

变压器中局部放电超高频信号传播的仿真研究

徐斌^{1,2}, 王晶¹, 李彦明¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

Emulational Study on the Propagation of UHF Signal Emitted by PD in Transformers

XU Bin^{1,2}, WANG Jing¹, LI Yan-ming¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

摘要: 利用仿真软件建立变压器结构模型,对局部放电辐射的电磁波在箱体内部的传播情况进行了仿真,并研究了变压器铁心、箱体缝隙对局部放电信号传播的影响。仿真结果表明,铁心和缝隙对电磁波的传播有衰减作用,在各个边角处会出现电磁波的最大幅值,在这些位置安装传感器有较好的检测效果。

关键词: 变压器; 超高频局部放电检测; 仿真

中图分类号: TM855

文献标志码: A

Abstract: Transformer structure is modeled by simulation software to emulate the propagation characteristic of EM wave emitted by PD in transformers. The effect of transformer core and tank gap on signal propagation is discussed. The results show that EM wave propagation is attenuated by core and gap, and the maximal value of EM wave is appeared in the corner of transformers. The detection result will be preferable if transducer is fixed at these positions.

Key words: transformer; ultra high frequency PD detection; simulation

0 引言

变压器局部放电超高频检测方法(UHF法)具有测量频率高、频带宽、信息量大、抗干扰性强等优点,可以较全面地研究变压器绝缘系统中局部放电特征,最终实现变压器局部放电的在线监测,具有广阔的应用前景。由于变压器内部绝缘结构的复杂性,电磁波在其中传播时会发生多次折反射及衰减。当发生局部放电时,超高频信号在变压器箱体内传播的同时,会通过变压器的接缝处泄漏出来,从而使在外部对变压器进行局部放电的检测成为可能。而接缝的大小,外部天线与变压器箱体距离的远近又将对检测到的信号的幅值和频率产生一定影响,给分

析变压器局放特性带来了很大困难。因此,深入研究局部放电超高频电磁波在变压器内部的传播机理十分必要。

当采用UHF方法进行局部放电检测时^[1-6],主要关注对采集到的UHF信号进行分析,但对原始信号与检测到的信号之间的关系、传感器放置位置的不同对检测信号的影响,以及其他因素对信号传播的影响考虑较少。笔者利用仿真软件对变压器模型进行分析,研究了变压器铁心、箱体缝隙对局部放电信号传播的影响。

1 局放超高频电磁波的理论分析

1.1 局部放电信号的特性分析

每一次局部放电都发生正负电荷中和,伴随有一个陡的电流脉冲,并向周围辐射电磁波。试验结果表明:局部放电所辐射的电磁波的频谱特性与局放源的几何形状以及放电间隙的绝缘强度有关。当放电间隙比较小时,放电时间比较短,电流脉冲的陡度比较大,辐射高频电磁波的能力比较强;而放电间隙的绝缘强度比较高时,放电过程比较快,此时电流脉冲的陡度比较大,辐射高频电磁波的能力也比较强。可见,放电电流脉冲的陡度与脉冲宽度和电磁波的辐射有关,有必要对放电电流的特性加以分析。

局部放电脉冲是一个非周期波,从波动的观点来说,它可以展开为傅里级数,分解为各次谐波的叠加,进而可以研究诸谐波的频率和振幅的关系。由数理分析知识可知,一个非周期波经傅里变换可以得到一个连续的频率谱图。

为了简化分析,将局部放电电流看成是一个对称脉冲,用高斯脉冲模型来表示,即可将这部分局部放电电流表示为

收稿日期: 2007-01-13; 修回日期: 2007-03-21

作者简介: 徐斌(1978-),男,博士研究生,从事电力设备检测和故障诊断技术的研究。

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

式中 I_0 为峰值电流; τ 为脉冲宽度, 在最大幅值一半处脉冲宽度为 2.36τ 。将其进行傅里变换可得

$$F(\omega) = F[I(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) e^{j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) e^{j\omega t} dt = \sqrt{2\pi} I_0 \tau \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau^2}{2}\right) \quad (2)$$

