

[开关设备]

特高频局部放电信号在GIS部分典型结构内传播的衰减特性研究

文/西安西电开关电气有限公司 曹沛 张冰冰 黄钟
南方电网超高压输电公司检修试验中心 黎卫国 楚金伟

利用时域差分有限法（FDTD）对UHF信号在其中的传播特性进行了仿真分析，并借助252 kV GIS产品实物和局部放电试验平台进行了实试验证。仿真和实测结果表明：UHF信号在GIS部分典型结构传播时，其衰减量由大到小依次为断路器（合闸状态）>隔离开关（合闸状态）>L形拐角>不通气盆式绝缘子。

气体绝缘金属封闭开关设备（Gas-Insulated metal-enclosed Switchgear, GIS）作为电网中的关键设备，其安全、可靠运行对电网安全意义重大。当GIS中的内部缺陷引发局部放电（以下简称局放）时，会产生ns级的脉冲，该脉冲会激励出频率高达数GHz的特高频电磁波在GIS腔体内传播。UHF（Ultra High Frequency）检测法便是通过检测上述特高频电磁波信号从而对局放进行检测及定位。由于UHF检测法具有抗干扰能力强、灵敏度高特点，现已逐步成为GIS局放检测的主要方法之一并得到广泛应用。

GIS中不同结构会对UHF信号的传播造成不同程度的衰减，从而在UHF检测法的实际应用中给局放强度的定量检测和标定造成影响，这源于对局放激发的UHF信号在GIS不同结构中的传播和衰减特性研究不足。目前已有的研究大多是基于对GIS直腔体、L形拐角、T形拐角和盆式绝缘子等结构进行UHF信号传播特性的仿真计算，而对合闸状态下的断路器和隔离开关等结构却鲜有涉及，并且缺乏充分的试验验证手段。

为了更加贴合工程应用实际，提高UHF检测法准确度及优化局放传感器布点，本文以252 kV GIS为参照，利用时域有限差分法（FDTD）对UHF电磁波信号经过L形拐角、合闸状态下断路器

和隔离开关、不通气盆式绝缘子等结构的衰减特性进行了仿真计算，并借助252 kV GIS产品实物和252 kV GIS母线局放试验平台对仿真计算结果进行了实试验证。

仿真建模及分析

1. 脉冲源设置

本文采用幅值为1 A，脉冲上升时间约为0.15 ns，脉冲宽度约为0.2 ns的高斯脉冲作为脉冲源，其频率范围可覆盖0.3~3 GHz的特高频工作频段。脉冲源波形及频谱如图1所示，高斯脉冲的时域形式为

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中， I_0 是脉冲峰值； τ 是时间常数，决定脉冲的宽度。

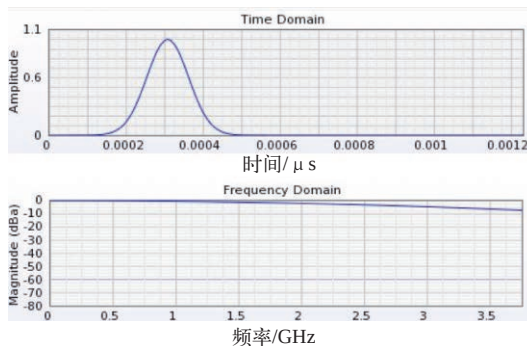


图1 脉冲源波形参数

2. L型拐角

参考西安西电开关电气有限公司生产的252 kV GIS, 在时域有限差分仿真软件XFDTD中建立L形拐角结构仿真模型, 模型包含内导体、外壳和两侧盆式绝缘子等结构, 其中内导体直径135 mm, 外壳内直径340 mm, 外壳壁厚10 mm。采用长度为15 mm的单极探针作为局放源, 其脉冲波形按图1参数设定, 放置于内导体表面局放源S处, 下文各典型结构仿真时的局放源设置与此相同, 如图2所示。模型中内导体、外壳均设为理想导体, 盆式绝缘子使用环氧树脂材料, 外部边界设置为PML匹配层。

