

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.040

基于 S 参数的 GIS 特高频传感器现场校验方法研究

李康

(思源电气有限公司, 上海 201108)

摘要:特高频法通过传感器检测 GIS 设备故障条件下特高频电磁波信号,若传感器灵敏性出现异常,将导致 GIS 运行稳定性下降。针对此问题,研究基于 S 参数的 GIS 特高频传感器现场校验方法。以一个双端口网络描述 GIS 设备内两个特高频传感器及其间的 GIS 结构,嵌入 S 参数网络,通过测量相邻两传感器间的传递函数,检测 GIS 设备内相同结构位置处特高频传感器的原始单端插入损耗曲线、初始单端插入损耗均值、初始单端插入横向相对误差等,能够获取 GIS 特高频传感器性能及其布置方式,高精度检测 GIS 内置特高频传感器在安装条件下与运行条件下的运行态势。实验结果显示:该方法不受注入脉冲宽度影响,可准确校验传感器灵敏性,提升 GIS 运行稳定性。

关键词: S 参数;GIS;特高频;设备故障现场校验;传递函数

中图分类号:TM835 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)03-0185-05

Research on Field Calibration Method of GIS UHF Sensor Based on S -parameter

LI Kang

(Siyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: UHF method detects UHF electromagnetic wave signal under the condition of GIS equipment failure by sensors. In order to solve the problem of the deteriorating stability of GIS operation caused by abnormal sensitivity of sensors, the field calibration method of GIS UHF sensor based on S parameter is studied. A two port network is used to describe two UHF sensors in GIS equipment and the GIS structure between them. The S -parameter network is embedded. By measuring the transfer function between two adjacent UHF sensors, the original single end insertion loss curve, the average value of initial single end insertion loss and the transverse relative error of initial single end insertion of UHF sensors at the same structure position in GIS equipment are detected, the performance and layout of UHF Sensors in GIS are obtained, and the operation situation of UHF Sensors in GIS under installation and operation conditions is detected with high precision. The experimental results show that the method is not affected by the injection pulse width, and can accurately verify the sensitivity of the sensor and improve the stability of GIS operation.

Keywords: S -parameter; GIS; UHF; field calibration of equipment failure; transfer function

0 引言

当气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated substation, GIS)^[1]发生故障时,将导致局部区域停电,甚至会形成电网大面积瘫痪^[2]。因此,检测 GIS 设备并判断设备故障类别,对确保 GIS 设备与电力系统运行具有重要意义。

特高频(UHF)法通过传感器检测 GIS 设备故障条件下特高频电磁波信号在线监测 GIS 设备局部放电故障,具有灵敏度高、信号衰减小和抗低频干扰能力强等优点^[3],是当前唯一一种实现了 GIS 长期在线监测功能的方法。但该方法在实际应用过程中,受 GIS 设备内置的特高频传感器性能参数与实际应用效果差等影响,有一定概率的

失效或自放电问题,会导致传感器信息漏报、误报^[4]。因此急需研究一种 GIS 特高频传感器现场校验方法,以提升 GIS 设备故障诊断效率,保障其运行安全性与稳定性。

当前 GIS 特高频传感器现场校验普遍使用的方法是在吉赫兹横电磁波(gigahertz transverse electro magnetic, GTEM)小室作传输环境下,依照传感器电压响应与激励场间的相关性表征传感器耦合性能^[5],或在同轴腔体环境下,基于传感器扫频或方波响应获取传感器性能分析结果^[6]。但以上方法在实际应用过程中仅适用于 GIS 特高频传感器内置安装条件下,忽略 GIS 设备内特高频传感器大部分为外置方式安装的实际情况,因此所得结果有一定误差。

作者简介:李康(1988—),男,山东烟台人,工程师,本科,研究方向为海外工程项目管理、设备安装调试技术, benbu16243076@163.com。

作为微波传输过程中的关键参数之一, S 参数可准确表示多端口网络中射频能量的传输和反射特性^[7]。基于此, 本文研究基于 S 参数的 GIS 特高频传感器现场校验方法, 判断 GIS 设备特高频传感器灵敏性, 期望通过所研究方法提升 GIS 设备与电力系统运行的稳定性。

1 GIS 组成及原理

GIS 通常为积木式结构, 是由断路器、母线、隔离开关、大电流发生器等高压电器组合而成的高压配电装置。采用绝缘性能和灭弧性能优异的六氟化硫(SF_6)气体作为绝缘和灭弧介质, 将所有的高压电器元件密封在接地金属筒中。额定电压为 80~500 kV, 额定电流为 1 200~3 500 A。

