

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.012

GIS 内置碟形特高频传感器特性的仿真研究

徐 洋¹, 刘卫东², 高文胜²

(1. 国网苏州供电公司, 苏州 215004; 2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 特高频局部放电检测是现阶段电力设备现场检测的常用手段,而特高频传感器的灵敏度和频带特性对于其使用效果具有重要的影响。文中使用时域有限差分(FDTD)方法对GIS内置式碟形特高频传感器的特性进行了研究,分析了特高频信号从激发、传播、接收到最终输出这一系列过程中的模态转化和信号衰减情况,并考虑了碟形传感器的形状参数对其测量效果的影响。研究结果对于内置式特高频传感器在GIS设备上的合理布置,以及传感器的优化设计具有重要的意义。

关键词: GIS; 特高频传感器; 时域有限差分; 灵敏度

Simulation Research on the Property of the Internal Disc-type UHF Coupler Used in GIS

XU Yang¹, LIU Weidong², GAO Wensheng²

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China; 2. State Key Lab. of Power System, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ultra-high frequency(UHF)method for partial discharge(PD)detection is widely used in the condition monitoring and diagnosis of power equipment nowadays, and its effect is significantly influenced by the sensitivity and frequency response of the UHF coupler. In this paper, the characteristics of the internal disc-type UHF coupler used in GIS apparatus is investigated using the finite-difference time-domain(FDTD)method. The transformation of the modes and the attenuation of the intensity is analyzed during the progress when the UHF signal is induced, propagating, received, and finally output by the UHF coupler. Meanwhile, the influence of the dimension parameters to the measuring effect of the UHF coupler is considered. The results of the investigation will make remarkable sense to the optimal design of the UHF coupler, as well as its reasonable arrangement in GIS apparatus.

Key words: GIS; UHF coupler; FDTD; sensitivity

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是一种以六氟化硫作为绝缘气体的高集成式电气设备^[1]。由于六氟化硫的绝缘强度较高,GIS内部缺陷在其中产生的局部放电信号的上升时间较短,通常能够激发数百兆甚至数千兆赫兹的特高频(ultra-high frequency, UHF)信号^[2]。局部放电的特高频检测方法就是通过特高频传感器捕获缺陷局部放电产生的特高频信号来达到设备状态检测的目的的,其检测信号的频率范围在0.3~3 GHz范围内^[3]。由于变

电站现场的干扰频带通常在百兆赫兹以下,因此使用特高频方法可以有效地避开现场存在的噪声,提升局部放电检测的灵敏度和可靠性^[4-6]。基于上述原因,目前特高频方法在GIS变电站现场的到了广泛的应用^[7-9]。

特高频方法的使用效果很大程度上取决于所使用的特高频传感器^[10]。目前GIS变电站现场常用的特高频传感器主要分为内置式和外置式,其中内置式传感器的使用环境稳定,受外部电磁环境的影响较小,因而较之外部传感器而言具有更高的灵敏度和抗干扰能力,是目前在线监测领域的主流选择^[11-12]。

从特高频方法诞生起,国内外的众多专家和学者就开始了特高频传感器的研究,并提出了多种具有较高的灵敏度和平稳的频率响应特性的传感器设计方案^[13-16]。但从现场运行经验来看,尽管GIS变电站曾发生过多起绝缘子闪络故障,但故障发生前特高频检测设备均未给出预警信号^[17-19],而特高频传感器灵敏度不足可能是导致其可靠性不足的原因之一,其结构参数仍存在优化的空间。此外,现阶段对于特高频传感器的研究仅考虑到了传感器的自身因素,但缺乏对于特高频信号的激发、传播和接收这一系列过程的整体考虑,对于传感器尺寸与GIS本体、手孔尺寸等因素的配合也鲜有研究^[20]。

文中在先前的实验研究的基础上,使用时域有限差分方法对影响内置式特高频传感器灵敏度和频率特性的各项尺寸参数进行了更为细致的研究,并考虑了GIS手孔深度等外部因素的影响。此外,文中还分析了缺陷产生的局部放电信号在传播过程中的模态转化和幅值衰减情况,为特高频传感器在GIS上的合理布置和优化设计提供了依据。

1 仿真模型的设计

由于GIS管道为同轴圆柱结构,使用圆柱坐标系能够方便计算的进行。文中研究的目标为尽可能地增大输出端口的电信号,故只考虑电场的分布情况。电磁波在GIS管道中传播时,电场既包含径向分量,也包含轴向分量。考虑GIS外壳附近的电场分布,其边界条件见图1。