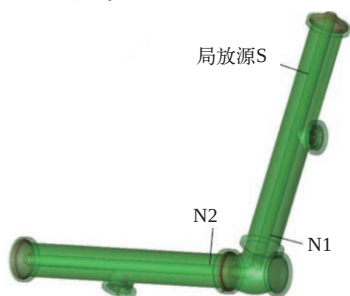


图2 L型拐角局放源与检测点位置示意图

使用时域有限差分法(FDTD)进行仿真计算, 以N1点作为基准, 得到各检测点的场强幅值如图3所示。

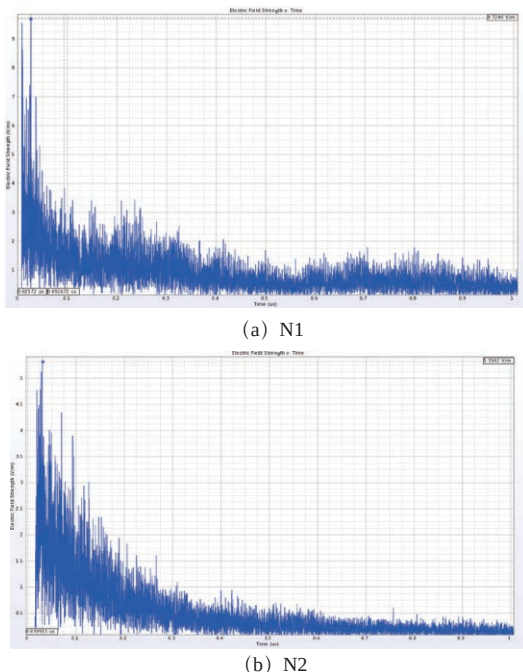


图3 L型拐角各检测点场强幅值仿真计算结果

由图3可知, UHF信号在经过L形拐角结构后, 电场强度幅值由N1点的9.69 V/m变为N2点的

5.31 V/m, 衰减了约5.22 dB。对比已有研究中得到的同电压等级下直腔体衰减(约1.48 dB/m), L形拐角结构对UHF信号的衰减作用更大。

3. 断路器(合闸状态)

建立合闸状态下断路器结构仿真模型, 模型包含内导体、外壳、盆式绝缘子、绝缘喷口和绝缘筒等结构, 其中内导体直径135 mm, 外壳内直径340 mm, 外壳壁厚10 mm, 局放源与检测点的位置如图4所示。



图4 合闸状态下断路器局放源与检测点位置示意图

以N1点作为基准, 得到各检测点的场强幅值如图5所示。

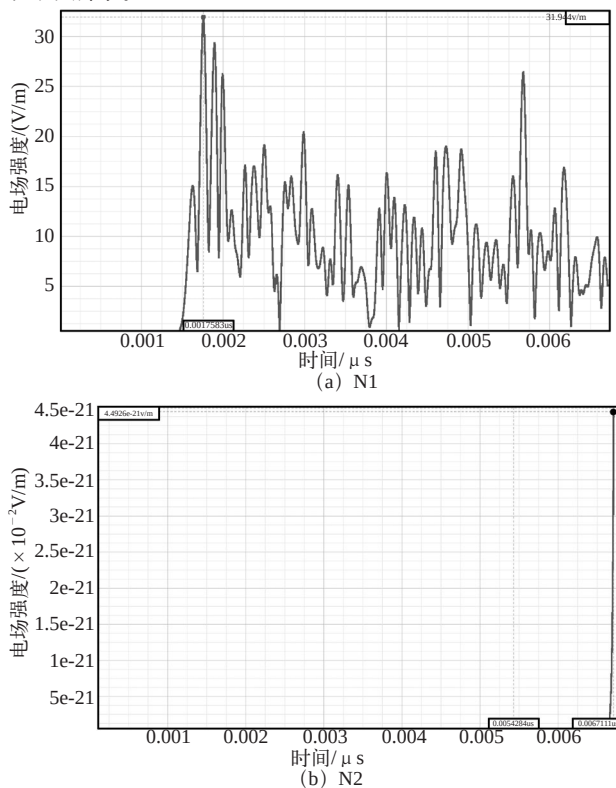


图5 合闸状态下断路器各检测点场强幅值仿真计算结果

由图5可知, UHF信号在经过合闸状态下的断路器时, 电场强度幅值由N1点的31.94 V/m变为N2点的 4.49×10^{-21} V/m, 衰减了约437.04 dB, 表明UHF信号在经过合闸状态下的断路器结构后几乎全部衰减。

4. 隔离开关(合闸状态)