式(2)表明, 脉冲电流的频谱与最大峰值电压及脉冲宽度有关, 它是由不同的频率分量组成的连续谱图, 广泛分布在全频域范围内。

1.2 局部放电信号的电磁波发射原理

变压器绝缘结构中发生的局部放电信号可以看成是由一个点源发出的, 当电介质某处发生局部放电时, 由放电产生的电磁扰动随时间变化, 会产生电磁波, 它们遵循麦克斯韦的电磁场基本方程。引入动态向量位 A 和动态标量位 ϕ 来分析局部放电产生的时变电磁场, 这时麦克斯韦基本方程组转化为动态位方程^[2, 7]

$$\begin{cases} \nabla^2 A - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \text{grad}(\text{div} A) = \mu_0 j \\ \nabla^2 \phi + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)为动态位与激励源 ρ 和电流密度 j 之间的关系, 在电荷的分布空间 V 内得到的解为

$$\begin{cases} \phi(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(x', y', z', t - \frac{r}{c})}{r} dV \\ A(x, y, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{j(x', y', z', t - \frac{r}{c})}{r} dV \end{cases} \quad (4)$$

式(4)说明局部放电产生的电磁波是以速度 c 沿着 r 方向传播出去的, 它是时间与位置的函数, 是一种横电磁波(TEM波)。该电磁波的能量以速度 c 沿着 r 方向分布, 即沿电磁波的传播方向流动。

2 超高频信号在变压器内部传播的仿真研究

2.1 仿真软件 CST Microwave Studio 介绍

CST Microwave Studio 是为快速、精确仿真电磁场高频问题而专门推出的三维电磁场仿真软件。CST Microwave Studio 可以应用在仿真电磁场领域和大多数的高频电磁场问题上, 包括耦合器、滤波器、平面结构电路、联结器、IC 封装、各种类型天线、微波元器件、蓝牙技术和电磁兼容/干扰等。

CST Microwave Studio 采用时域有限积分法^[8], 即将麦克斯韦积分方程离散化来进行数值求解。由于采用的是时域算法, 不需要进行矩阵求逆, 仿真需

要的 CPU 时间和内存耗费几乎和网格数成正比关系。而有限元法(FEM)和矩量法(MoM)需要的 CPU 时间和内存耗费分别与网格数的平方和三次方成正比, 因此时域有限积分法更适合电大物体的仿真。

笔者采用 CST MWS 5.0 对变压器模型进行了仿真, 仿真用机配置为: 赛扬 2.4 GHz CPU、512 MB SDRAM、80 GB 硬盘、专业版 Windows XP 系统。

2.2 模型的建立

电磁波在真空中的传播速度为 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ mm/ns}$, 为了反映出电磁波的传播情况, 设置长方体变压器空箱体的三边尺寸分别为 $2000 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 。由于关心的是超高频信号, 设置频率范围为 $0.4 \sim 1.2 \text{ GHz}$, 根据波长、频率和波速的关系可知, 此激励信号将产生 $250 \sim 750 \text{ mm}$ 波长的电磁波。又根据天线理论, 当天线尺寸和电磁波 $1/4$ 波长可以相比的时候, 天线辐射最强。所以设置天线长度为 150 mm 、半径为 2 mm 是根据实验时用的鞭状天线实物测量得到的。这样一个就用长度为 150 mm 半径为 2 mm 的理想导体来模拟发射电磁波的天线, 见图 1。将理想导体的端面设置成波口。该波口上通过激励信号, 见图 2。

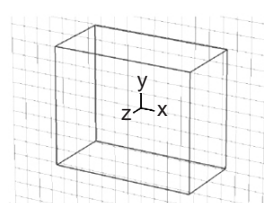


图1 空箱体中的局放模型

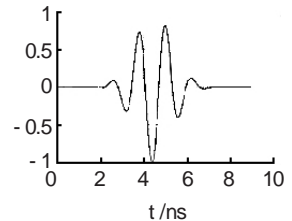
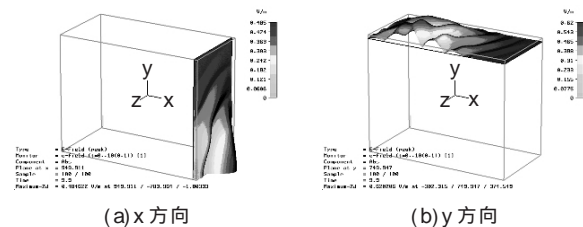