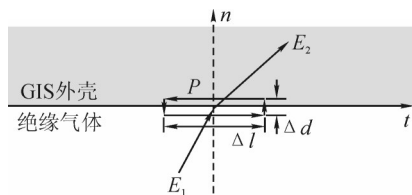


图1 GIS外壳附近的边界条件

Fig. 1 The boundary conditions near the GIS shell

以外壳与绝缘气体分界面上的 P 点为观察点,设在气体和外壳中紧挨 P 点的电场强度分别为 E_1 和 E_2 ,它们的法向分量、切向分量分别为 E_{1n} , E_{1t} 和 E_{2n} , E_{2t} 。作一包围 P 点的小扁圆柱体,其厚度 $\Delta d \rightarrow 0$,则利用麦克斯韦第二方程的积分形式,可得

$$\oint E dl = - \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \Rightarrow E_{1t} - E_{2t} = - \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_{t_0} \Delta d \quad (1)$$

由于 $\Delta d \rightarrow 0$,故只要 $\partial B / \partial t$ 不为无穷大,即有

$$E_{1t} - E_{2t} \rightarrow 0 \quad (2)$$

而由于导体内电场为零,故可知在GIS外壳内表面上的电场 E_{1t} 趋近于0。在圆柱坐标系中,在外

壳内表面上沿径向(z 方向)和切线方向(φ 方向)上的电场都趋近于0,电场只包含径向(r 方向)分量。因此,研究GIS外壳内表面上的电场分布,可以大大地简化运算的复杂度。

电磁波在同轴导体中传播时,会存在多种传播模态,不仅包括横电磁(transverse electric and magnetic, TEM)波,还包括横电波(TE波)和横磁波(TM波)这样的高次模态。英国的Judd等人在其发表的论文中使用并矢格林函数对GIS中各种电磁波模态的电场分布进行了分析^[21-22]。假设激励电流源为从 $(r_1, 0, 0)$ 到 $(r_2, 0, 0)$ 的径向电流,则其电流密度矢量可表示为

$$J(R') = \delta(\varphi') \delta(z') [U(r' - r_1) - U(r' - r_2)] I(\omega) \hat{r} \quad (3)$$

式(3)中: $\delta(x)$ 为冲击函数; $U(x)$ 为阶跃函数; $I(\omega)$ 为电流源的频率特性; $\hat{r}$ 则为径向上的单位矢量,则其产生的电磁波中TEM, TE, TM模态在GIS外壳附近的径向电场表达式分别见式(4)-(6):

$$E_{r\text{TEM}} = \frac{\sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}}{4\pi b \ln(b/a)} I(\omega) \exp\left[-\frac{j\omega z}{c}\right] \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

$$E_{r\text{TE}} = \frac{(2 - \delta_0^n) J_n'^2(u_{nm} b) Z_n^2(u_{nm} b) \cos(n\varphi) I(\omega)}{J_n'^2(u_{nm} a) \left(1 - \frac{n^2}{u_{nm}^2 b^2}\right) - J_n^2(u_{nm} b) \left(1 - \frac{n^2}{u_{nm}^2 a^2}\right)} \times \quad (5)$$

$$\frac{-\omega \mu_0 \pi n^2}{8B} \times \frac{\exp[j\beta_u z]}{\beta_u} \times \int_{r_1}^{r_2} \frac{Z_n(u_{nm} r')}{r'} dr' \\ E_{r\text{TM}} = \frac{v_{nm}^2 \pi}{8} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \times \frac{(2 - \delta_0^n) J_n^2(v_{nm} b) X_n'(v_{nm} b)}{J_n^2(v_{nm} a) - J_n^2(v_{nm} b)} \times \\ \frac{-\sqrt{\omega^2 - \omega_{nm}^2}}{\omega} \times \exp\left(\frac{jz \sqrt{\omega^2 - \omega_{nm}^2}}{c}\right) \quad (6)$$

$$\cos(n\varphi) I(\omega) \int_{r_1}^{r_2} X_n'(v_{nm} r') dr'$$

式(4)-(6)中: a 为GIS管道内导体直径; b 为GIS外壳内径; $J_n(x)$ 为 n 阶第1类贝塞尔函数; $J_n'(x)$ 为其一阶导数; $Y_n(x)$ 为 n 阶第2类贝塞尔函数; $Y_n'(x)$ 为其一阶导数; u_{nm} 为 n 阶贝塞尔方程的第 m 个本征解; v_{nm} 为 n 阶贝塞尔方程的第 m 个本征解; β_u 为轴向传播系数; δ_0^n 为克罗内克函数。

$$J_n'(ua) Y_n'(ub) - Y_n'(ua) J_n'(ub) = 0 \quad (7)$$

$$J_n(va) Y_n(vb) - Y_n(va) J_n(vb) = 0 \quad (8)$$

从各模态的电场表达式可见,测量点处的径向电场主要与GIS管道的尺寸、激励源与测量点的相对位置以及信号的频率有关。仔细观察上述3式,可知在 $E_{r\text{TE}}$ 和 $E_{r\text{TM}}$ 中都存在随方位角 φ 和阶数 n 变化