建立合闸状态下隔离开关结构仿真模型, 模

型包含内导体、外壳和盆式绝缘子等结构,其中内导体直径135 mm,外壳内直径340 mm,外壳壁厚10 mm,局放源与检测点的位置如图6所示。

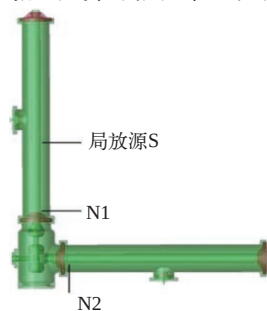


图6 合闸状态下隔离开关局放源与检测点位置示意图

以N1点作为基准,得到各检测点的场强幅值如图7所示。

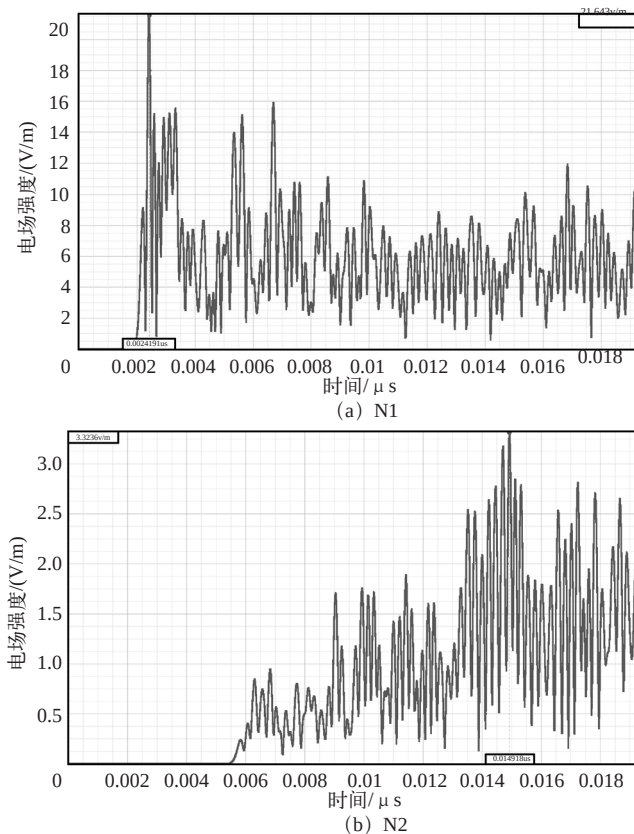


图7 合闸状态下隔离开关各检测点场强幅值仿真计算结果

由图7可知,UHF信号在经过合闸状态下的隔离开关时,电场强度幅值由N1点的21.64 V/m变为N2点的3.32 V/m,衰减了约16.28 dB,表明UHF信号在经过合闸状态下的隔离开关结构后有大幅衰减。

5. 不通气盆式绝缘子

建立不通气盆式绝缘子仿真模型,其中内导体直径135 mm,外壳内直径340 mm,外壳壁厚10 mm,对应局放源与检测点的位置如图8所示。

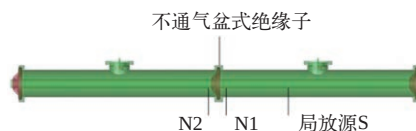


图8 不通气盆式绝缘子局放源与检测点位置示意图

以N1点作为基准,得到各检测点的场强幅值

如图9所示。

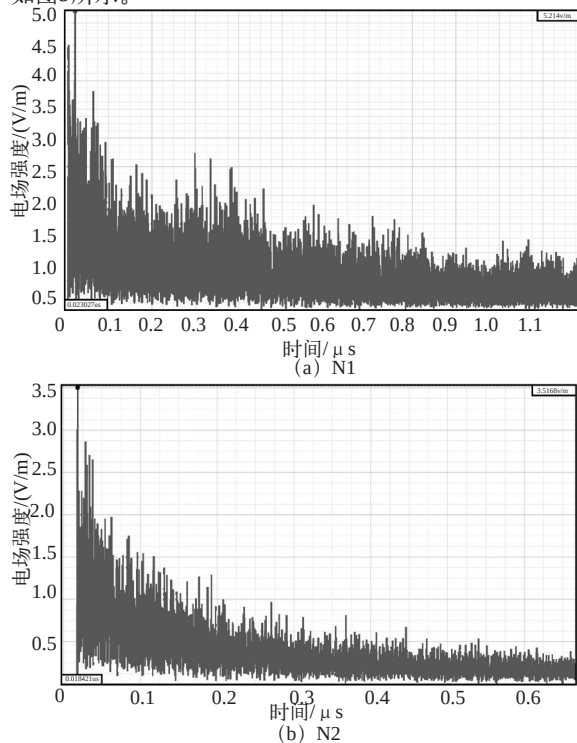


图9 不通气盆式绝缘子各检测点场强幅值仿真计算结果

由图9可知,UHF信号在经过不通气盆式绝缘子时,电场强度幅值由N1点的5.21 V/m变为N2点的3.52 V/m,衰减了约3.41 dB,表明UHF信号在经过不通气盆式绝缘子结构后有小幅衰减。

