

气体绝缘开关直线和 T 型结构中电磁波传播特性的仿真

杨景刚, 黎大健, 李军浩, 司文荣, 李彦明
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用有限时域差分法(FDTD)对由局部放电产生的电磁波在 GIS 典型结构(直线和 T 型结构)中的传播特性进行了仿真研究. 通过设置不同的电磁波激发方向、对比不同测量角度的信号时域和频域特征、以及比较两种结构的仿真结果, 获得了 TEM 模波和 TE 模波在直线和 T 型结构中的传播特性, 以及 T 型结构产生的反射波特征等. 仿真结果表明: 电磁波信号在 GIS 典型腔体中传播时, 信号峰峰值和能量受模波速度色散效应的影响, 在离激励源较近时衰减较大, 远离激励源时衰减较小; T 型结构会发生模式转变效应, 将在反射和前行电磁波中产生新的模波分量; TEM 模波无截止频率, 其传播不受结构的影响, 在 GIS 同轴腔体中传播衰减较小.

关键词: T 型结构; 仿真; 气体绝缘开关; 有限时域差分法

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)12-1526-05

Simulation for Electromagnetic Wave Transmission Characteristics in Straight and T-Shaped Tanks of Gas Insulation Switchgear Structures

YANG Jinggang, LI Dajian, LI Junhao, SI Wenrong, LI Yanming
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Propagation characteristic of electromagnetic which is excited by partial discharge in gas insulation switchgear(GIS) is simulated based on the method of finite difference time domain (FDTD). The transmission characteristics of TEM and TE, and reflected waves generated by T-shaped tanks are analyzed in the straight and T-shaped tanks of GIS structure, via setting the different directions of electromagnetic, comparing the time and frequency domain results of electromagnetic wave in different structures and measurement angles. The results indicate that the amplitude of peak-peak voltage and energy of signals get greater when measuring point is near from the excitation source and the new mode wave probably forms when the signals propagate through the T-shaped tanks because of the effect of wave mode transformation, and TEM can propagate through GIS cavity with little attenuation due to the lack of cutoff frequency in TEM.

Keywords: T-shaped tanks; simulation; gas insulation switchgear; finite difference time domain

通过测量局部放电产生的电磁波, 可评估 GIS 绝缘状态, 该方法是目前国内外研究 GIS 局部放电的热点之一. GIS 中直线和 T 型结构会对传播的电磁波产生较复杂的影响^[1], 本文采用有限时域差分法(FDTD)^[2-3]研究电磁波在 GIS 腔体典型结构(直

线型和 T 型结构)传播时的特性. 仿真时设置的缺陷为高压导杆上的金属尖刺, 该缺陷类型易产生 TE 模波($H_z \neq 0$, $E_z = 0$)而较难产生 TM 模波($E_z \neq 0$, $H_z = 0$)^[4], 故本文主要在 0~1.5 GHz 频段范围内探讨 TEM 和 TE 模波的传播特性.

1 仿真模型设计

参照一段 220 kV 单相 GIS 母线的尺寸,设计了直线型、T型结构的仿真模型,其内导杆半径、腔体内半径分别为 5.3 cm、16 cm. 直线型腔体长度为 200 cm,T 型每段长为 100 cm,结构如图 1 所示.

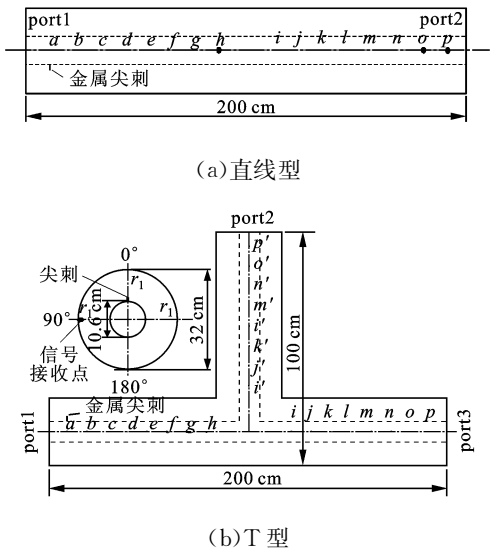


图 1 直线和 T 型模型结构示意图

在距离各个模型 port1 端口 10 cm 处、导杆径向方向上设置一段 2 cm 的金属尖刺作为激励源. 该激励源采用幅值为 1 A、负载为 50 Ω 的高斯电流脉冲,能辐射出带宽为 3 GHz 的高频电磁波信号,其时域波形和频谱如图 2 所示.