断路器可水平布置, 负责 GIS 内部电路的通断; 隔离开关用于电路无电流区段的投入和切除; 母线采用单相母线筒, 将每相线封闭在一个筒内, 杜绝发生三相短路的可能性, 可分割为多个气隔; 大电流发生器包括电流互感器和电压互感器, 起到保护电路电流和电压的作用。GIS 设备的基本结构如图 1 所示。

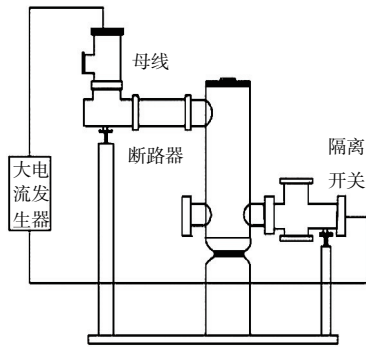


图 1 GIS 设备基本结构

2 GIS 特高频传感器现场校验方法

2.1 S 参数网络嵌入

以一个双端口网络描述 GIS 设备内两个特高频传感器及其间的 GIS 结构^[8]。GIS 设备内多端口网络内射频能量的传输与反射特性可通过 S 参数准确表示。

利用 T 参数矩阵能够确定 GIS 设备内所包含的多个双端口网络级联形式。图 2 为双端口网络级联示意图。

图 2 中 a_i 和 b_i 分别表示端口 i 归一化后的入射波与反射波。依照传输参量矩阵标准, 能够得到:

$$(a_1/b_1) = T_1(b_2/a_2) \quad (1)$$

$$(a'_2/b'_2) = T_2(b_3/a_3) \quad (2)$$

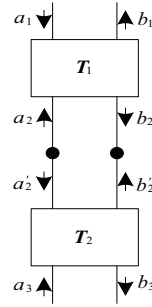


图 2 T 参量级联示意图

由于 a_2 和 b_2 分别与 b'_2 和 a'_2 一致, 因此能够得到:

$$(a_1/b_1) = T_1(b_2/a_2) = T_1(a'_2/b'_2) = T_1T_2(b_3/a_3) \quad (3)$$

基于以上过程能够获取整体传输矩阵, 公式描述如下:

$$T = T_1T_2 \quad (4)$$

在 GIS 内包含 N 个微波网络级联的条件下, 整体传输矩阵等价于不同级联网络传输矩阵的乘积。基于 S 参量同传输参量间存在的转换关系^[9], 可以将 T 参数转换为 S 参数。同时, GIS 设备内特高频传感器双端口网络的插入损耗也可通过上述过程获取。通过确定 GIS 内双端口网络的单端损耗 S_{11} 、 S_{22} 参数和双端损耗 S_{12} 、 S_{21} 参数描述 GIS 特高频传感器插入损耗。

2.2 基于 S 参数的现场校验

1) 特高频信号数据采集过程

受 GIS 设备长度, 内部结构尺寸, 所用材料等因素影响, 令 GIS 特高频传感器信号在 GIS 设备内部传播过程中形成若干次折射、反射或叠加现象。

GIS 设备内部, 特高频传感器信号传播特性具有高度复杂性特征。将图 3 定义为双端口网络, 传感器 C_1 和传感器 C_2 的输入端分别为端口 1、端口 2, 通过网络分析仪能够获取不同频率条件下的两端口间正向传输系数, 即 S_{21} 参数, 由此即可获得传递函数。具体过程如下。

a) 线路连接。以安全性为前提, 完成信号电缆与电源线的连接。

b) 界面设定。校正开始后, 分别设定测量模式、频率以及功率电平范围。

c) 校准通道。以抑制测量误差为目的, 针对

传输插入损耗等的归一化处理。

d) 获取传输系数。连接测试电缆与待测相邻传感器, 获取相邻传递函数曲线。

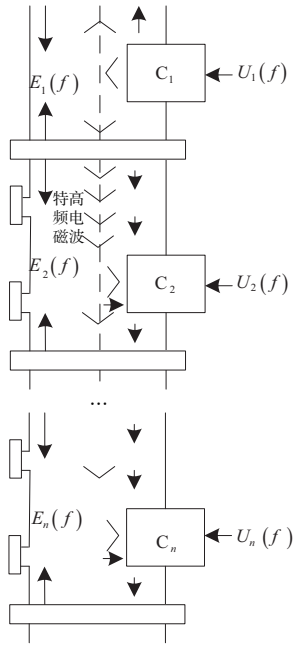


图3 特高频信号传输示意图

通过检测 GIS 设备内相同结构位置处特高频传感器的原始单端插入损耗曲线、 s_{d_0} 、 $s_{d_0, \theta}$ 等, 能够高精度检测 GIS 内置特高频传感器在安装条件下与运行条件下的灵敏性。

