

直线及 L 型 GIS 模型电磁波传播特性研究

李军浩, 司文荣, 杨景岗, 黎大健, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了对 GIS 中局部放电的特高频电磁波信号的传播特性进行更深入的理解, 使用 FDTD 算法对直线及 L 型 GIS 模型进行了仿真计算. 对仿真信号进行时域和频域分析, 对比了直线型和 L 型结构对电磁波传播的影响, 研究了不同角度接收到的信号的差异. 研究表明, 对于直线型 GIS, 在腔体中相对激励源 0° 和 180° 的信号峰峰值呈衰减分布, 总能量呈振荡平稳分布, 而 90° 的信号峰峰值和总能量则呈平稳分布. 对于 L 型 GIS, 由于 L 型结构的影响, 经过 L 型结构后, 在相对激励源 0° 和 180° 方向上信号能量和幅值会衰减 70% 左右, 而在 90° 方向上会衰减 50% 左右, 不同角度接收到的信号含有不同的电磁波模式.

关键词: 气体绝缘开关; 局部放电检测; 电磁波传播; 有限时域差分算法

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1280-05

Electromagnetic Wave Propagation Characteristics in Straight and L-Type Gas Insulation Switchgear

LI Junhao, SI Wenrong, YANG Jinggang, LI Dajian, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To profoundly understand the propagation characteristics of electromagnetic (E-M) signals from partial discharge in gas insulation switchgear (GIS), the straight and L-type GIS models are established to carry out the simulation of the propagation characteristics with FDTD method, the result of which is then analyzed in time domain and frequency domain. The influences of the L-section as well as different receiving angles on the propagation characteristics of E-M wave modes are examined with comparison of straight GIS part. The results show that for the straight type the crest value of the received signal decreases at 0° and 180° , the whole energy is distributed in a smooth oscillation and the crest value and whole energy vary slightly at 90° . While for the L type GIS, the crest value and energy at 0° and 180° will decay for about 70% with a 50% decay occurring at 90° . The energy reflection and dispersion in L-section result in the decrease of the crest value and energy.

Keywords: gas insulation switchgear; partial discharge detection; electromagnetic wave; finite different time domain

局部放电是 GIS 中绝缘缺陷的早期征兆, 因此对 GIS 中的局部放电进行有效检测是防止事故发生的重要手段. 特高频(UHF)电磁波检测方法由于具有抗干扰性能好、检测灵敏度高的优点得到了广泛的应用. GIS 腔体是一个具有高压导杆和接地腔

体的同轴结构, 在其中会存在 TEM、TE 和 TM 等类型的电磁波, 不同类型的模波具有不同的截止频率, 只有高于截止频率之上的波才能传播. 由于 GIS 结构类型多样, 不仅有直线结构, 在出线 and 接头处还存在 L 型和 T 型结构, 因此需要对特殊结构的 GIS

模型中电磁波的传播特性进行研究。

有限时域差分算法(FDTD)是一种近年来发展起来的计算复杂电磁问题的方法,它将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进以求解空间电磁场。在电磁波传播的仿真方面,FDTD算法得到了广泛的应用^[1-3]。

本文使用 FDTD 算法研究了直线和 L 型 GIS 模型中电磁波的传播特性,研究了不同角度下 L 型结构对电磁波传播中幅值和频率分布的影响。对直线型和 L 型结构中电磁波的衰减特性进行了分析。

1 GIS 腔体模型的建立

参照一段平顶山高压开关厂生产的 220 kV 单相 GIS 的尺寸,内导杆半径 a 为 5.3 cm,腔体半径 b 为 16 cm,直线型腔体总长度为 268 cm,两种仿真结构的示意图如图 1 所示。