的部分 $\cos(n\varphi)$, 这说明 E_{rTE} 和 E_{rTM} 在管道的横截面圆周上受方位角 φ 的调制, 且其分布与阶数 n 有关; 而在 E_{rTEM} 的表达式中则不存在 φ , 说明其在横截面圆周上是均匀分布的。利用这一性质, 可以有效地区分电磁波中的 TEM 模态和高次模态。

此外, 在式中, 令

$$u_{nm} = \frac{2\pi f_{nm}}{c} \quad (9)$$

式(9)中, c 为真空中的光速, 则有

$$\beta_u = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - \left(\frac{2\pi f_{nm}}{c}\right)^2} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{nm}}{f}\right)^2} \quad (10)$$

当信号的频率 $f < f_{nm}$ 时, 在轴向上呈指数衰减, 即其所对应的 TE_{nm} 模态无法向前传播。因此称为该模态的截止频率, 其大小可以通过解式(7)所示的贝塞尔方程得到, 与 GIS 的尺寸密切相关。同理, 对于 TM_{nm} 模态同样存在截止频率, 其大小可以通过解式所示的方程得到。

根据上述结论, 可以建立相应的计算模型见图 2。GIS 管道尺寸以 220 kV 设备为标准并进行了一定程度的简化。这些简化可能影响单个绝缘子的频率响应, 但不会影响传感器尺寸的横向比较。仿真的激励源为位于模型左端的电流源, 其长度为 60 mm, 方位角为 90° , 设置其波形为高斯脉冲, 上限截止频率约 3 GHz, 且在频率范围内各频段信号的幅值基本一致, 有利于分析传感器对各频段信号的接收率。模型两端和绝缘子输出端均设置为吸收边界, 以减小电磁波折反射的影响。

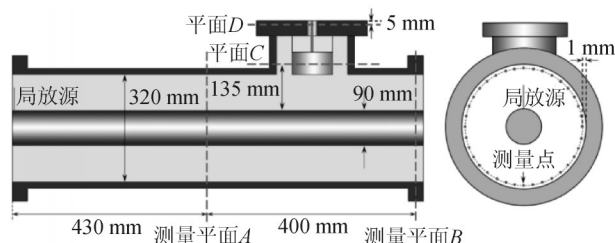


图2 内置式特高频传感器的仿真计算模型

Fig. 2 The simulation model of the internal UHF coupler

为了研究电磁波信号从激发到传输至传感器输出端的传播和衰减情况, 在 GIS 不同位置设置了 4 个测量平面, 每个平面上均匀放置 36 个测量点, 测量点与 GIS 外壳的距离为 1 mm。仿真所用传感器和绝缘层的尺寸相同, 均为直径 80 mm, 厚度 40 mm 的圆柱, 其驻波比和方向图分别见图 3(a)、(b)。从图 3 中可见, 传感器在 0.3 ~ 1.25 GHz 范围内的驻波比较小, 因而可以满足大部分特高频信号的测量; 天线在水平方向上的增益基本为恒定值, 即其对于水平方向上的各