2) 特高频信号连接方式

在 GIS 有效运行条件下, 通过上述 S 参数嵌入过程获取 GIS 内三相位置相同的若干个内置特高频传感器初始单端插入损耗曲线^[10], 以此为基础获取初始单端插入损耗均值 s_{d_0} 。依照 s_{d_0} 能够获取初始单端插入横向相对误差 $s_{d_0, \theta}$, 以 s_{d_1} 表示运行单端插入损耗均值, 依照 s_{d_1} 和 s_{d_0} 能够获取运行单端插入损耗纵向相对偏差均值 $s_{d_1, \lambda}$ 。

将任一 $s_{d_0, \theta}$ 值低于提前设定的 A 相值的特高频传感器定义为运行前灵敏性异常的特高频传感器^[11]; 将任一 $s_{d_1, \theta}$ 值低于提前设定值的特高频传感器或 $s_{d_1, \lambda}$ 值高于提前设定的 B 相值的特高频传感器定义为运行后灵敏性异常的特高频传感器。

传递函数为传感器运行态势校验的核心^[12], 以其为基础分析传感器性能及其布置方式, 具体分析过程如下。

在图 3 中, C_1 、 C_2 和 C_n 表示安装于 GIS 设备上的 n 个特高频传感器, 以 f 表示正弦电压频率, $U_1(f)$ 和 $U_2(f)$ 分别表示 C_1 处输入电压信号和 C_2 处输出电压信号, $U_1(f)$ 在 C_1 处和 C_2 处产生的电

磁波强度可分别用场强 $E_1(f)$ 和 $E_2(f)$ 表示, 其中包含折返波所形成的场强^[13]。若特高频传感器 C_1 、 C_2 的传递函数分别为 $H_1(f)$ 和 $H_2(f)$, 两者的计算过程如式 (5) 和式 (6) 所示。

$$H_1(f) = 20 \lg \left(\frac{E_1(f)}{U_1(f)} \right) \quad (5)$$

$$H_2(f) = 20 \lg \left(\frac{U_2(f)}{E_2(f)} \right) \quad (6)$$

以 $H_c(f)$ 表示 GIS 设备腔体的传递函数, 其定义如式 (7) 所示。

$$H_c(f) = 20 \lg \left(\frac{E_2(f)}{E_1(f)} \right) \quad (7)$$

由此可得特高频传感器输出和输入电压信号间的相关性:

$$H_{21}(f) = 20 \lg \left(\frac{U_2(f)}{U_1(f)} \right) = H_1(f) + H_c(f) + H_2(f) \quad (8)$$

考虑 GIS 设备内电磁波散射衰减等因素^[14], 全部传递函数均未超过 0 dB。特高频传感器转换效率同 GIS 设备腔体内电磁波衰减之间成反比例相关, 同特高频传感器灵敏性之间呈正比例相关^[15]。基于此, 利用相邻传感器间传递函数 $H_{21}(f)$ 的检测过程, 能够整体判断传感器布置方式与灵敏性。

3 实验分析

实验为验证本文所研究的基于 S 参数的 GIS 特高频传感器现场校验方法在实际应用中的校验效果, 以某市电力系统 250 kV GIS 设备若干个特高频传感器为研究对象, 采用本文方法进行研究对象现场校验, 所得结果如下。

3.1 校验测试

以 $H_s(f)$ 表示待校核传感器间的传递函数。考虑直接获取 $H_c(f)$ 的难度较大, 因此以 $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 、 $H_c(f)$ 为基础, 直接确定 $H_s(f)$ 的难度也较大, 为此需通过传感器输出不同注入脉冲确定 $H_s(f)$ 。采用本文方法在不同注入脉冲宽度 (15 ns、30 ns 和 60 ns) 条件下获取研究对象传递函数, 所得结果如图 4 所示 (本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

分析图 4 得到, 在注入不同脉冲宽度条件下确定的 $H_s(f)$ 基本相同。以 15 ns 条件下获取的 $H_s(f)$ 为标准, 定量描述不同注入脉冲宽度条件下本文方法获取的 $H_s(f)$ 差异。结果显示, 在注入

脉冲宽度为 30 ns 时获取 $H_s(f)$ 和 15 ns 条件下相比一致度达到 96.7%;注入脉冲宽度为 60 ns 条件下获取的 $H_s(f)$ 和 15 ns 条件下相比一致度达到 98.9%。一致度数据表明传递函数 $H_s(f)$ 不受注入脉冲宽度影响。