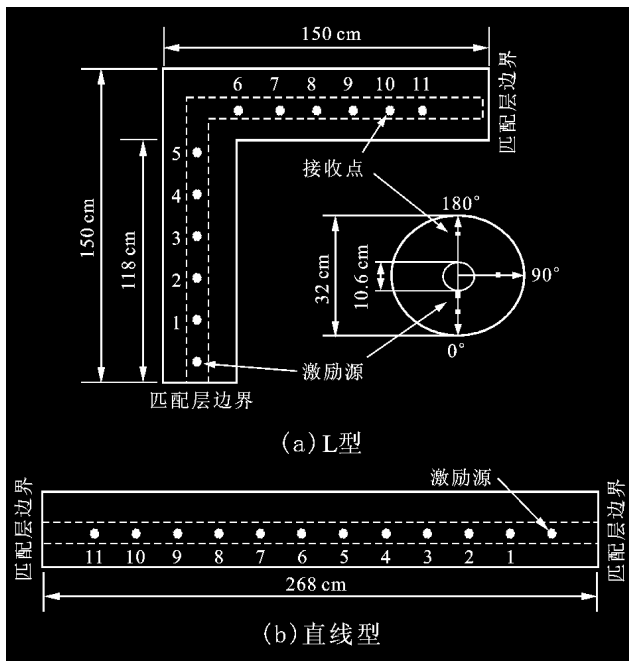
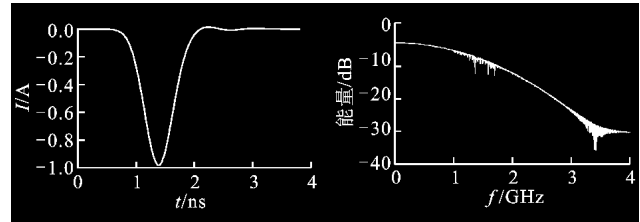


图1 直线及 L 型 GIS 仿真示意图

在垂直于导杆的 0° 方向上设置一段 2 cm 的金属尖刺作为激励源,激励源采用幅值为 1 A(实际 GIS 中局部放电可能出现的放电电流的上限数量级)、负载为 $50\ \Omega$ 的高斯电流脉冲,能辐射出 -30 dB 带宽为 3 GHz 的高频电磁波信号。激励源的时域波形和频谱如图 2 所示。

沿导体方向在激励源不同的距离放置接收点,在 0° 、 90° 、 180° 每隔 20 cm 放置一个接收点,每个角度共放置 11 个接收点,接收负载阻抗为 $50\ \Omega$,接收方向沿导杆径向指向筒壁。仿真中计算的最高频率为 3 GHz,则最大剖分胞元尺寸 $L_{\max} = \frac{c}{10f}$,式中 c



(a)时域波形 (b)频域特性

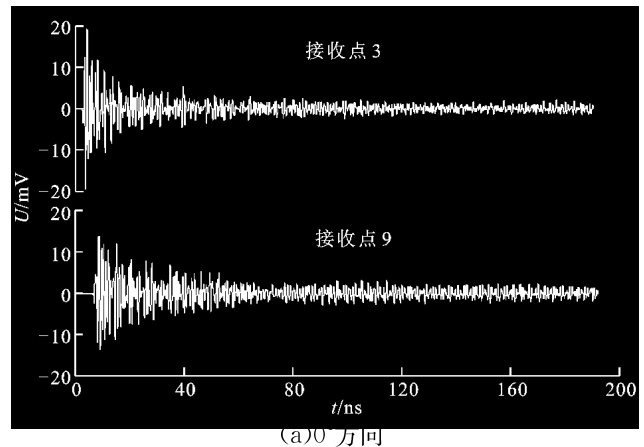
图2 激励源时域波形与频域特性

为光速, f 为激励最高频率,因此剖分单元为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$,每一个接收点占据一个剖分单元,则接收到的电压 $V = 0.01E$, E 为接收点的电场强度。仿真中的时间步长为 19.5 ps,总仿真时间长度为 200 ns。为了单纯研究 GIS 腔体结构的影响,在仿真腔体的两端采用匹配层(PML)。PML 是一种特殊的介质层,该层的波阻抗与相邻介质的波阻抗完全匹配,电磁波在 PML 上会被完全吸收而不存在折反射现象,因此可以避免两端筒壁对电磁波的折反射影响。

