高压开关设备特高频局部放电信号仿真特性研究

局部放电电磁波信号在通过开关柜缝隙处向外传播时受缝隙的影响而产生衰减变化。在开关柜缝隙处放置传感器是分析局部放电特性的一种方法，它可以接收开关柜中辐射出来的电磁波信号。为研究开关柜缝隙对 UHF 信号传播的影响，本文采用时域有限差分法对 UHF 信号的衰减特性进行了建模分析，研究了 UHF 信号在开关柜缝隙处的辐射场强时域参数变化特性；研究了 UHF 信号通过开关柜缝隙过程前后辐射场强时域参数变化特性。研究结果表明，电磁波通过开关柜缝隙时各个方向的场强分量是不同的；当电磁波通过开关柜缝隙向外传播时衰减幅度很大。

陶诗洋[1] 王文山[1] 任志刚[1] 程序[1] 吴麟琳[1] 李明忆[1]齐旭[2] 李洋[2]/1.北京电力科学研究院 2.国网北京市电力公司

陶诗洋/高级工程师

关键词/Keywords
开关柜 · 局部放电 · FDTD · UHF电磁波 · 衰减特性 ·

0 引言

开关柜是电力系统中最为常见的设备之一，其重要性不言而喻，若开关柜发生故障，带来的各种损失是巨大的。但由于受装配工艺、环境及温度等因素的影响，开关柜内某些部位会产生集中的电场，使之发生局部放电的现象。因此，若能及时地发现开关柜早期发生的局部放电，预先了解开关柜的缺陷情况，就能够减少故障发生率，对输电网或配电网的安全运行都是有益的。局部放电能激发出频带上 GHz 的电磁波信号[1]，并能从开关柜的缝隙中传播出来。因此，在开关柜柜体与柜门的接缝处装设 UHF 传感器是进行开关柜局部放电带电检测的一种方法。研究电磁波在开关柜内与开关柜缝隙处的传播对于 UHF 带电检测有着实际的指导作用。

国家电网公司科技项目 配电网带电检测技术联系及状态检修技术深化研究（52020114026L）。

有限时域差分法（Finite Difference Time Domain，FDTD）是一种分析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。因此，FDTD 算法在电磁波传播的仿真研究中得到了广泛应用[2]。

国内外学者对开关柜内外的电磁波传播与 UHF 带电检测法进行了较多的研究。文献[1，3-4]使用 FDTD 方法与 FEM 法仿真研究了开关柜中结构与各种元件对电磁波传播的影响。文献[5]采用 FDTD 法仿真研究开关柜缝隙外电磁波衰减特性。文献[5-6]实验研究了使用 UHF 法检测不同缺陷放电情况。

本文采用 XFDTD 软件，仿真研究了电磁波在开关柜电缆仓不同缝隙处各个方向上场强的大小与原因，研究了电磁波在通过缝隙前后过程中场强大小的变化情况。

1 局部放电电磁波辐射的基本原理

开关柜内部绝缘部位发生的局部放电通常可以看做是由一个波源产生的，该波源产生的电磁波信号在介质中以球面波的形式传播[7]，其电磁波信号遵循麦克斯韦的电磁场基本方程。引入动态向量位和动态标量位来分析局部放电产生的时变电磁场，这时该基本方程组转化为动态位方程[8-10]

中国知网 https://www.cnki.net

$$\nabla^2\vec{A}=-\mu\vec{\delta}_C+\nabla(\mu\varepsilon\frac{\partial\varphi}{\partial t})+\nabla(\nabla\cdot\vec{A})+\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}$$
$$\nabla^2\varphi+\nabla\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}=-\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中，$\vec{A}$ 为动态向量位，Wb/m；φ 为动态标量位，V；$\vec{\delta}_C$ 为电流密度，A/m^2；ρ 为激励源，C/m^3。

式（1）表示了动态位与激励源 ρ 和电流密度 $\vec{\delta}_C$ 之间的关系，考虑洛伦兹条件 $\nabla\vec{A}+\mu\varepsilon\frac{\partial\varphi}{\partial t}=0$，又有 $v=1/\sqrt{\mu\varepsilon}$，则式（1）可简化为

$$\nabla^2\vec{A}-\frac{1}{v^2}\cdot\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}=-\mu\vec{\varepsilon}_C$$
$$\nabla^2\varphi-\frac{1}{v^2}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}=-\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2)$$

