽省电力有限公司科技项目(52120524000S)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 李鹏,毕建刚,于浩,等.变电设备智能传感与状态感知技术与应用[J].高电压技术,2020,46(9):3097-3113.  
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [2] 陶诗洋,冯义,蔡宏伟,等.1 100 kV GIS UHF 在线监测装置传感特性实证研究[J].高压电器,2017,53(7):8-12,18.  
TAO Shiyang, FENG Yi, GAI Hongwei, et al. Empirical study on the sensing characteristics of 1 100 kV GIS UHF online monitoring instruments[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 8-12,18.
- [3] 王珊珊. GIS 局部放电在线监测系统的设计与研究[D].广州:华南理工大学,2023.  
WANG Shanshan. Design and research of GIS partial discharge online monitoring system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [4] 陈刚,郭冲,李平,等.超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升研究综述[J].高压电器,2025,61(6):1-15.  
CHEN Gang, GUO Chong, LI Ping, et al. Review on insulation reliability improvement of EHV/UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(6): 1-15.
- [5] WANG Y F, SUN M, WANG Z, et al. Review of the calibration for partial discharge detectors by electromagnetic and acoustic methods[C]//2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Shanghai, China. IEEE, 2022: 406-410.
- [6] 张伟,方舟,黄钟,等.基于等效距离的GIS局部放电特高频定位方法[J].高压电器,2024,60(8):92-98.  
ZHANG Wei, FANG Zhou, HUANG Zhong, et al. UHF location method of GIS partial discharge based on equivalent distance[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 92-98.
- [7] 徐惠,刘梦娜,刘诣,等.基于插入损耗测量的特高压GIS局部放电特高频信号传播特性研究[J].高压电器,2025,61(10):55-61.  
XU Hui, LIU Mengna, LIU Yi, et al. Research on UHF signal propagation characteristics of UHV GIS partial discharge based on insertion loss measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 55-61.
- [8] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, GAUTSCHI D, et al. UHF partial discharge detection system for GIS: application guide for sensitivity verification: CIGRE WG D1.25[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1313-1321.
- [9] MIER C, RODRIGO MOR A, CASTRO L, et al. Magnetic and electric antennas calibration for partial discharge charge estimation in gas-insulated substations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108226.
- [10] 李端姣,唐志国. GIS 局部放电特高频检测系统标定研究[J].高电压技术,2015,41(10):3348-3354.  
LI Duanjiao, TANG Zhiguo. Research on the calibration of UHF partial discharge detection system in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3348-3354.
- [11] 王昇凡,龚金龙,蒋建玲,等.基于GTEM的局部放电UHF标定的场强溯源研究[J].高压电器,2019,55(2):61-68.  
WANG Yifan, GONG Jinlong, JIANG Jianling, et al. Research of traceability of UHF calibration field strength for partial discharge based on GTEM[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 61-68.
- [12] 陈贤熙.内置式特高频传感器出厂检测方法的研究与应用[J].高压电器,2017,53(12):258-264.  
CHEN Xianxi. Research on delivery test methods of built-in UHF sensors[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 258-264.
- [13] 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 Jiangang, et al. Study on factors affecting validity of field calibration of GIS UHF sensors[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 101-106,113.
- [14] 吴云杰,张宏亮,吴军辉,等.252 kV GIS 局部放电特高频信号在直线和L型结构中传播特性的试验研究[J].高压电器,2022,58(7):223-228.  
WU Yunjie, ZHANG Hongliang, WU Junhui, et al. Experimental research on propagation characteristics of 252 kV GIS partial discharge UHF signal in straight line and L-shaped structure[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 223-228.
- [15] 王彦博,朱明晓,邵先军,等.气体绝缘组合电器中局部放电特高频信号S参数特性仿真与实验研究[J].高电压技术,2018,44(1):234-240.  
WANG Yanbo, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation and experimental research on S parameter characteristics of partial discharge UHF signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 234-240.
- [16] 张国治,韩景琦,刘健彝,等. GIS 局部放电检测天线本体和巴伦共面柔性小型化特高频天线传感器研究[J].电工技术学报,2023,38(4):1064-1075.  
ZHANG Guozhi, HAN Jingqi, LIU Jianben, et al. Research on gas insulated switchgear PD detection antenna body and balun