向信号都具有稳定的接收能力, 故而能够较好地满足复杂结构的 GIS 设备中特高频信号的检测需要。

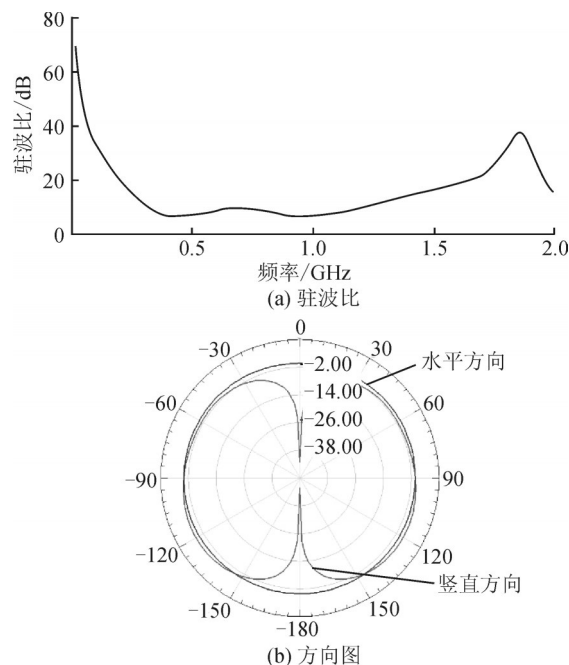


图3 传感器的驻波比和方向图

Fig. 3 The voltage standing wave ratio and radiation pattern of the UHF coupler

由于时域有限差分中使用 Yee 氏网格对计算区域进行剖分, 其坐标系为直角坐标系, 而根据前述分析, 在接近 GIS 外壳的位置主要应当分析电场的径向分量, 因此需要根据各测量点的方位角, 将其对应的直角坐标分量转换为径向分量。

2 仿真结果与分析

2.1 特高频信号的传播与模态转化

首先研究电磁波在 GIS 管道中传播时的模态转化和幅值衰减情况。将各传感器上测得的电场强度径向分量的时域波形作傅里叶变换, 得到其频谱特性, 并将同一测量平面上的所有传感器的电场径向分量的频谱特性画在同一张图上, 并将幅值进行归一化处理, 即可得到电磁波在传播至图 2 所示的 4 个测量平面上时, 其中的频率分量在圆周上的分布情况, 见图 4。由式(4)~(6)可知, 不同电磁波模态的电场径向分量在圆周上的波包个数与其阶数成正比, 因此从电场径向分量的圆周分布情况可以知晓电磁波的模态分布。

对于测量平面 A 和 B, 由于其为 GIS 管道横截面, 故可将 GIS 管道的内外径代入方程(7)、(8)中, 解得截止频率在 2 GHz 以下的各电磁波模态的截止频率见表 1、2。所在图 4(a)中, 各分界线的频率分别为 470、880、1 250、1 590、1 900 MHz, 与表 1 所示 TE_{n1}

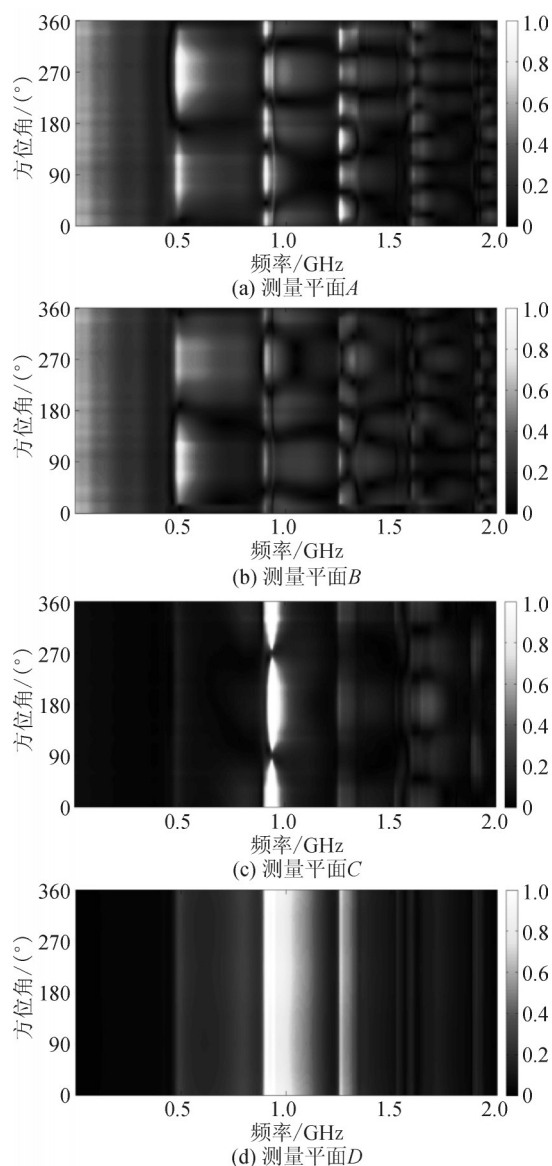


图4 电磁波的频率分量在各测量平面圆周上的分布
Fig. 4 The distribution of the frequency components of the EM wave on the circles of different measuring planes

表1 不同位置处各电磁波模式的截止频率

Table 1 The cutoff frequency of the higher order modes in different positions

模式	TE ₁₁	TE ₂₁	TE ₃₁	TM ₀₁	TM ₁₁	TE ₁₂	TE ₄₁	TM ₂₁	TE ₂₂	TE ₅₁	TM ₃₁
f_c/MHz	479	891	1 249	1 280	1 374	1 515	1 586	1 641	1 879	1 914	1 929