该动态位的达朗贝尔方程，在时变场的无源区域（ρ 和 $\vec{\delta}_C$ 均为 0），考虑体积 V 中所有电荷的作用，其解为

$$\varphi(x,y,z,t)=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\int_V\frac{\rho(x',y',z',t-\frac{r}{v})}{r}\mathrm{d}V \quad (3)$$

$$\vec{A}(x,y,z,t)=\frac{\mu}{4\pi}\int_V\frac{\vec{\delta}_C(x',y',z',t-\frac{r}{v})}{r}\mathrm{d}V \quad (4)$$

式（3）和式（4）说明局部放电产生的电磁波是以速度 v 沿着 r 方向传播的，它是时间与位置的函数，该电磁波的能量以速度 v 沿着 r 方向分布，即沿电磁波的传播方向流动[11-13]。开关柜内部的结构较为复杂，电磁波在开关柜内的传播方式式包括横电磁波（TEM）、横电波（TE）和横磁波（TM）。

2　开关柜电缆仓模型 FDTD 仿真

2.1 模型结构设置

使用 CREO 2.0 模型搭建软件，根据 XX 牌 XX 型号的真实开关柜电缆仓模型进行搭建，之后导入 XFDTD 6.0 软件中。仿真模型立体图如图 1 所示。该电缆仓模型包含了电缆仓面板、母线排、绝缘子、电缆、电流互感器和螺栓等几个部分。由软件搭建的仓体模型的各个部分尺寸与真实仓体的各个部分尺寸均一致。仓体尺寸为 800 mm×1250 mm×850 mm，面板与仓门的厚度均为 5 mm，仓门尺寸为 790 mm×840 mm，即仓门与仓体的缝隙（以下简称缝隙）为 5 mm。图 1 中，仓门尺寸为 790 mm×840 mm。电流互感器尺寸为 200 mm×200 mm×50 mm，母线排厚度均为 5 mm，三相电缆的垂直高度为 350 mm。绝缘子直径为 100 mm，每片厚 20 mm，绝缘子总长为 200 mm。模型的边界条件设置为 7 层 PML 吸收边界。

母线排、仓门、面板、电缆抽头和螺栓等金属部分均设置为理想导体；对电缆的材料设置为“橡胶”；对电流互感器、绝缘子的材料设置为“环氧树脂”。仓体内部以及外部的计算空间采用理想空气。各个材料相对应的电导率与介电常数如表 1 所示。

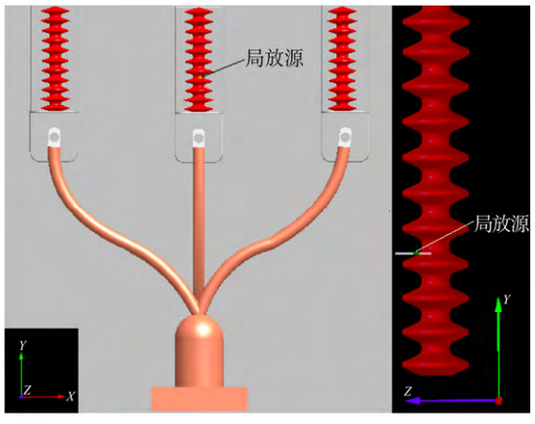

图 1　开关柜电缆仓仿真模型及局放源位置

表 1　仿真模型中各个部件的相对介电常数与电导率

	相对介电常数	电导率/（S/m）
理想导体	无穷大	无穷大
橡胶	0	2.8
环氧树脂	3.8	0

2.2　激励源的设置

开关柜内不同的缺陷局部放电产生的电流波形是不尽相同的，本文采用开关柜内绝缘子沿面放电的实际放电波形作为激励源，其时域波形如图 2 所示。设置长为 3 cm 的线电流源为局放源。局放源位置如图 1 所示，位于与电缆仓上部面板相连的中部绝缘子上的一点，坐标为（101，160，162），方向沿正 Z 轴。激励源设置在线电流源的中心点上。

仿真计算中所用最高频率设置为 6 GHz，那么利用下式确定胞元尺寸：$L_{max}=c/(10f)$，其中 L_{max}

中国知网 https://www.cnki.net

为最大元胞的尺寸；c 为光速，3×108 m/s；f 为激励最高频率，因此 L_{max}=5 mm/cell。即剖分晶格的一个完整的元胞尺寸为 5 mm×5 mm× 5 mm。

