

电力变压器中局部放电声波传播的有限元仿真和理论分析

李 喆¹, 肖登明², 刘奕路²

(1. 陕西汉中供电局, 陕西 汉中 723000; 2. 上海交通大学, 上海 200030)

Finite Element Simulation of the Partial Discharge Acoustic Wave Propagation inside Power Transformers

LI Zhe¹, XIAO Deng-ming², LIU Yi-lu²

(1. Shaanxi Hanzhong Power Supply Bureau, Hanzhong 723000, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 测量变压器内局部放电产生的声波能用于电力变压器的监测、诊断和故障定位。建立了局部放电声波传播的有限元分析(FEA)仿真模型。利用简化的模型,分析了声波传播的特性。局部放电声波传播仿真的结果与PZT传感器的实验室结果比较,显示了较好的一致性。

关键词: 电力变压器; 局部放电; 有限元分析; 声波传播

中图分类号: TM41

文献标识码: A

Abstract: The acoustic waves induced by PD could be measured and used for monitoring, diagnosis and locating of the potential failures in power transformers. In this paper, Finite element analysis (FEA) simulation models for partial discharge acoustic wave propagation are built. The behavior of the acoustic wave propagation using the simplified models is analyzed. The PD acoustic wave propagation simulation results are compared with experiment using PZT sensors. The theoretical derivations and computer simulations show consistency with experiment results in 1-D case.

Key words: power transformer; partial discharge(PD); finite element analysis(FEA); acoustic wave propagation

1 引言

变压器内部发生局部放电时,由于突然的能量释放,使部分液体蒸发而产生小爆炸,从而产生了局部放电声波。对于油浸电力变压器,局部放电产生的声波将在变压器油和其他介质,如铜、纸等中传播^[1]。

局部放电声波冲击源能被数学化表示为一点源,满足Dirac函数。偏微分等式能用来分析描述局部放电声波传播过程。局部放电声波十分接近球形波,在离局部放电源适当距离的范围外也视作平面波。局部放电声音信号的频率范围被认为是从70~350 kHz,该处能量最集中。

变压器箱和浸在油中的固体介质(线圈,绝缘纸等)作为声波介质。尽管只有纵向声波存在于油里,但在其它固体介质的接触面上可以激发其它形式的波。不仅一种形式的声波可以在固体介质里传播,在变压器箱的表面上被传统的声音传感器检测到的这些组合信号将会更加复杂,因为波的耦合包括纵向(5.0 km/s),横向(3.23 km/s)和表面波(Lamb波、Rayleigh波)^[2]。

通常,因为边界条件的复杂性,这些计算模型的分析解决方案不太可能获得。高频有限元声音分析工具仍然处于早期阶段,ABAQUS是一种分析声波的可行的有效工具。

2 局部放电声波在二维媒质中的传播和衰减

当仿真模型的维数增加,模型的复杂性和消耗电脑资源都大幅度增加。模型简化对于有效的局部放电声波FEA仿真来说是必要的。当比较三维模型和二维模型的仿真结果,在相同的材料特征、负载、边缘条件时,结果呈现了较多相似的波传播特性。因此在研究中采用二维的声波模型。

从两个守恒方程(质量守恒和动量守恒)和状态方程来推导液体中的波动方程。详细的推导过程参见文[3]。如果考虑点负荷在无限介质里释放,声波可以被认为是一个远离源点的平面波。

质量守恒(连续性),动量守恒,状态方程,线性化方程表示如下:

$$\text{连续性方程: } \delta\rho_t + \rho_0 v_x = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \rho_0 v_t + p_x = (\lambda + 2\mu)v_{xx} \quad (2)$$

$$\text{状态方程: } p = c_0^2 \delta\rho \quad (3)$$

式中: ρ 是液体密度; p 是液体压力; v 是液体速度;

变量下标(t 和 x) 分别代表函数的导数; λ, μ 分别是液体膨胀和粘性系数。

在研究过程中,假定液体遵循 stoke 定律,则动量方程变成:

$$\rho_0 v_t + p_x = \frac{4\mu}{3} v_{xx}$$

联合式(1),式(2),式(3)3 个方程,推导得一维粘质波动方程的最后形式为:

$$\frac{4\nu}{3c_0^2} p_{xxt} + p_{xt} - \frac{1}{c_0^2} p_{tt} = 0$$

其中: $\nu = \mu/\rho_0$, 是流体粘滞率因子; p_{xt} 为 p 对 x 的二阶导数对 t 的导数。这个方程的解为:

$$p = p_0 e^{-\alpha x} e^{j\omega(t - \frac{x}{\omega\beta})}$$

衰减因子 α 决定了 $e^{j\omega(t - \frac{x}{\omega\beta})}$ 的峰值的衰减速度, β 则决定了声波传播速度 $c_{ph} = \omega/\beta$ 。