- coplanar flexible miniaturized ultra-high frequency antenna sensor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(4): 1064-1075.
- [17] 芮逸凡, 王亚林, 周明瑜, 等. 局部放电检测高增益柔性馈电立体螺旋天线的设计与应用[J]. *高压技术*, 2022, 48(5): 1865-1874.
- RUI Yifan, WANG Yalin, ZHOU Mingyu, et al. Design and application of high-gain steric helical antenna with flexible feeding network for partial discharge detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1865-1874.
- [18] 张国治, 张硕, 张晓星, 等. 新型 GIS 局部放电柔性内置阿基米德螺旋天线研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(1): 15-24,40.
- ZHANG Guozhi, ZHANG Shuo, ZHANG Xiaoxing, et al. Research on flexible built-in Archimedes spiral antenna for partial discharge in new type of GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(1): 15-24,40.
- [19] CIGRE WG D1.25. UHF partial discharge detection system for GIS: application guide for sensitivity verification[R]. Paris: CIGRE, 2016.
- [20] 杨勇, 邵先军, 金涌涛, 等. GIS 盆式绝缘子结构对局部放电特高频信号泄漏特性的影响研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(9): 95-101, 108.
- YANG Yong, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Influence of spacers structure on ultra-high frequency partial discharge signal leakage characteristics[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(9): 95-101,108.
- [21] LI T H, RONG M Z, ZHENG C, et al. Development simulation and experiment study on UHF partial discharge sensor in GIS[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(4): 1421-1430.
- [22] SIEGEL M, BELTLE M, TENBOHLEN S, et al. Application of UHF sensors for PD measurement at power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(1): 331-339.
- [23] 王雪莉, 牛博, 赵山川, 等. GIS 分布式特高频传感器的现场行波标定方法[J]. *高压电器*, 2021, 57(1): 165-170.
- WANG Xueli, NIU Bo, ZHAO Shanchuan, et al. Calibration method of distributed UHF sensors of GIS by on-site travelling wave[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(1): 165-170.
- [24] GAO W S, DING D W, LIU W D, 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.
- [25] 董冰冰, 李康, 高常胜, 等. GIS 不同耦合方式下注入脉冲的加权 IMF 局放信号等效性[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 95-103.
- DONG Bingbing, LI Kang, GAO Changsheng, et al. The equivalence of weighted IMF partial discharge signals pulse injection by different coupling modes in GIS[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 95-103.
- [26] 党倩, 崔阿军, 尚闻博, 等. 采用欧式形态距离的负荷曲线近邻传播聚类方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(1): 165-176.
- DANG Qian, CUI Ajun, SHANG Wenbo, et al. Affinity propagation clustering method of typical load curve with euclidean morphological distance[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(1): 165-176.
- [27] 邵先军, 何文林, 王绍安, 等. 特高压 GIS 特高频内置传感器有效监测范围现场测试与评估技术研究[J]. *浙江电力*, 2017, 36(11): 16-22, 50.
- SHAO Xianjun, HE Wenlin, WANG Shaoan, et al. Research on field test and evaluation technique for effective monitoring range of the UHF built-in sensor of UHV GIS[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2017, 36(11): 16-22,50.
- [28] 张宇帅, 隋浩冉, 韩世杰, 等. 一种用于高压电气设备局放超声检测的新型 EFPI 传感器[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 204-209.
- ZHANG Yushuai, SUI Haoran, HAN Shijie, et al. A novel type of EFPI sensor for partial discharge ultrasonic testing of high-voltage electrical equipment[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 204-209.
- [29] 相晨萌, 高树国, 刘宏亮, 等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. *高压电器*, 2024, 60(4): 83-91.
- XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(4): 83-91.
- [30] 李楠, 李松原, 尚学军, 等. 基于交叉比較的 UHF-PD 在线监测装置现场校验方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(4): 100-107.
- LI Nan, LI Songyuan, SHANG Xuejun, et al. A field calibration method for UHF partial discharge on-line monitoring system based on cross-check algorithm[J]. *Electric Power*, 2022, 55(4): 100-107.
- [31] WU X T, HAN X T, ZHANG L, et al. Study on PD detection method in GIS under oscillating impulse voltage based on UHF method[C]//2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Xi'an, China. IEEE, 2017: 305-308.
- [32] 唐志国, 王海青, 何宁辉, 等. 局部放电特高频传感器及系统现场校验与评估技术[J]. *高压电器*, 2018, 54(11): 48-54.
- TANG Zhiguo, WANG Haiqing, HE Ninghui, et al. Field calibration and evaluation of partial discharge UHF sensors and detection system[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(11): 48-54.
- [33] 黎量. GIS 局部放电 UHF 检测系统性能现场校核方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