图2 激励信号

2.3 空箱体中的局部放电

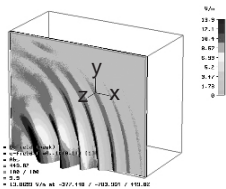
在图 1 所示的箱体内部远离激励源的箱壁 50 mm 处设置观察面, 以模拟天线的安装位置, 经过 10 ns 后可得到图 3 的结果。激励信号从 2 ns 持续到 6 ns , 在 $4, 5 \text{ ns}$ 时是冲击最大的时候, 将激起频率最高的电磁波。 6 ns 以后激励消失, 电磁波将在箱体内部自由传播。从图中可以看出, 在 10 ns 时, UHF 信号已经充满了整个箱体。在长度最短的 z 方向上, 强度最强; 而最长的 x 方向上, 强度最弱。据此设想: 如果在变压器箱体中的几个角落里同时安装超高频天线, 根据 3 个天线接收到的信号强弱关系可初步判断出局部放电的大体位置, 为进一步确定故障点指明方向。

而由于反、折射叠加的影响, x, y, z 方向出现最大幅值的时候分别为 $70 \sim 80, 50 \sim 60, 40 \sim 50 \text{ ns}$, 见图 4。



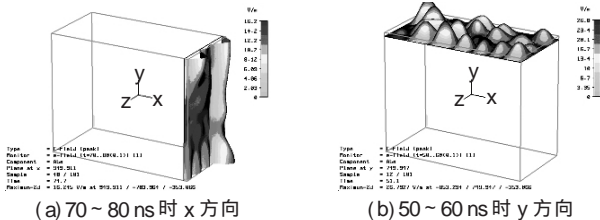
(a) x 方向

(b) y 方向



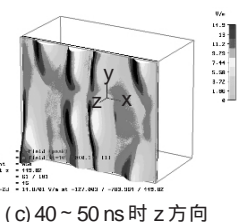
(c) z 方向

图 3 空箱体 10 ns 时的电磁波强度



(a) 70 ~ 80 ns 时 x 方向

(b) 50 ~ 60 ns 时 y 方向



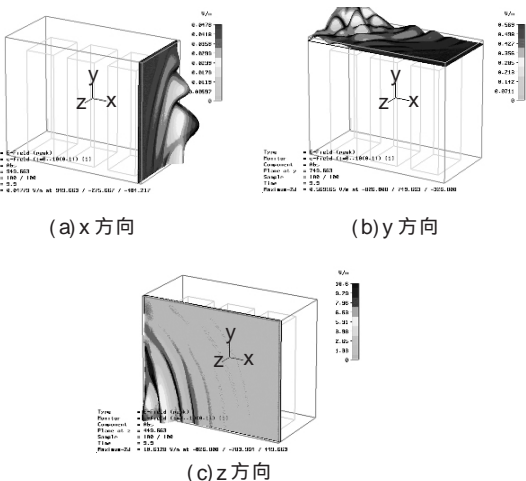
(c) 40 ~ 50 ns 时 z 方向

图 4 空箱体中的电磁波最大幅值

由仿真结果可知，每一个面的边角处都是电磁波强度最大的地方，因为这些地方是折反射和叠加最强烈的地方。这些位置最适合安装超高频天线。

2.4 带有铁心的变压器箱体中的局部放电

在图 1 所示模型的基础上，在箱体中加上铁心，仍在箱体内远离激励源的箱壁 50 mm 处设置观察面，以模拟天线的安装位置，在经过 10 ns 后可得到图 5 的结果。



(a) x 方向

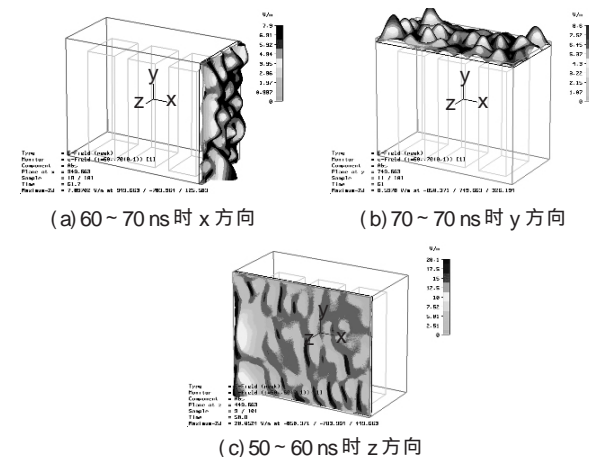
(b) y 方向

(c) z 方向

图 5 带铁心时 10 ns 时的电磁波强度

从图 5 可以看出，由于铁心的存在，UHF 信号的传播受到阻碍，在 10 ns 时，UHF 信号并没有充满整个箱体。而且，受到铁心的反射作用，电磁波的波形也发生了变化。但是各个方向上的强弱关系依然和空箱体时一样。在长度最短的 z 方向上，强度最强；而最长的 x 方向上，强度最弱。由于铁心和箱壁共同的反、折射叠加的影响，x、y、z 方向出现最大幅值时