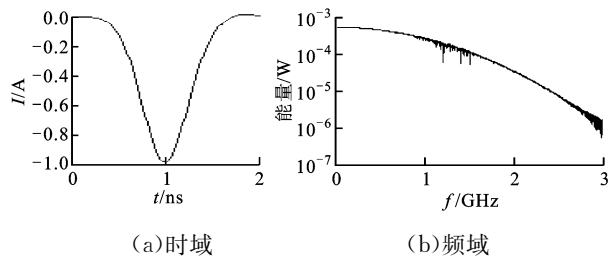


图 2 局部放电信号时域与频域波形

在相对激励源 0°、90°、180° 3 个方向每隔 10 cm 设置一个信号测量点,每个方向共 16 个,如图 1 中 a~p 或 a~p'. 电磁波在同轴结构中传播时,TEM 波是基本模式,任何频率下都可以传播,但 TE 模波在低于截止频率以下是不能传播的. TE_{m1} 模波的截止频率为^[5]

$$f_c = \frac{cm}{\pi(r_1 + r_2)} \quad m = 1, 2, 3, \dots; n = 1$$

(1)

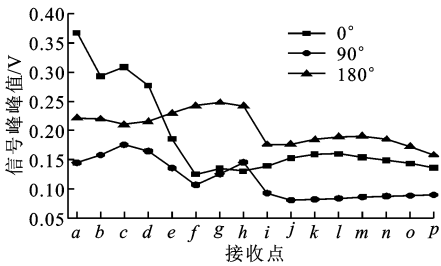
式中: r_1 为导杆半径; r_2 为腔体半径; c 为光速. 针对本文的仿真模型,TE_{m1} ($m=1, 2, 3$) 模波各自的截止频率分别为 0.448、0.896、1.33 GHz.

本文只研究电磁波在模型中的传播特性,不考虑模型端口的反射、折射和衰减等因素,所以模型端口均采用完全匹配层(PML). 该层是一种特殊的介质层,其波阻抗与相邻介质的波阻抗完全匹配,电磁波在 PML 层上会被完全吸收而不存在折射、反射现象,可避免两端筒壁对电磁波传播的影响.

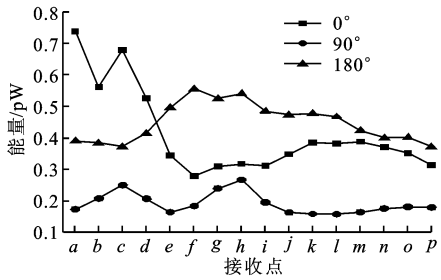
2 仿真结果

2.1 直线型结构

(1)时域结果. 由仿真结果可得,0°方向上距离放电电源较近的信号峰峰值和能量都较大,从 d 点开始出现较大衰减,而从 f 点以后则保持相对平稳. 90°和 180°两方向上信号峰峰值和能量的变化不大,整体呈微弱下降趋势,如图 3 所示.



(a) 信号峰峰值



(b) 能量特征

图 3 直线型时域信号峰峰值和能量特征图

(2)频域结果. 对各测量点的信号进行频谱分析可得,相对于激励源 0°、90°、180° 3 个方向,每个方向上的信号特征分别相同,现仅以 b 点为例进行说明. 直线型结构相对于激励源 0°、180°两个方向上的信号均在 TE₁₁、TE₂₁、TE₃₁ 等模波截止频率处出现峰值,说明该信号含有 TE₁₁、TE₂₁、TE₃₁ 等模波,而 90°方向上仅存在 TE₂₁ 模波分量,b 点信号频谱特征如图 4 所示.

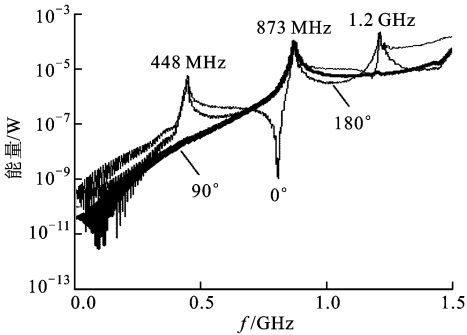


图 4 直线型 0°、90°、180°方向 *b* 点信号频谱特征图

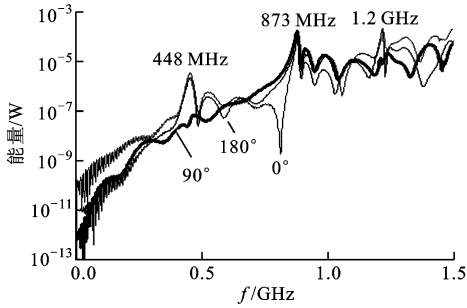
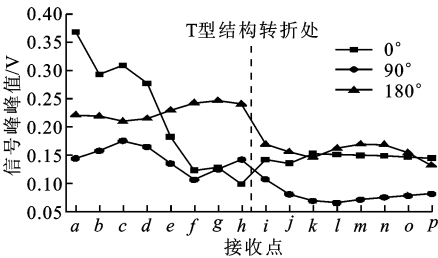