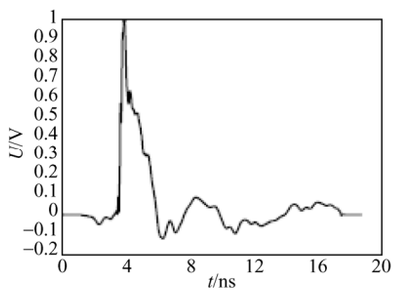

图 2　局放源的时域波形

3　仿真结果分析

在 x=101 的平面上设置记录场强分布图，以此观察电磁波的传播情况与仓体内电场分布情况，如图 3 与图 4 所示。从图 3 可以看出，线电流源产生的辐射场以球面波的形式向四周传播。当电磁波遇到障碍物时，一部分会发生反射，一部分会绕过障碍物继续向前传播。从图 4 中可以观察到电磁波通过开关柜的缝隙处向外传播的过程。当向前传播的电磁波到达缝隙处时，一大部分受到电缆仓壁的阻挡而发生反射，而少部分透过缝隙向外传播，形成衍射的现象。在缝隙处传播的电磁波由于在缝隙处不断地反射，反射波之间相互叠加，使得缝隙处的辐射场强度增大，波形发生严重的畸变。图中不同的颜色就代表了不同的辐射场强度。

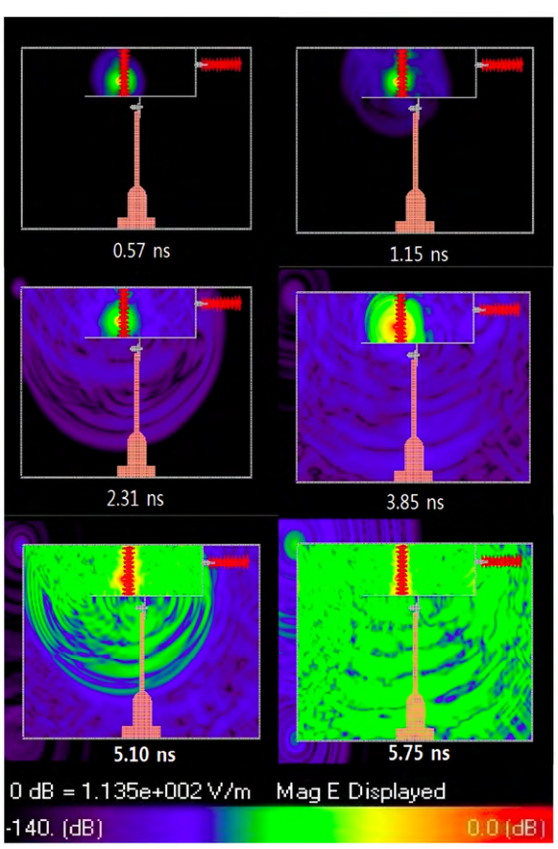

图 3　UHF 信号在开关柜电缆仓内传播的过程

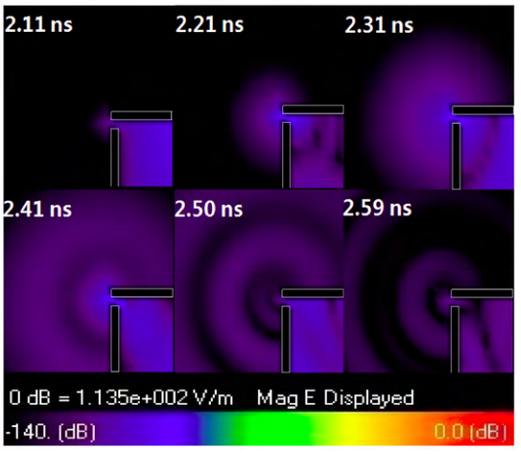

图 4　UHF 信号在开关柜电缆仓缝隙处传播的过程

3.1 不同缝隙处各个方向上的辐射场强度

电磁波在传播过程中，由于路径、障碍物等因素，会使得不同点上的各个方向上的辐射场强度发生变化。因此，本文将对电缆仓缝隙处的各个方向上的辐射场强度进行研究。在缝隙处的上下左右四个位置观测点，分别为观测点 1（101，189，271）、观测点 2（101，22，271）和观测点 3（22，106，271）和观测点 4（179，106，271），如图 5 所示。在这 4 个点上分别获取相应的 x，y，z 三个方向上的电场波形 E_x、E_y 与 E_z。