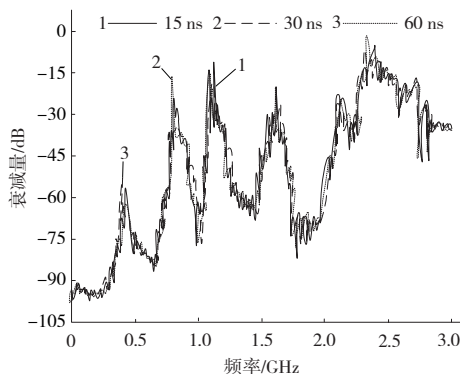


图4 不同注入脉冲宽度条件下的传递函数

3.2 研究对象校核结果

采用本文方法对研究对象实施现场校验,根据式(5)一式(8)计算检测结果与实际情况的一致度,验证其灵敏性,所得结果如表1所示。

表1 研究对象校核结果 单位:%

实验 编号	安装条件下		运行条件下	
	检测结果	与实际情况 一致度	检测结果	与实际情况 一致度
1	灵敏性异常	96.3	灵敏性非异常	97.5
2	灵敏性异常	95.7	灵敏性非异常	96.9
3	灵敏性异常	96.2	灵敏性异常	97.8
4	灵敏性非异常	97.1	灵敏性异常	97.4
5	灵敏性异常	95.8	灵敏性异常	95.9
6	灵敏性非异常	96.5	灵敏性非异常	96.1
7	灵敏性非异常	96.7	灵敏性异常	95.7
8	灵敏性异常	97.3	灵敏性异常	98.2
9	灵敏性异常	97.5	灵敏性非异常	97.3
10	灵敏性非异常	96.8	灵敏性非异常	96.6

分析表1得到,10次实验过程中,本文方法所得校验结果与实际情况一致度均超过95%,说明本文方法与实际情况的一致度较为符合,灵敏性较高,证明本文方法能够有效校验研究对象在不同条件下的灵敏性。

3.3 S_{21} 参数计算

以验证本文方法S参数计算性能为目的,从图3中随机选取5个不同注入脉冲宽度15 ns、30 ns和60 ns条件下的特高频传感器作为目标,

分别定义为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 。网络分析仪带宽范围为9 kHz~4.5 GHz,校准网络分析仪后利用其确定各目标间 S_{21} 参数,对比本文方法 S_{21} 参数计算结果,以此验证本文方法计算精度,结果如图5所示。