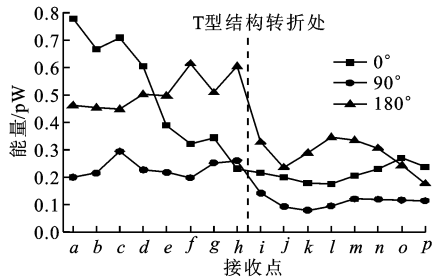
图 6 T 型 0°、90°、180°方向 *b* 点信号频谱特征图

2.2 T 型结构

(1)时域结果. 电磁波在经过 T 型结构前由于反射波能量较小而均未出现峰峰值和能量增大的情况,经过 T 型结构后信号的峰峰值和能量衰减较大,port2 处信号的峰峰值和能量较 port3 处的大.激励源处于 0°方向时 port1-port2 信号时域波形峰峰值和能量特征如图 5 所示,port1-port3 部分信号特征与此相同.



(a)信号峰峰值



(b)能量特征

图 5 T 型结构时域信号峰峰值和能量特征图

(2)频域结果. T 型结构相对于激励源 0°、180°两方向 *b* 点处信号频域特征相同,除了在各模波截止频率处出现峰值以外,还出现了震荡波形,这是反射波产生的影响. 90°方向信号与图 4 不同的是,除了在 TE₁₁截止频率处出现峰值外,还在 TE₁₁、TE₃₁模波截止频率处出现较小的波动,表明有含量较小的模波分量存在,如图 6 所示.

port3 相对于激励源附近 0°、180°两方向 *o* 点处的信号频域特征也相同,在各模波截止频率处出现

峰值,但分量 TE₁₁、TE₃₁模波明显小于图 6 所示结果,且小幅震荡较少,而 90°方向信号在 TE₁₁、TE₃₁模波截止频率处出现较强的波动,如图 7 所示.

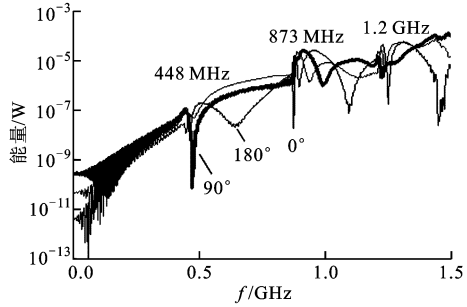


图 7 T 型 0°、90°、180°方向 *o* 点信号频谱特征图

port2 相对于激励源附近 90°、180°两方向 *o'* 点处信号在各模波截止频率处出现峰值,且各模波含量较大,而 0°方向上信号频谱特征较复杂,见图 8.

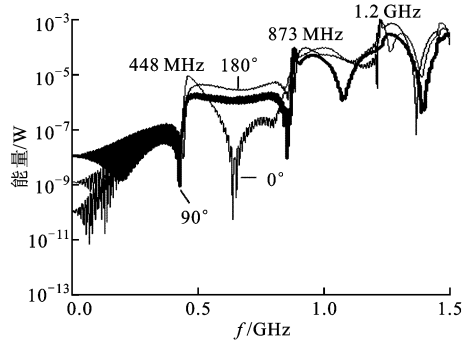


图 8 T 型 0°、90°、180°方向 *o'* 点信号频谱特征图

2.3 反射波结果

(1)相对于激励源 0°、180°方向时域、频域特征相同,本文以相对于激励源 0°方向时的信号结果进行分析.

直线型和 T 型结构 *b* 点处信号时域波形前端部分几乎一样,但随着传播的继续进行,大约在 5 ns 附近,T 型 *b* 点处信号开始与反射波叠加. 反射波的峰峰值大约为前行波的 10%,其峰值未出现在波头

附近,如图 9 所示.对反射波进行频谱分析,该方向上的反射波存在 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} 等模波,如图 10 所示.