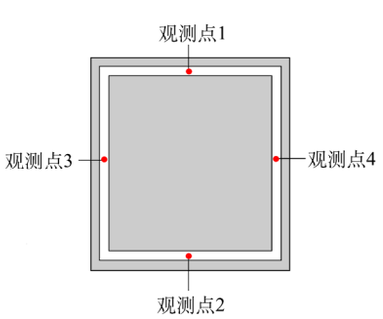

图 5　观测点 1、2、3、4 的位置（开关柜电缆仓主视图）

中国知网 https://www.cnki.net

图 6 记录了观测点 1 的 E_x、E_y、E_z 的波形。并且记录四个观测点处各个方向的场强峰峰值大小，如表 2 所示。

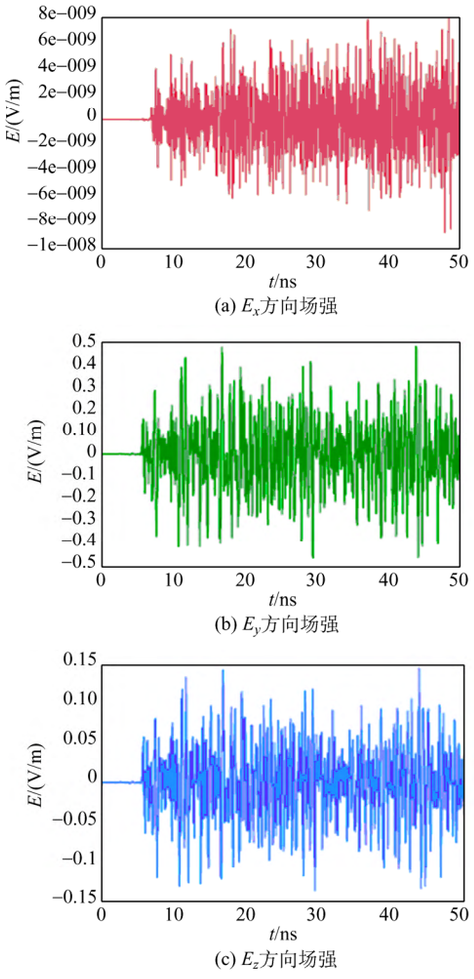

图 6　观测点 1 处各方向场强波形图

表 2　观测点 1、2、3 和 4 处各方向场强峰峰值

观测点	E_x/（V/m）	E_y/（V/m）	E_z/（V/m）
1	1.7×10^{-8}	0.94	0.29
2	1.6×10^{-8}	0.79	0.22
3	0.78	4.7×10^{-8}	0.27
4	0.75	4.6×10^{-8}	0.27

对于观测点 1、2，E_y 远远大于 E_x，略大于 E_z；对于观测点 3、4，E_x 远远大于 E_y，略大于 E_z。可见仓体上下处的缝隙 y 方向上的辐射场强度最大，仓体左右处的缝隙 x 方向上的辐射场强度最大。

缝隙的截面积接近于矩形，因此，根据其结构的特点，可以用矩形波导的理论对电磁波通过缝隙的传播方式与电场强度在缝隙处的分布情况进行分析。

电磁波传播过程中，沿传播方向的数值分量很小。开关柜的缝隙对电磁波传播的影响可按矩形波导计算，矩形波导的模式指数和临界频率的关系为

$$f=\frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2+\left(\frac{n}{b}\right)^2} \tag{5}$$

式中，a 和 b 为波导尺寸，a 为宽边尺寸，b 为窄边尺寸；m 和 n 为模式指数。

由该公式可知 TE10 波的截止频率最低。

对于本文中电磁波在缝隙处的传播情况，以仓体上下处的缝隙为例，z 为信号传播方向，所以 E_z 幅值很小。TE10 波的截止频率最低则表明 y 方向场强可以通过上下处的缝隙，而 x 方向幅值会很小，所以 E_y 大于 E_x 与 E_z。对于电磁波在仓体左右处的缝隙传播情况，也可以用矩形波导理论进行分析。

3.2 电缆仓内外不同观测点的辐射场强度

根据上文的一些结论，可以看出电磁波在缝隙处任何位置的传播特点都是相似的，且上部缝隙 E_y 的值最为明显，因此下文将选择上部缝隙 E_y 作为研究对象。

在观测点 1 的 z 方向上相互距离 10 mm 的位置设置再 4 个观测点（仓内 2 个，仓外 2 个），分别为观测点 5（101，189，267）、观测点 6（101，189，269）、观测点 7（101，189，273）和观测点 8（101，189，275），如图 7 所示。在这 4 个点上分别获取相应的 y 方向上的电场波形 E_y。