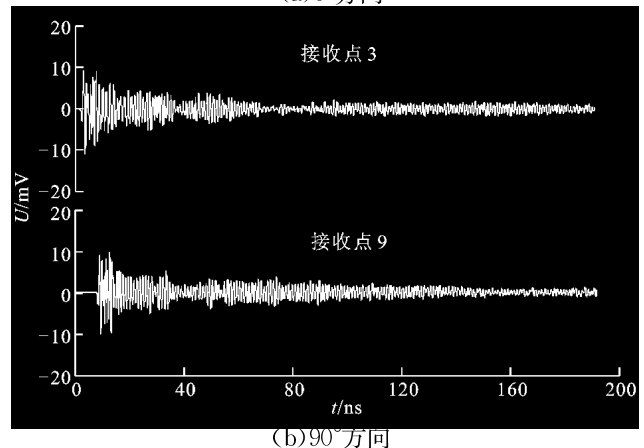
2 仿真结果分析

2.1 时域结果分析

直线型和 L 型 GIS 的仿真时域波形如图 3 和图 4 所示,选择接收点 3 和接收点 9 进行说明。从图



(a) 0° 方向



(b) 90° 方向

图3 直线型 GIS 仿真时域波形

3a可以看出,在直线型腔体中的 0° 方向,随着接收点远离激励源,信号的峰-峰值变小.对于 90° 方向上,随着接收点远离激励源,信号峰-峰值没有明显变化.对于L型腔体,从图4可以看出,不管是 0° 还是 90° 方向,经过L结构后其整体幅值都会变小.

由图5及图6可以看出, 0° 及 180° 方向具有类似的分布,而 90° 方向上则幅值和能量都较小.对于直线型GIS模型,随着远离激励点, 0° 及 180° 方向上信号的峰-峰值逐渐变小,但其能量分布则变化不大, 90° 方向上,不管峰-峰值还是能量都呈平稳分布.

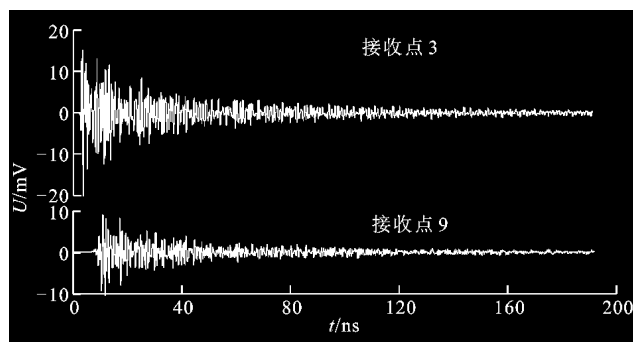
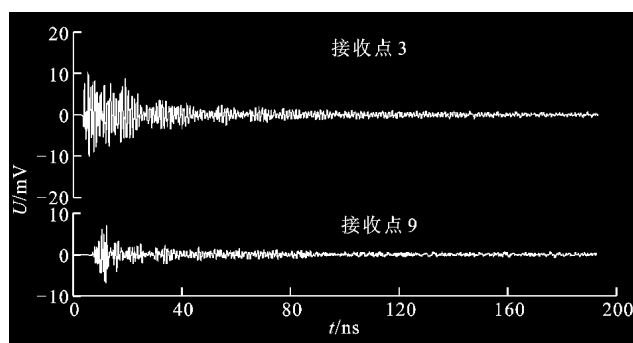
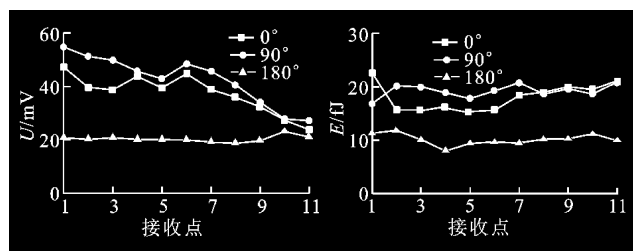
(a) 0° 方向(b) 90° 方向

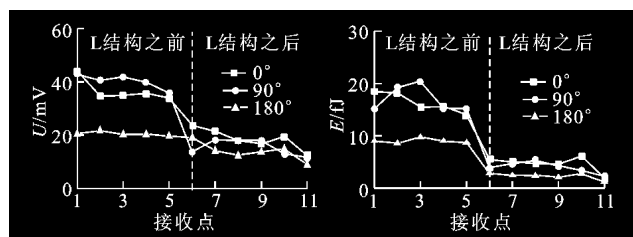
图4 L型GIS仿真时域波形



(a)峰-峰值分布

(b)能量分布

图5 直线型GIS模型各点峰-峰值及能量分布



(a)峰-峰值分布

(b)能量分布

图6 L型GIS模型各点峰-峰值及能量分布

对于L型GIS模型,经过L结构后,在3种角度上都存在峰-峰值及能量的衰减,且由于L结构会对信号具有反射作用,与L结构之前的信号相比直线型同位置要略大.从图5a可以看出,由于L结构会对电磁波产生反射,导致L型GIS模型接收点3接收到的信号幅值大于直线型GIS模型在接收点3接收到的信号.到了接收点9,从图5a中可以看出,由于电磁波信号在经过L结构后一部分能量发生反射折回,一部分能量经过L结构进入下一段,导致L型GIS模型在接收点9接收到的信号存在能量分散,因此相比直线型GIS模型的接收点9存在大幅衰减.