LI Liang. The site verification method of the partial-discharge detection using the UHF method in GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

- [34] 郑书生, 舒胜文, 陈金祥, 等. 基于传递函数的 GIS 特高频传感器性能对比评价方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 651-655. ZHENG Shusheng, SHU Shengwen, CHEN Jinxiang, et al. Property comparison and evaluation method for ultra-high-frequency sensors installed on GIS based on transfer function [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(2): 651-655.
- [35] 邱虎, 杨旭, 罗传仙, 等. GIS 间歇性局部放电泄漏电磁波检测传感器设计研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 202-209. QIU Hu, YANG Xu, LUO Chuanxian, et al. Design and

research of high sensitive GIS intermittent partial discharge leakage electromagnetic wave detection sensor[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(9): 202-209.

作者简介:



王路伽

王路伽(1992), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备的多物理场建模与状态感知(E-mail: [lujia.wang@cumt.edu.cn](mailto:lujia.wang@cumt.edu.cn));

房春旭(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为 GIS 局部放电特高频检测系统校验;

杨海涛(1988), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备故障诊断工作。

## Simulation of GIS partial discharge UHF sensor verification based on $S_{11}$ and $S_{21}$ cross-comparison

WANG Lujia<sup>1</sup>, FANG Chunxu<sup>1</sup>, YANG Haitao<sup>2</sup>, WU Xingwang<sup>2</sup>, HU Xiaoyu<sup>2</sup>, WU Jie<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221018, China;

2. Research Institute of Electric Power Science, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** Ultra-high frequency (UHF) detection method is highly accurate and has fault localization function. At present, most gas-insulated switchgear (GIS) systems are equipped with online UHF monitoring devices to detect partial discharges. In order to ensure the accuracy of the detection results, UHF sensors need to be verified regularly. UHF sensors used for on-line monitoring are usually installed at the handholes of the GIS and cannot be removed. Measuring laboratory verification indexes (e.g. equivalent height, dynamic range, etc.) of the sensors directly is very difficult. However, it is easier to measure  $S_{11}$  of the sensor to be verified and  $S_{21}$  between it and the neighboring sensors by injecting power signals. Accordingly, this paper presents a simulation study of the GIS partial discharge UHF sensor verification method based on the joint cross-comparison of  $S_{11}$  and  $S_{21}$ . Firstly, the equivalent  $S$ -parameter network and the change characteristics of  $S_{11}$  and  $S_{21}$  during the verification of GIS UHF sensors are analyzed. Secondly, UHF sensors and degraded sensors caused by typical factors are modelled. Finally, the above sensors are coupled in the handholes of different structural GIS according to the actual situation. The  $S_{11}$  and  $S_{21}$  curves of various types of sensors are simulated and the accuracy of the simulation models are verified by experiments. Analyzing the results of this simulation model,  $S_{11}$  is mainly related to the sensor performance and the handhole;  $S_{21}$  is mainly related to the sensor performance and the GIS structure. Therefore,  $S_{11}$  and  $S_{21}$  can be used as indicators for on-site verification of GIS UHF sensors. Then, the performance of the sensors can be effectively verified by cross-comparing  $S_{11}$  and  $S_{21}$  at corresponding positions across different phases of GIS.

**Keywords:** gas-insulated switchgear (GIS); partial discharge; verification; ultra-high frequency (UHF) sensor;  $S_{11}$ ;  $S_{21}$ ; cross-comparison

(编辑 陆海霞)