候分别为 60 ~ 70、60 ~ 70、50 ~ 60 ns，见图 6。



(a) 60 ~ 70 ns 时 x 方向

(b) 70 ~ 70 ns 时 y 方向

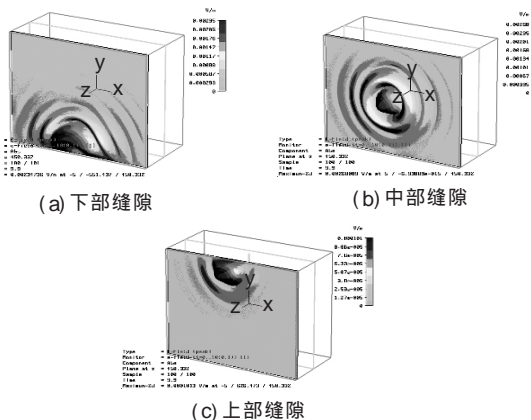
(c) 50 ~ 60 ns 时 z 方向

图 6 带铁心的箱体中电磁波的最大幅值

由仿真结果可知，铁心的存在使得电磁波强度总体上比空箱体时减弱，但每一个面的边角处仍是电磁波强度最大地方。这些位置依然是最适合安装超高频天线。

2.5 缝隙位置对电磁波传播的影响

在图 1 所示模型基础上，在箱体中间加上一块金属挡板，在挡板的下部位置：挡板下部和放电位置等高、挡板中间、挡板上部开一条长 15 mm、宽 1 mm 的缝隙，在箱体内相对放电源挡板的另一面的箱壁 50 mm 处设置观察面，以模拟天线的安装位置，在经过 10 ns 后可得到图 7 的结果。



(a) 下部缝隙

(b) 中部缝隙

(c) 上部缝隙

图 7 10 ns 时挡板缝隙透过的电磁波

从图 7 可以看出，UHF 信号可以通过缝隙透出，并且符合衍射理论。但是电磁波在 10 ns 时，并不能充满挡板另一面的整个箱体。缝隙离放电点越远，透过的电磁波的幅值也越弱。3 种情况下，z 方向出现最大幅值的时候分别为 50 ~ 60、70 ~ 80、70 ~ 80 ns，见图 8。

由仿真结果可知，透过缝隙的电磁波的幅值衰减严重，只有原来的千分之一数量级。各个边角处仍是电磁波幅值最强的地方，适于安装超高频天线。缝隙对电磁波的传播衰减作用巨大。