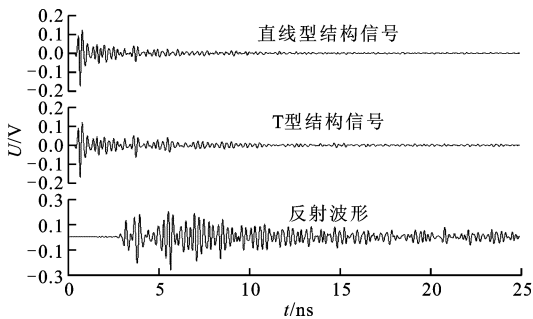


图 9 0° 方向 b 点处反射波时域波形

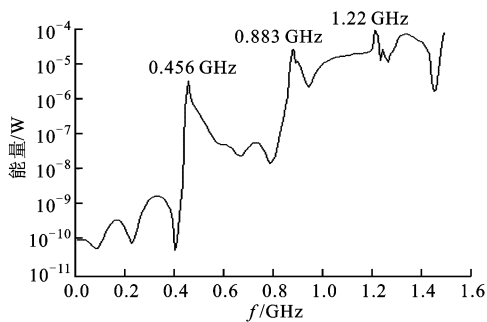


图 10 0° 方向 b 点处信号频谱图

(2) 相对于激励源 90° 方向的信号时域特征与图 10 所示结果相同.对其反射波进行频谱分析可得,除了在 TE_{21} 模波截止频率出现峰值外,还在 TE_{11} 、 TE_{31} 模波截止频率处出现较小的波动,表明有含量较小的 TE_{11} 、 TE_{31} 模波分量存在,如图 11 所示.

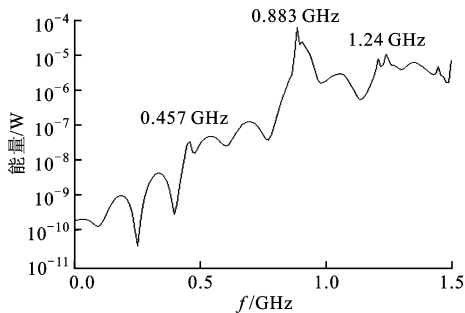


图 11 90° 方向信号频谱图

3 讨论

3.1 模波速度色散

信号峰峰值和能量的变化主要是由模波速度色散效应产生的.当局部放电产生时,激发出由 TEM、TE 模波混合而成的电磁波向四周传播,而不同截

止频率的模波具有不同的传播速度,不同频率的高次模波其传播速度为^[6]

$$v_g = c(1 - (f_c/f)^2)^{1/2} \quad (2)$$

式中: f 为高于 f_c 的高次模波的频率.由式(2)可得,高次模波的传播速度和频率、模波截止频率相关,截止频率越低的模波反而具有更高的传播速度. TEM 模波没有截止频率,其传播速度为光速,所以随着传播距离的增加,高次模波逐渐滞后于低次模波,各模波发生分离,这便形成了速度色散效应.因此,距离激励源较远的测量点先记录到 TEM 模波和低次模波,其次是高次模波,表现出信号峰峰值和能量减小的特征.

例如,直线型结构 0° 方向 a 、 p 两点处的信号时域波形存在很明显的区别, a 点信号能量主要集中在时域波形前端部分,而 p 点信号能量则较分散,如图 12 所示.

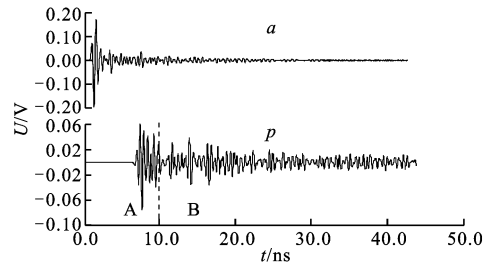


图 12 直线型结构 0° 方向 a 、 p 点信号波形

对 p 点 A、B 两部分信号进行频谱分析可得, A 部分信号能量主要是集中在 $0 \sim 500$ MHz 频段范围内,而 B 部分信号能量则主要是集中在 $0.5 \sim 1.5$ GHz 频段范围内,可见 TE_{21} 、 TE_{31} 模波已明显滞后于 TEM 模波和 TE_{11} 模波.

对于直线型结构,如图 4 所示,其 0° 方向信号含有 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} 模波,受模波速度色散效应的影响较强,信号峰峰值及能量开始传播时变化较大,随着传播的继续进行,高次模波滞后明显,其对信号峰峰值和能量影响减弱,信号表现出衰减较小的特征. 90° 方向上信号高次模波仅包含 TE_{21} ,所以受速度色散效应影响较小,表现出信号幅值和能量变化不大的特点.局部放电产生的电磁波,经过 GIS 筒壁和导杆的一系列折射、反射到达 180° 方向上的信号测量点,此时原始信号和筒壁、导杆的反射波叠加,传播过程复杂,因此该方向上的电磁波信号峰峰值和能量变化不大,如图 3 所示.