2.2 频域结果分析

对于同轴结构中电磁波的传播,TEM是基本模式,任何频率下都可以传播,但TE和TM波在低于截止频率以下是不能传播的. TE_{mn} 模波和 TM_{mn} 模波的截止频率可以用下面的公式进行估算^[4-7].

TE_{mn} 模波的截止频率

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

TM_{mn} 模波的截止频率

$$f_c = \frac{cn}{2(b-a)} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

对于本文的仿真模型, TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} 模波的截止频率分别为 448、896、1 344 MHz.

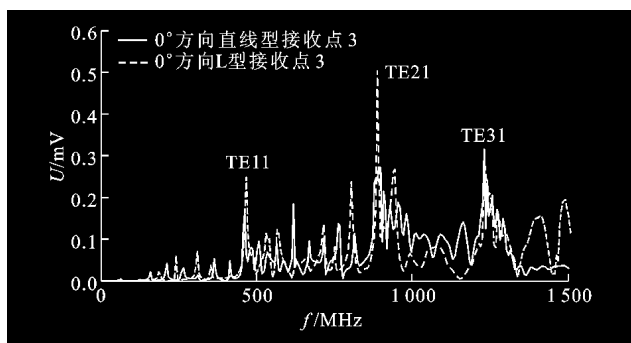
为了研究L型结构对电磁波传播的影响,比较了直线型GIS模型和L型GIS模型在不同接收角度和接收位置的电磁波仿真信号的频谱分布,结果如图7和图8所示.可以看出, 0° 方向的接收信号在TE波的几个截止频率部分会有波峰出现,而 90° 方向的接收信号,因为TE波的奇次模波中电场强度节点的存在^[8-9],导致电磁波信号只会在TE波的偶次模波(即 TE_{21} 波截止频率)出现波峰.

3 讨论

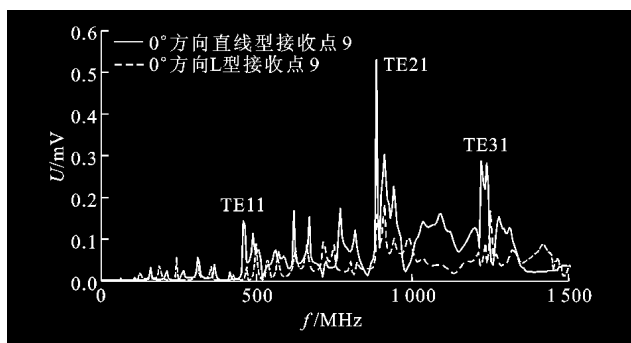
图5是直线型GIS模型不同接收点在 0° 、 90° 和 180° 时接收到的信号的峰-峰值及总能量的分布图.可以看出,直线型GIS模型中,在 0° 和 180° 方向上,越远离激励源,信号峰-峰值越小,在最小的地方衰减了一半左右,但是在 90° 方向,距离激励源不同距离的接收点接收到的信号并没有明显的衰减.