表2 不同位置处各电磁波模式的截止频率

Table 2 The cutoff frequency of the higher order modes in different positions

模式	TE ₁₁	TE ₂₁	TE ₁₁
f_c/MHz	808	1 600	>2 000

2)GIS管道中的TEM模式难以传播到手孔当中,而手孔中的TEM模式却可以继续传播至馈线上。这是因为TEM模式只能在双导体波导中,而手

孔的截止频率相对应;在图4(b)中也有类似的规律,说明在高次模式的电磁波径向分量中,TE₁₁模式占据了绝大多数。比较测量平面A和B,可见TEM模式的幅值基本没有变化,而高次模式则有一定程度的衰减,说明电磁波主要以高次模式的形式从GIS管道传入手孔部分。

对于测量平面C,可以将其所在位置看作由传感器和手孔组成的同轴管道,据此可以计算出其高次模式的截止频率见表2。图4(c)中的模式分界线出现在约750 MHz和1 600 MHz,与表2中的截止频率相对应。图4(c)中480 MHz以下的频率分量基本为零,即GIS管道中的TEM模式基本无法传播到手孔中,故平面C上480~750 MHz之间的TEM模式实际上是由平面A上的TE₁₁模式转化而来的,而图4(c)中480 MHz附近的亮线则代表了GIS管道中的TE₁₁模式的截止频率;图4(c)中的其他高亮区域也由图4(a)中对应的模式转化而来。

对于测量平面D,可以将其所在位置看作由传感器馈线和盖板孔组成的同轴管道,由于其内外径都很小,其高次模式的截止频率远高于2 GHz,即对于2 GHz以下的频率分量,电磁波在其中只以TEM模式传播,这一点也可以从图4(d)中看出。也就是说,电磁波从平面C传入平面D时,所有高次模式均转化为TEM模式,见图5,而图4(d)中各分界线则分别代表平面A和C所在位置各高次模式的截止频率,与图5中平面D上的各分界线一一对应。

由以上分析可以得到如下3点结论:

1)电磁波在GIS中传播时,其模式并不是固定不变的,而是会随着不同位置波导的尺寸而发生变化;当高阶模式传入截止频率较高的波导时,会转化为相应的低阶模式;

孔和馈线都可以看作同轴波导,两者的内外导体均是直接相连的,TEM模式可以直接传播;而手孔与GIS管道的内导体并不直接相连,相当于同轴波导存在间断,TEM模式无法传播;

3)传感器馈线上的电磁波均以TEM模式存在,因此电场只存在径向分量且在圆周上分布均匀,因此在馈线端口沿径向作任意积分线即可得到传感器的输出电压波形。

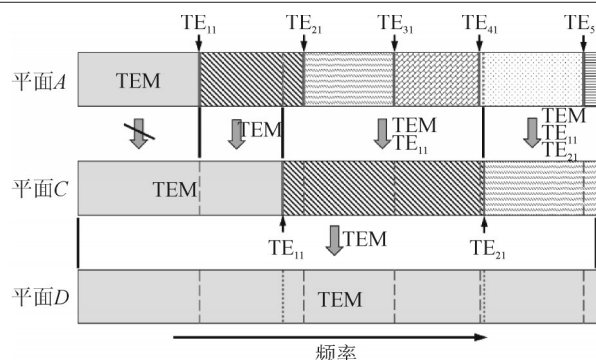


图5 电磁波传播过程中的模式转化

Fig. 5 The transformation of the EM wave modes during the propagating progress

2.2 传感器外形尺寸对接收效果的影响

为了提升特高频方法对于各类绝缘缺陷的检出率,特高频传感器必须具有较高的灵敏度和较为平坦的频率特性,以适应不同缺陷放电形式的要求。并且,由于GIS设备中电磁波的折反射复杂,传感器应当具有各向一致性,从而确保对设备的各个方位都具有同等的监视效果。

为此,文中所模拟的特高频传感器为图6所示的碟形传感器,根据先前的实验研究结果,此类传感器具有较好的灵敏度、频率特性和各向一致性,且本身结构简单易于安装,具有较高的实用价值。该节主要探讨传感器各项尺寸参数对其接收效果的影响,包括传感器直径 d_c 和厚度 h_c ,绝缘层的直径 d_i 和厚度 h_i ,手孔的深度 H ,以及传感器端面与GIS管道内壁之间的垂直距离 h_0 。在研究这些参数的影响时,考虑到传感器的引入不应影响GIS主绝缘强度,故传感器的端面不应超出GIS内壁。