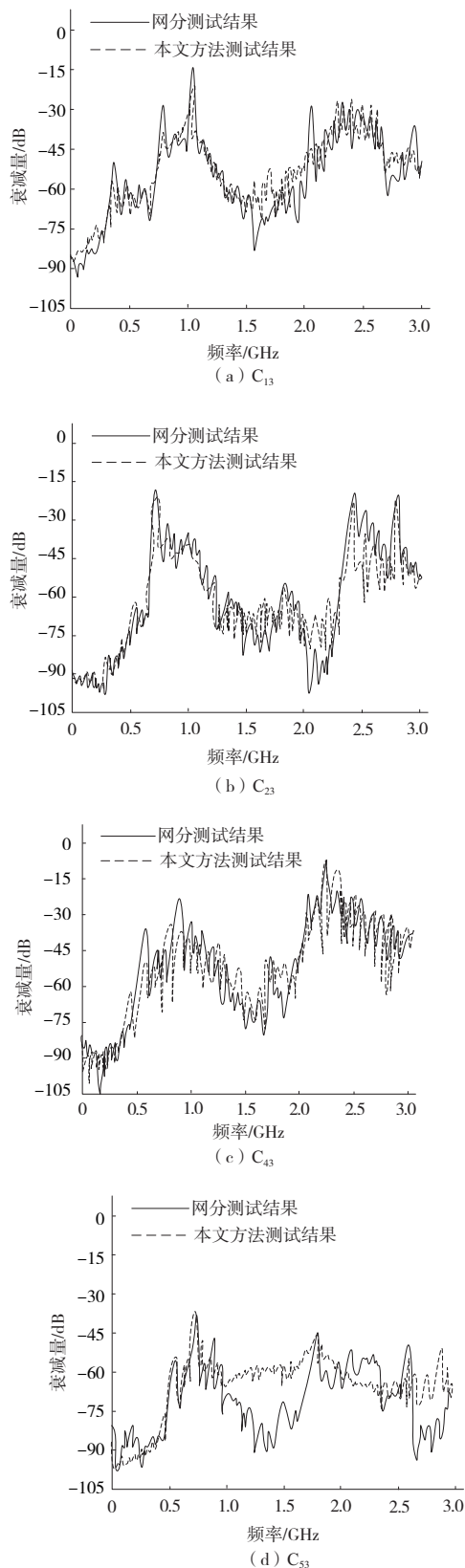


图5 S_{21} 参量与计算结果对比

分析图 5 得到,采用网络分析仪所获取的 C_{13} 、 C_{23} 、 C_{43} 间的 S_{21} 参量频谱同本文方法所获取的传递函数频谱大致相同。在频率低于 1.5 GHz 的条件下,不同方法参量计算结果归一化处理后的一致度计算均高于 83%。对比之下,本文方法对 C_{53} 间的传递函数计算结果同采用网络分析仪所获取的结果具有显著差异,造成这种显著差异的主要原因是注入信号经 GIS 设备腔体后显著衰减。

3.4 校核效果对比

实验为验证本文方法的校核效果,对比上一实验中由研究对象内随机选取的 5 个目标在采用本文方法实施校验前后的灵敏性异常率,所得结果如图 6 所示。

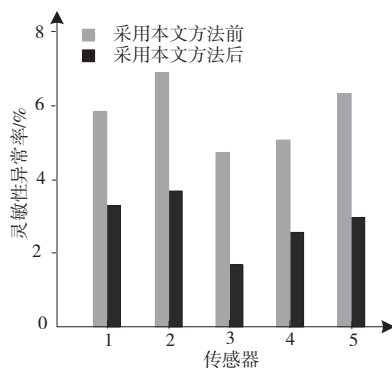


图 6 灵敏性异常率对比结果

由图 6 可知,采用本文方法进行校验后,研究对象内随机选取的 5 个目标灵敏性异常率均呈现不同程度的下降趋势,平均下降幅度达到 50% 以上。其中 3 号目标灵敏性异常率下降幅度最为显著,说明其在未使用本文方法实施校验前存在严重的灵敏性异常问题。实验结果表明:本文方法能够有效解决 GIS 特高频传感器灵敏性异常问题,提升 GIS 运行稳定性。

4 结语

本文研究基于 S 参数的 GIS 特高频传感器校验方法,将 S 参数应用于 GIS 特高频传感器校验过程中,提升传感器校验方法的应用性能。在本文方法后续优化过程中,将主要针对本文方法的校验效率进行优化。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] HAN X, LIU Z, LI J, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2018, 38(22):6760-6768.

[4] 牛博,吴娟,张健,等. 基于行波法的 GIS 局部放电特高频检测标定系统研究[J]. 高压电器,2018,54(11):91-96,102.

[5] 邵先军,朱明晓,刘家齐,等. GIS 内置特高频传感器性能参数的数值仿真与优化设计技术[J]. 高电压技术,2020,46(1):282-291.

[6] 李文真,刘景林,陈双双. 基于高频方波信号注入法的永磁同步电机转子位置检测方法[J]. 电工技术学报,2018,33(24):5821-5829.

[7] 谢志远,杜思思,郭以贺. 基于 S 参数的空气开关高频模型研究[J]. 电测与仪表,2018,55(7):116-121.

[8] LIU J Y, CHEN X G, JIN Y B, et al. A method of optimizing input VSWR of T/R modules based on S-parameter half-in-loop simulation[J]. Fire control radar technology, 2018, 47(3):56-60,65.

[9] 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.

[10] 杨桦菲,朱瑛,刘尔雅. 基于 S 参数法的车载天线耦合度分析[J]. 火力与指挥控制,2018,43(6):62-65.

[11] 胡红钱,施伟峰,卓金宝. 基于 S 函数的船舶电站并网时变参数在线实时仿真[J]. 舰船科学技术,2018,40(11):112-115.

[12] LIANG S, LIU C, TOMIURA Y, et al. Odorant clustering based on molecular parameter-feature extraction and imaging analysis of olfactory bulb odor maps[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 255:508-518.

[13] 韩旭涛,刘泽辉,李军浩,等. 基于光电复合传感器的 GIS 局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22):6760-6768.

[14] 舒胜文,郑闻文,李功新,等. GIS 局部放电 UHF 电磁波传播特性的仿真分析及现场验证[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(1):65-70.

[15] 郁琦琛,罗林根,贾廷波,等. 特高频信号 RSSI 统计分析下的变电站空间局部放电定位技术[J]. 高电压技术,2020,46(12):4163-4171.

收稿日期:2022-08-25