3 局部放电声波传播的仿真

图 1 表示一个试验容器。局部放电源在源点的位置产生球面波,与容器的体积相比,源点可以忽略不计。局部放电源的直径远小于测量点到局放源的距离时,测量点的声波传播在仿真中可以简化,可以用一维平面波模型对声波传播进行仿真。光纤传感器与 PZT 传感器之间的距离在分析中被忽略。

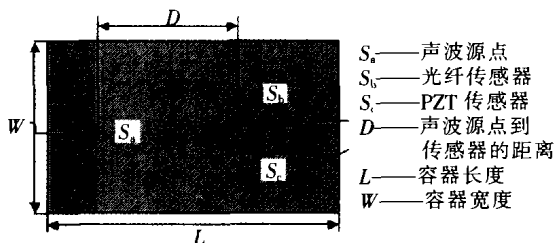


图 1 试验装置的俯视图

为了更好地与试验结果相比较,测量波源和沿着声波传播途径上与波源距离不同点 ($D = 0.0, 20.0, 200.0$ mm) 的声波强度随时间变化的关系见图 2~4。由于在试验过程中,源点的脉冲信号由 PZT 传感器来激发,因此在计算机模型中采用同样的脉冲源,以便更好地进行比较。

在试验中,采用了光纤传感器(S_b)和 PZT 传感器(S_c)对声波强度进行测量。试验结果和计算机仿真结果的对比,声波传播显示出了相似的特性。从试验结果中得到的声波振幅衰减率(A_1, A_2, A_3),与从计算机仿真中得到的相应的振幅衰减率(B_1, B_2, B_3)基本上是比较吻合的。 F_1, F_2, F_3 是试验测得的声波主要频率的傅立叶变换。 S_a 处的声波主要能量集中在 300~400 kHz,在声波的传播过程中,声波的频率组成成分将会发生改变,更多的频率成分将会在传播过程中出现,这些归因于波的散射和叠加现象,但是声波的主要能量仍然集中在 300~400 kHz。

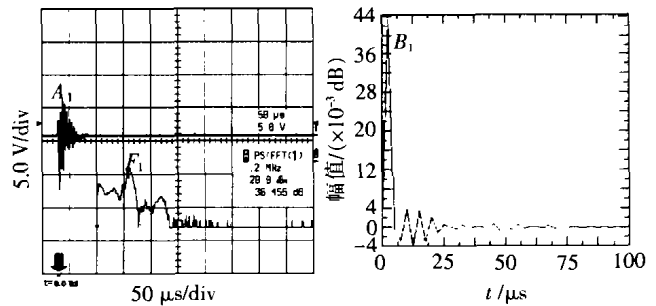


图 2 波源处($D=0.0$ mm)试验结果与仿真结果的比较

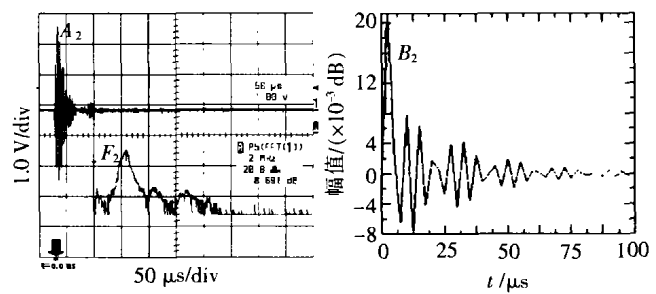


图 3 $D=20.0$ mm 处试验结果与仿真结果的比较

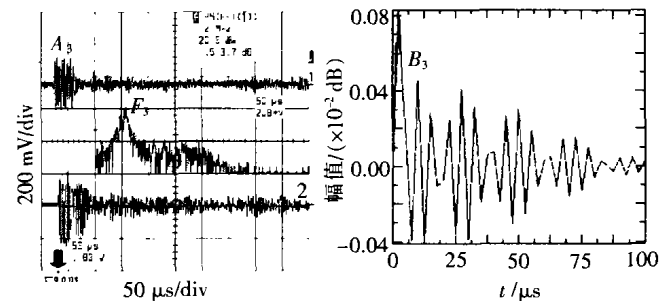


图 4 $D=200.0$ mm 处试验结果与仿真结果的比较

4 结语

用 FEA 仿真模型和试验(光传感器和 PZT 传感器)研究了变压器内部局部放电声波传播的特性。试验结果、理论推导和计算机仿真显示了较好的一致性。研究的结果有助于理解变压器内部局部放电波的特性,如:衰减率、传播方式等。可以通过测量声波信号来确定局部放电的强度。

参考文献:

- [1] L E Lundgaard. Partial Discharge-Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection-fundamental Considerations [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-31.
- [2] L E Lundgaard. Partial Discharge-Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-practical Application [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(5): 34-43.
- [3] D T Blackstock. Fundamentals of Physical Acoustics [M]. New York: Wiley, 2000.

作者简介:李 喆(1963-),男,高级工程师,从事高压断路器及变压器设备的管理和检修。