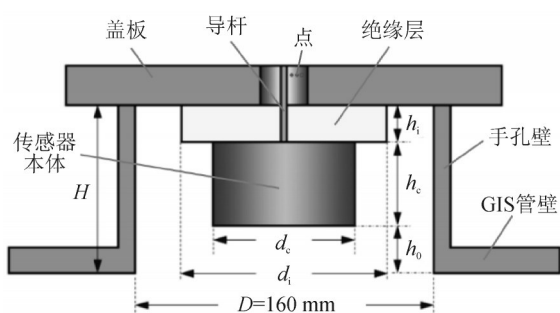


图6 传感器的结构和尺寸参数

Fig. 6 The structure of the coupler and its dimension parameters

该研究的标量为传感器输出馈线上的信号幅值,根据上一节中的结论,馈线处电场沿圆周均匀分布,故只需在馈线径向上作任意积分线即可得到传感器的输出电压。该例中,在馈线径向上以间距 $\Delta r=1\text{ mm}$ 为间隔设置若干电场测量点,如图6中点所示,则有

$$u_o(t) = \int E_r(t) dr \approx \sum_i E_{ri}(t) \Delta r \quad (11)$$

式(11)中, $E_{ri}(t)$ 即为测量点测得的电场的径向分量。

2.2.1 传感器直径和厚度的影响

首先仿真传感器直径 d_c 和厚度 h_c 对输出信号幅值的影响,取 $d_i=80\text{ mm}$, $h_i=40\text{ mm}$, $h_0=0$, H 随传感器厚度的变化而变化,得到传感器输出信号幅值随其直径和厚度的变化见图7。

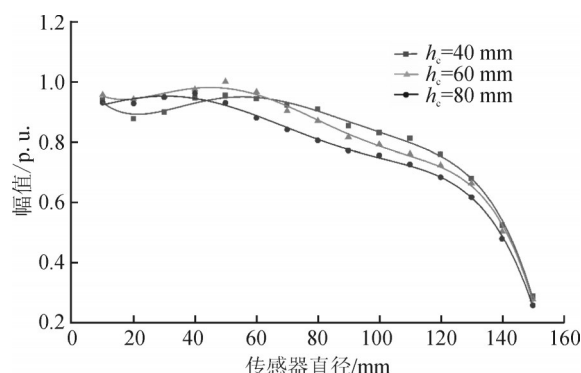


图7 传感器直径和厚度对输出信号的影响

Fig. 7 The influence of the diameter and thickness of the coupler to the amplitude of the output signal

从图7中可见,传感器的直径对于输出信号幅值大小的影响显著。当 $d_c < 80\text{ mm}$ 时, u_o 随 d_c 的增大变化不明显;当 d_c 在 $80 \sim 120\text{ mm}$ 范围内时,随着 d_c 的增大, u_o 略微减小; $d_c > 120\text{ mm}$ 时,随着 d_c 的增大, u_o 迅速减小。相对而言,传感器厚度对输出信号幅值的影响较小,在 d_c 相同时,不同厚度的传感器的输出电压幅值相差不超过15%。

2.2.2 绝缘层厚度和直径的影响

绝缘层厚度和直径对传感器输出信号幅值的影响见图8,仿真过程中取 $d_c=80\text{ mm}$, $h_c=40\text{ mm}$, $h_0=0$, H 随绝缘层厚度的变化而变化。从图8中可见,绝缘直径对于传感器输出信号幅值的影响较小,因此在图中对相同厚度的绝缘层使用水平直线进行拟合;绝缘层厚度对输出信号的影响较大,但并不呈现单调变化的趋势,绝缘厚度从 10 mm 增大至 40 mm 的过程中,输出信号幅值先增大,后减小。

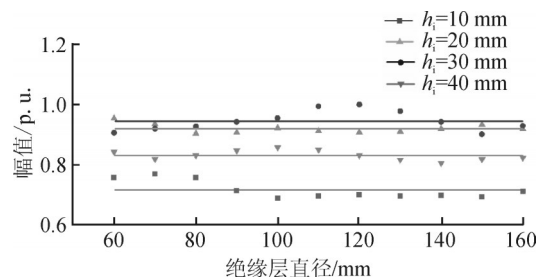


图8 绝缘层直径和厚度对输出信号的影响

Fig. 8 The influence of the diameter and thickness of the insulation to the amplitude of the output signal