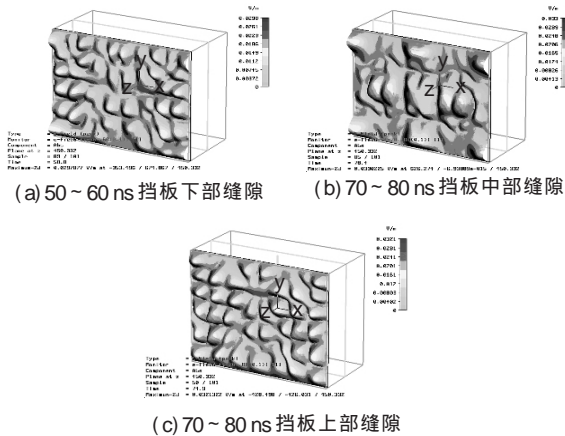


图8 挡板缝隙透过的电磁波最大幅值

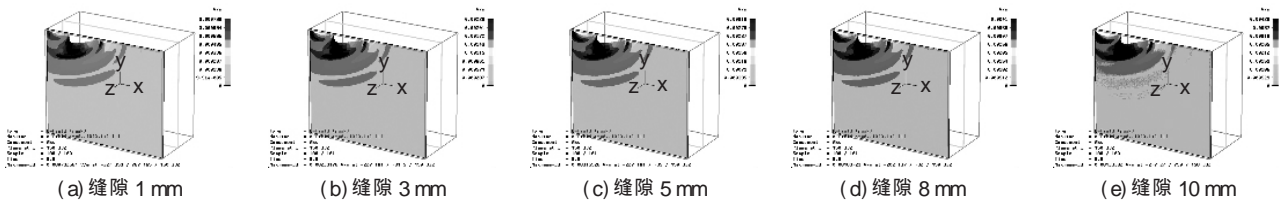


图9 10 ns时不同大小缝隙透过的电磁波

的电磁波强度又基本上是一样的。此结果表明了缝隙的大小对电磁波的传播存在着一个临界值：当宽度大于一定值的时候，将不对透出的电磁波大小产生明显的影响。

3 结论

(1) 箱体内部角处是折反射和叠加最强烈的地方，也是电磁波强度最大地方，这些位置是最适合于安装超高频天线的；

(2) 铁心对电磁波的辐射有衰减作用；

(3) 透过缝隙的电磁波幅值衰减严重，在一定范围内，缝隙越宽，透过的电磁波越强，超过范围后，不对透出的电磁波大小产生明显的影响；

(4) 由于仿真模型对实际的变压器作了较大程度的简化，将实际变压器中测得的信号与仿真结果对比，以上3点结论仍然成立。

2.6 缝隙大小对电磁波传播的影响

仍以图1模型为基础，在箱体中间加上一块金属挡板，在挡板顶部和箱体之间留一条缝隙，调整缝隙大小分别为：1、3、5、8、10 mm。在箱体内部相对电源挡板的另一面的箱壁50 mm处设置观察面，以模拟天线的安装位置，在经过10 ns后可得到图9的结果。

从图9可以看出，不同缝宽的缝隙透过的UHF信号大小是不同的，总体上来讲，缝隙越宽，透过的电磁波越强。缝宽1 mm时透过的电磁波只有万分位上的强度，缝宽3 mm和5 mm时透过的电磁波则已经达到千分位的强度了，但3 mm时仅有缝宽8 mm或10 mm时的1/2。而缝宽8 mm和10 mm时，透过

参考文献：

- [1] 王国利, 袁鹏, 单平, 等. 变压器典型局放模型超高频放电信号分析[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 28-31.
- [2] 王国利, 单平, 袁鹏, 等. 变压器局部放电超高频电磁波的传播特性[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 26-28.
- [3] 王国利, 郝艳捧, 刘味果, 等. 电力变压器超高频局部放电测量系统[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 23-25.
- [4] 陈庆国, 龚细秀, 李福祺, 等. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 23-25.
- [5] YANG L, JUDD M D. Recognising Multiple Partial Discharge Sources in Power Transformers by Wavelet Analysis of UHF Signals [J]. IEE Proc-sci. Meas. Technol. May 2003, 150(3): 119-126.
- [6] CHANG C, CHANG C S, JIN J. Analysis of UHF Signal Using Prediction Model [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. October 2004, 19(4): 1579-1586.
- [7] 金亚秋. 复杂系统中的电磁波 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995.
- [8] CST Microwave Studio Tutorial[CD]. CST, 2003.

(上接第243页)

参考文献：

- [1] 王尔智, 杨理践. 最佳电路设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] TIAN M W, SHI C J R. Worst Case Tolerance Analysis of Linear Analog Circuits Using Sensitivity Bands [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems I, 2000(5): 1138-1145.
- [3] WANG Shu-juan, ZHAI Guo-fu, CHEN Bo, et al. The Research of Tolerance Analysis and Its Application of Reliability in Electronic Circuit [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2002, 25(3): 296-300.
- [4] 苑舜. 高压断路器弹簧操动机构 [M]. 北京: 机械工业出版

- [5] 楼家法. 从速度特性寻求断路器设计的准则 [J]. 高压电器, 1989, 25(2): 10-13.
- [6] 宋士通. 浅谈真空断路器机械参数的选择 [J]. 电器开关, 2003, 41(4): 39-40.
- [7] CHEN Gang, WANG Er-zhi, SUN Bo. Optimization Design for Actuator of Vacuum Circuit Breaker[J]. XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2004(2): 640-643.
- [8] 郭仁生, 苏君, 卢洪胜. 优化设计应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.