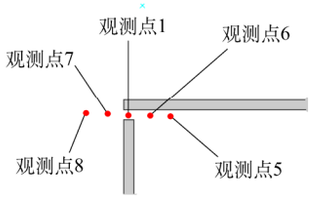

图 7　观测点 1、5、6、7 和 8 的位置开关柜电缆仓上部缝隙的截面积图

由仿真结果可得出观测点 1、5、6、7 和 8 的 E_y 的波形，记录这些波形的峰峰值，并画出变化趋势图，如表 3 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

表 3　5 个观测点处 E_y 的峰峰值

（单位：mm）

观测点 5	观测点 6	观测点 1	观测点 7	观测点 8
0.29	0.52	0.94	0.12	0.07

从表 3 可以看出 5 个观察点的 y 方向上的辐射场强度值的变化。E_y 从观测点 5 到观测点 6 增强了 0.23 V/m, 从观测点 6 到观测点 1 增强了 0.42 V/m, 从观测点 1 到观测点 7 衰减了 0.82 V/m, 从观测点 7 到观测点 8 衰减了 0.05 V/m。

因此，无论在电缆仓内外，E_y 总是随着观测点逐渐远离缝隙而逐渐衰减，总是随着观测点逐渐接近缝隙而逐渐增强。

对于电缆仓内，每当远离缝隙处 10 mm，辐射场强大约衰减 1/2 的幅值。而相对于仓内，仓外在远离缝隙 10 mm 处便已衰减十分明显，衰减幅度远大于仓内。

4　结束语

本文通过仿真计算了局放 UHF 信号在开关柜电缆仓中的传播特性以及不同位置的缝隙处、电缆仓内外不同观测点的辐射场强度，可得到如下结论。

1）仿真结果表明，电磁波通过仓门的缝隙处时，各个方向的场强分量是不同的。这与电磁波在缝隙处的矩形波导时各个方向的场强分量是不同的，这跟电磁波的传播方向、该矩形波导信号传播的截止频率有关。

2）电磁波在通过仓门的缝隙的过程中，越接近缝隙处辐射场强越大，在缝隙处的辐射场强度最大。电磁波通过缝隙之后，其辐射场强衰减严重，且成一定的规律性。

3）本文研究内容对工程实际中用于开关柜带电检测的特高频传感器的制作有指导作用。特高频传感器可被制作成为能够尽量贴近仓门与仓体的缝隙的形状进行检测，能够提高检测效率。

参考文献

[1] 姚陈果，黄琮鉴，吴彬，等．采用时域有限差分法分析开关柜中超高频信号传播特性[J].高电压技术，2013，02：272-279．

[2] 程序，颜廷利，詹花茂，等．GIS 中局部放电 UHF 信号传播特性研究[J]．高压电器，2014，05：30-35．

[3] 王有元，刘强，陆国俊，黄炎光．开关柜结构对超高频电磁波传播特性的影响分析[J].电工技术学报，2013，11：293-300．

[4] Zheng Bo，Bojovschi，Alexe1，Chen Xinpeng．Electromagnetic radiation spectrum from partial discharge in air-insulated medium voltage switchgears[C]．2012 IEEE Power Engineering and Automation Conference，2012．

[5] 陶诗洋．高压开关柜带电检测实验平台建设及实证研究[D]．北京：华北电力大学，2012．

[6] 魏东亮．10 kV 开关柜多维度带电测试技术研究[D]．广州：华南理工大学，2013．

[7] Judd M D，Li Yang，Hunter Lan BB．Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part I：sensors and signal interpretation [J]．IEEE Electrical Insulation Magazine，2005，21（2）：5-12．

[8] 常文治，唐志国，李成榕，等．变压器局部放电 UHF 信号传播特性的仿真分析[J]．高电压技术，2009，(7)：1629-1634．

[9] 彭仲秋．瞬变电磁场[M]．北京：高等教育出版社，1989．

[10] 汪茂光．几何绕射理论[M]．西安：西北电讯工程学院出版社，1985．

[11] 唐志国．电力变压器局部放电特高频定位方法的研究[D]．北京：华北电力大学，2006．

[12] 冯慈璋．电磁场[M]．2 版．北京：高等教育出版社，1995．

[13] 吴志忠，杜忠顺．电磁场工程中的场与波[M]．南京：东南大学出版社，1992．

作者简介

陶诗洋（1984-），男，硕士，高级工程师，主要从事高压电气设备状态检测诊断与研究工作。

（收稿日期：2015 - 12 - 10）EA

（编辑：杨帆）

中国知网 https://www.cnki.net