实测验证

为了验证前述时域有限差分仿真的结果,利用西安西电开关电气有限公司生产的ZF9D-252系列GIS产品和252 kV GIS母线局放试验平台,对UHF信号在经过L形拐角、合闸状态下的断路器和隔离开关、不通气盆式绝缘子等结构的衰减特性进行了实测验证。

ZF9D-252系列GIS的实测布点如图10所示,各气室内部均充有额定压力的 SF_6 气体。使用UHF脉冲发生器模拟局放源,分别从S1、S2点注入模拟局放脉冲,在P1、P2和P3、P4处外接局放测试仪测量信号,信号的注入和测量均通过外置式UHF传感器实现。注入的模拟局放脉冲为上升沿 ≤ 0.3 ns的双指数脉冲,下同。

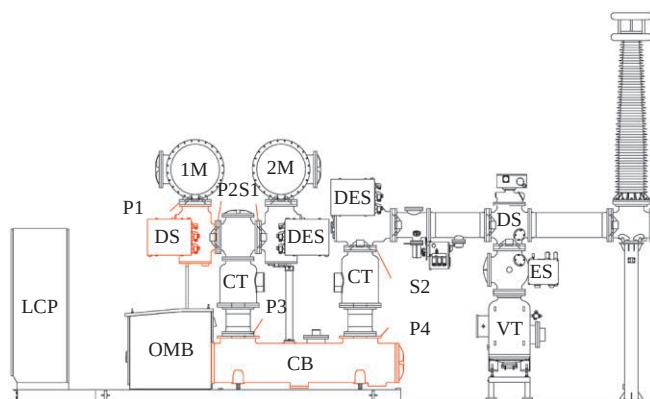


图10 ZF9D-252系列GIS产品实测布点示意图

252 kV GIS母线局放试验平台如图11所示，AB段竖直距离为1 000 mm，BC段竖直距离为500 mm，CD段竖直距离为550 mm，EF段水平距离为1 000 mm，由3个不通气盆式绝缘子隔成4个气室，内部均充有额定压力的SF₆气体。在A、C、F处装有内置式UHF传感器，使用UHF脉冲发生器模拟局放脉冲，分别选取A、C、F其中一点注入模拟局放脉冲，同时在另外两点外接局放测试仪测量信号。



图11 252 kV GIS母线局放试验平台

统计上述试验结果，得到下表所示各结构对应的UHF信号衰减量实测值，并与仿真计算数值进行了对比。

表 仿真与实测数据对比

结构	场强幅值衰减量 仿真数据/dB	场强幅值衰减量 实测数据/dB
L形拐角	5.22	5.70
断路器（合闸状态）	437.04	24.25
隔离开关（合闸状态）	16.28	12.6
不通气盆式绝缘子	3.41	2.10

由上表可知，L形拐角、合闸状态下的隔离开关和不通气盆式绝缘子的实测UHF信号场强幅值衰减量与仿真计算结果吻合程度较好，验证了先前仿真分析的准确性。而合闸状态下的断路器实

测值则与仿真计算结果相差较大，这可能是由于实际断路器结构中仿真模型未包含的其他波阻抗不连续点（如交叉接头、绝缘拉杆等），对UHF信号有反射效果，反射信号与入射信号的叠加产生谐振，从而减缓了信号的衰减。

结束语

1) 对于L形拐角结构，UHF信号在经过该结构时场强幅值衰减量仿真计算值为5.22 dB，实测值为5.70 dB，二者比较吻合。

2) 对于合闸状态下的断路器结构，UHF信号在经过该结构时场强幅值衰减量仿真计算值为437.04 dB，实测值为24.25 dB，二者差别较大，这可能是由于实际断路器结构中其他波阻抗不连续点引起的反射和谐振效应减缓了信号的衰减。

3) 对于合闸状态下的隔离开关结构，UHF信号在经过该结构时场强幅值衰减量仿真计算值为16.28 dB，实测值为12.6 dB，二者基本吻合。

4) 对于不通气盆式绝缘子，UHF信号在经过该结构时场强幅值衰减量仿真计算值为3.41 dB，实测值为2.10 dB，二者比较吻合。

5) UHF信号在GIS中传播时的衰减主要是由于其内部存在波阻抗不连续点引起的，根据结构特性的不同，各典型结构对UHF信号的衰减作用由强到弱依次为断路器（合闸状态）> 隔离开关（合闸状态）> L形拐角> 不通气盆式绝缘子。

本文对特高频局部放电信号在GIS部分典型结构内传播特性的研究，可为工程应用中的GIS局放传感器布点提供补充参考，减少传感器检测盲区 and 冗余布置，提高特高频局部放电在线监测系统的可靠性。EA

（收稿日期：2020.09.08）