电磁波信号幅值的衰减主要就是由高次模波速率色散特性导致的.高次模波的传播速率为

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

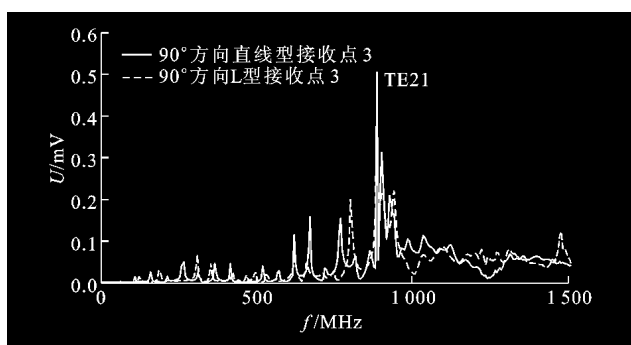


(a)接收点 3

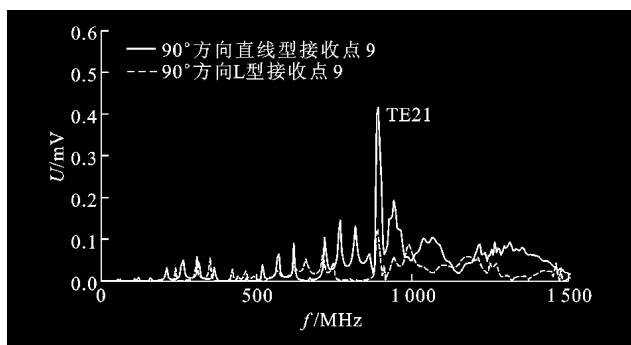


(b)接收点 9

图7 0°方向接收点频域波形



(a)接收点 3



(b)接收点 9

图8 90°方向接收点频域波形

则高次模波的传播速度是和频率相关的。

可以看出,具有更低截止频率的模波具有更高的传播速度。相对而言,TEM模波的截止频率为0,则其传播速度为光速。对于GIS中局部放电激发的电磁波,是TEM、TE、TM等不同类型和不同模波的混合。从图7可以看出,在0°方向上是TE11、

TE21和TE31等高次模波的混合,在远离激励点的过程中,高次模波因为传播速度比较低,延时现象越来越明显,导致了信号峰-峰值的降低。在200 ns的范围内,整个能量都是可以接收到的,所以能量还是呈平稳分布。

从图8可以看出,90°方向上只存在TE的偶次模波即TE21模波,不存在奇次模波,所以电磁波的传播不受TE11、TE31模波的影响。信号中的主要能量部分是相对单一的TE21部分(低频段的TEM波能量很小,可忽略不计),其传播速率分散性小,所以幅值不会出现速率色散特性,其信号幅值基本随距离不变。

从图6可以看出,L型GIS模型在通过L型结构之后,信号幅值会出现大幅衰减,在0°和180°方向上信号能量会衰减70%左右,而在90°方向上会衰减50%左右。因为L型结构的存在,电磁波信号一部分在此处发生反射折回,一部分会进入下一部分,导致了整个能量的分散,因此会发生经过L结构后能量的大幅衰减。

4 结 论

使用FDTD方法对直线及L型GIS模型中电磁波的传播特性进行了仿真计算,研究了直线型GIS模型中速率色散特性和L型GIS模型中L结构对电磁波传播的影响。研究表明,由于速率色散特性的影响,在直线型GIS中随着接收点远离激励源,接收电磁波信号的峰-峰值呈衰减分布,但总体能量变化不大。对于L型GIS,由于L结构的影响,在经过L结构后信号能量衰减很大。信号频域分析表明,在0°方向存在TEM和TE11、TE21、TE31等高次模波,而在90°方向上只存在TEM和TE21(TE模式的偶次模波)等模波,信号频率分量的不同导致了在90°方向信号峰-峰值相差不大。

后续工作中将会根据实际的GIS试验对仿真工作进行进一步的验证和分析。

参考文献:

- [1] 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):150-155.
- 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):150-155.

- [2] 黄兴泉, 康书英, 李泓志, 等. GIS局部放电超高频电磁波的传播特性研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 32-35.
HUANG Xingquan, KANG Shuying, LI Hongzhi, et al. Simulation study on the characteristics of ultra-high frequency electromagnetic wave in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 32-35.
- [3] 黄兴泉, 康书英, 李泓志, 等. GIS局部放电超高频检测法有关问题的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 37-63.
HUANG Xingquan, KANG Shuying, LI Hongzhi, et al.,. Research on ultra-high-frequency method for detection of partial discharge in GIS[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 37-63.
- [4] HIKITA M, OHTSUKA S, TESHIMA T. Electromagnetic(EM) wave characteristics in GIS and measuring the EM wave leakage at the space aperture for partial discharge diagnosis[J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2007, 14(2): 453-460.
- [5] OKABE S, KANEKO S. Electromagnetic wave propagation in a coaxial pipe GIS model [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2007, 14(5): 1161-1169.
- [6] OKABE S, YUASA S, KANEKO S. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic wave in GIS [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2006, 13(4): 855-861.
- [7] OKABE S, KANEKO S. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in gas insulated switchgear [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2007, 14(3): 702-709.
- [8] HIKITA M, OHTSUKA S, TESHIMA T. Examination of electromagnetic mode propagation characteristics in straight and L-section GIS model using FD-TD analysis [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2007, 14(6): 1477-1483.
- [9] 朱建清. 电磁波工程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.

(编辑 杜秀杰)