对于 T 型结构模型,未经过 T 型结构转折处时,由于模波色散效应,信号传播特征与直线型的相

同.当信号经过 T 型转折处时,电磁波一部分在此处发生反射折回,另一部分向下传播,导致整个能量的分散,因此经过 T 结构后信号峰峰值和能量大幅衰减.远离 T 型结构后,电磁波传播特性与直线型的结果相同,如图 5 所示.由于模波色散效应,T 型结构反射波时域波形峰峰值未出现在波头附近,各测量点信号表现出的特征与直线型结果相同.

3.2 模波模式转变

电磁波在仿真模型内传播时满足

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $k = \omega(\epsilon\mu)^{1/2}$. TE 模波有 $E_z = 0$,由式(3)得

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 H_z = 0 \quad (4)$$

式中: $k_c^2 = k^2 + \gamma^2$, γ 为电导率.当传播路径确定即边界条件确定时,可得到式(4)的本征问题的解 H_z ,进而确定 TE 波中各种模波分量.

当电磁波传播到 T 型结构时,求解式(4)的边界条件发生改变,本征值发生变化,各个模波的值发生变化,表现出产生新的模波、各个模波含量变化等特征,这就是模波模式转变.

由直线型结构频域分析可知,相对于激励源 90° 方向信号高次模波仅含 TE_{21} ,不含有 TE_{11} 、 TE_{31} . T 型结构仿真结果表明,由于模波模式转换,相对于激励源 90° 方向信号高次模波含有 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} ,产生了新的模波,如图 6~图 8、图 11 所示. T 型结构产生的反射波和 port3 部分中 TE_{11} 、 TE_{31} 模波的含量较少, port2 部分这 2 种模波含量较大,表明 T 型结构不同部分产生的模波模式转变效应不同.

3.3 TEM 波

在局部放电产生的电磁波中,TEM 模波是主波,无截止频率,传播速度为光速.在本文设计的仿真模型中,TEM 模波主要集中在 $0 \sim 0.448$ GHz 频段范围内.

对于 T 型结构,对比相对于激励源 0° 、 90° 、 180° 3 个方向点 b 、 o 、 o' 仿真结果发现,各方向上的 TEM 模波含量变化不大,即使是模波模式转变较明显的 90° 方向,表明 TEM 模波传播受 T 型结构的影响较小,可以较小的衰减通过 T 型结构,向 port2、port3 传播.

4 结 论

仿真结果表明,电磁波信号在 GIS 典型腔体(直线和 T 型)中传播时,信号峰峰值和能量主要受模波速度色散效应的影响,在离激励源较近时衰减较大,远离激励源时衰减较小. T 型结构会发生模式转变效应,将在反射和前行电磁波中产生新的模波分量,进而影响电磁波的传播特性. TEM 模波无截止频率,其传播不受结构的影响,可以较小的衰减在 GIS 同轴腔体中传播.

后续工作将对 GIS 及其他设备整体结构中局放传播特性进行研究,以确定局放的正确监测点和提高监测灵敏度.

参考文献:

- [1] YOSHIMURA M, MUTO H, NISHIDA C, et al. Propagation properties of electromagnetic wave through T-branch in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(2): 328-332.
- [2] 王建生,邱毓昌,赵有斌,等. 气体绝缘开关中电磁波的传播特性[J]. 电网技术, 1999,23(9): 150-155.
WANG Jiansheng, QIU Yuchang, ZHAO Youbin, et al. Propagation characteristics of electromagnetic waves in GIS[J]. Power System Technology, 1999,23(9): 150-155.
- [3] 李信,李成榕,李亚莎,等. 有限时域差分法对 GIS 局部放电传播的分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 1-3.
LI Xin, LI Chengrong, LI Yasha, et al. Analysis on partial discharge in GIS by FDTD method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(17): 1-3.
- [4] OKABE S, YUASA S, KANEKO S. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006,13(4): 855-861.
- [5] 马西奎. 电磁场理论及应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000: 136.
- [6] HIKITA M, OHTSUKA S, TESHIMA T. E-M wave characteristics in GIS and measuring the E-M wave leakage at the spacer aperture for partial discharge diagnosis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(2): 453-460.

(编辑 杜秀杰)