2.2.3 端面与内壁间垂直距离的影响

以上仿真中始终保持 $h_0=0$,即传感器端面与GIS内壁处于同一水平面。为减小传感器对GIS内场强分布的影响,传感器端面不宜超出GIS内壁,即 h_0 不小于0,但仍然需要研究 $h_0>0$ 时传感器输出信号幅值的变化。仿真过程中取 $d_c=80\text{ mm}$, $h_c=40\text{ mm}$, $d_i=80\text{ mm}$, $h_i=40\text{ mm}$, H 随 h_0 的变化而变化,仿真其结果见图9。从图9中可见,随着 h_0 的增大,传感器输出信号的幅值单调减小,且除第一点外,后续两者之间基本呈线性变化。

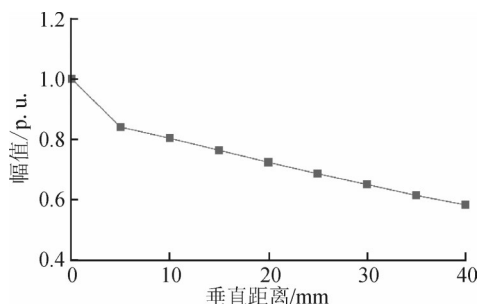


图9 传感器端面与GIS内壁之间的垂直距离对输出信号的影响

Fig. 9 The influence of the vertical distance between the end plane of the coupler and the internal surface of the GIS to the amplitude of the output signal

2.2.4 手孔深度的影响

从2.2.3节的研究结果可知,当传感器端面与GIS内壁位于同一平面上时,传感器的输出信号幅值最大。因此,为了达到最好的接收效果,传感器厚度 h_c 与绝缘层厚度 h_i 之和必须等于手孔的深度 H 。

但从前述研究也可看到,尽管传感器的厚度 h_c 对于其接收效果的影响并不显著,但绝缘层的厚度 h_i 却对输出信号有较大的影响。因此,对于不同深度的手孔,选择何种 h_c 和 h_i 的配比才能使得输出信号最大化,就是该节需要研究的问题。

对于图6所示的直径为160 mm的GIS手孔,取 $d_c=d_i=80\text{ mm}$, $h_0=0$,即 $H=h_i+h_c$ 。分别考虑深度 H 为60、80、100 mm的手孔,以绝缘层厚度 h_i 为变量,得到各个手孔下不同厚度配比时的输出信号幅值见图10。从图10中可见,对于不同深度的手孔,传感器达到最优灵敏度时的绝缘层厚度是不同的,且 h_i 的最优取值随 H 的增大而增大。从图10中所列出的3个深度的手孔来看, h_i 的值在手孔深度的25%~40%之间时,内置式传感器的灵敏度最高;且手孔深度越大,达到最优时传感器的灵敏度越小。

3 结论

文中使用时域有限差分方法,对用于GIS特高

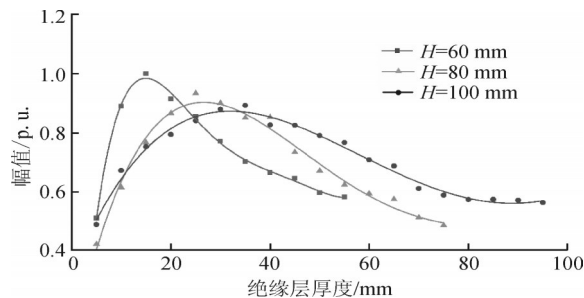


图10 手孔深度对输出信号的影响

Fig. 10 The influence of the depth of the hand-hole to the amplitude of the output signal

频局部放电检测的传感器的接收效果进行了仿真,模拟了特高频信号在GIS内部传播并被传感器接收的过程,在此基础上研究了内置式碟形特高频传感器各项尺寸参数对其灵敏度的影响,主要结论如下:

1)特高频信号在GIS中传播时,由于波导尺寸和结构的变化,经常伴随着模式的转化。当高阶模态传入截止频率较高的波导时,会转化为相应的低阶模态;

2)特高频信号从GIS管道传入手孔时,由于导体不连续,TEM模态几乎无法传播,这可能导致传感器对于低频信号的灵敏度大幅下降;

3)传感器本体的直径对于其灵敏度影响较大,当传感器直径接近手孔直径时,会导致输出信号大幅降低;相对而言,传感器本体的厚度的影响则很小;

4)绝缘层的直径基本不影响传感器灵敏度,但绝缘层的厚度则影响较大;由于传感器使用时端面应当与GIS管道内壁保持在同一水平面上,因而对于特定深度的手孔,应当合理配置传感器本体与绝缘层的厚度。研究结果显示,当绝缘层厚度在手孔深度的25%~40%之间时,传感器具有较好的接收效果。

特高频传感器与GIS管道的联合仿真提升了结果的可靠性,也为传感器的设计、选型与安装提供了指导。之后将针对更多的传感器形式展开研究,不断调整其灵敏度和频率响应特性,以满足现场设备状态监测的需求。

参考文献:

- [1] 崔景春. 气体绝缘金属封闭开关设备[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
CUI Jingchun. Gas insulated switchgears[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [2] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS中局部放电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.

- DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and PD severity in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 6-11.
- [3] 覃剑, 王昌长, 邵伟民. 特高频在电力设备局部放电在线监测中的应用[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 33-36.
- QIN Jian, WANG Changchang, SHAO Weimin. Applying UHF to partial discharge on-line monitoring of electric power apparatus[J]. Power System Technology, 1997, 21(6): 33-36.
- [4] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS局部放电特高频检测灵敏度的检验方案细化研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 14-18.
- DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of improvement of sensitivity verification of partial discharge detection using UHF method in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 14-18.
- [5] CAVALLINI A, CONTIN A, MONTANARI G, et al. Advanced PD inference in on-field measurements. I. noise rejection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 216-224.
- [6] TENBOHLEN S, DENISOV D, HOEK S M, et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.
- [7] 李晓峰, 刘振, 庞先海, 等. 特高频局部放电检测技术在GIS设备上的典型应用[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 100-103.
- LI Xiaofeng, LIU Zhen, PANG Xianhai, et al. Typical application of UHF partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 100-103.
- [8] 姚陈果, 周电波, 陈攀, 等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1670-1676.
- YAO Chenguo, ZHOU Dianbo, CHEN Pan, et al. UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [9] CIGRE Joint Task Force 15/33.03.05. Partial discharge detection system for GIS: Sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[J]. Electra, 1999(183): 75-87.
- [10] ISHAK A, BAKER P, SIEW W, et al. Characterizing the sensitivity of UHF partial discharge sensors using FDTD modeling[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3025-3031.
- [11] ITO T, KAMEI M, UETA G, et al. Improving the sensitivity verification method of the UHF PD detection technique for GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1847-1853.
- [12] PINPART T, JUDD M. Experimental comparison of UHF sensor types for PD location applications[C]//Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2009: 26-30.
- [13] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. Broadband couplers for UHF detection of partial discharge in gas-insulated substations[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1995, 142(3): 237-243.
- [14] JUDD M, REID A, YANG L, et al. A new integrated diagnostic partial discharge monitoring strategy for hv plant items: Combining UHF couplers and the IEC 60270 standard[C]//18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, Italy: IET, 2005: 1-4.
- [15] BAKER P C, JUDD M D, MCARTHUR S. A frequency-based RF partial discharge detector for low-power wireless sensing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 133-140.
- [16] YAO C, CHEN Pan, HUANG Congjian, et al. Study on the application of an ultra-high-frequency fractal antenna to partial discharge detection in switchgears[J]. Sensors, 2013, 13(12): 17362-17378.
- [17] 孙建锋, 葛睿, 郑力, 等. 2010年国家电网安全运行情况分析[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.
- SUN Jianfeng, GE Rui, ZHENG Li, et al. Analysis of state grid security operation in 2010[J]. Electric Power, 2011, 44(5): 1-4.
- [18] 张欣, 李高扬, 黄荣辉, 等. 不同运行年限的GIS缺陷率统计分析与运维建议[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 184-188.
- ZHANG Xin, LI Gaoyang, HUANG Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188.
- [19] 杨堃, 李炜, 宋昊, 等. 2013年高压开关设备运行分析[J]. 智能电网, 2014, 2(6): 32-41.
- YANG Kun, LI Wei, SONG Gao, et al. Operation analysis of HV switchgears in 2013[J]. Smart Grid, 2014, 2(6): 32-41.
- [20] 李兴旺, 卢启付, 李端姣, 等. GIS局部放电特高频在线监测系统传感器配置方案研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 70-74.
- LI Xingwang, LU Qifu, LI Duanjiao, et al. Transducers arrangement of the UHF-PD online monitoring system for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 70-74.
- [21] JUDD M, HAMPTON B, FARISH O. Modelling partial discharge excitation of UHF signals in waveguide structures using green's functions[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1996, 143(1): 63-70.
- [22] 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.

徐洋(1990—), 男, 工学博士, 主要从事电气试验技术方面工作(E-mail: kyonxxu@126.com)。