

变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究

王 颂, 李香龙, 李军浩, 赵晓辉, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Experimental Study for Outside Propagation Characteristic of the UHF Signal Emitted by Partial Discharge in Transformers

WANG Song, LI Xiang-long, LI Jun-hao, ZHAO Xiao-hui, LI Yan-ming

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

摘要: 介绍了目前内置超高频传感器在电力变压器局部放电监测中的应用情况, 分析了利用外部传感器检测局部放电产生的超高频信号的可行性, 设计了一套基于超高频法的电力变压器局放测量系统。实验结果表明, 超高频电磁波可以透过变压器夹缝衍射出来, 为变压器局部放电检测提供了一种新途径。

关键词: 局部放电; 超高频信号; 外传播特性

中图分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: The application status of the internal UHF sensor for monitoring partial discharge in power transformers is introduced, and then the feasibility of using external UHF sensor for detecting partial discharge activities is analyzed. A measurement system based on UHF method for studying PD is designed. Experimental results show that the UHF signals can diffraction through the transformer's joint. Through detecting the diffraction UHF signals outside the transformer, it can be a new approach to detecting PD of transformers.

Key words: partial discharge; ultra-high frequency signal; outside propagation characteristic

0 引言

国内外研究均表明, 油中放电上升沿很陡, 脉冲宽度多为纳秒级, 能激励起 1 GHz 以上的超高频电磁波^[1-2]。就电力变压器而言, 局部放电发生在变压器内的油-隔板绝缘系统中, 由于绝缘结构的复杂性, 电磁波在其中传播时会发生多次折反射及衰减, 同时, 变压器内箱壁也会对高频电磁波的传播造成不利影响。因此, 目前变压器局部放电超高频检测法都采用内置传感器^[2]。这样不仅可以提高检测灵敏度, 还能减少变压器的外部干扰。但也存在不足: 一

是可能需要对变压器结构设计进行改善; 二是造成传感器安装的不便。

当发生局部放电时, 变压器的外壳铁箱把大部分的放电辐射屏蔽掉了, 但仍有少量电磁波由接缝及出线端口散出, 而且出口导线与地线上的脉冲波也会产生一定辐射。超高频信号在变压器本体内传播的同时, 会在变压器的接缝处发生衍射, 从而泄漏出来, 这就使得在外部进行变压器局部放电的检测成为可能。笔者设计了一套基于超高频法的电力变压器局部放电检测系统, 对变压器局部放电超高频信号的内外传播特性进行了试验研究。

1 试验平台

实验系统接线原理图见图 1。试验电源由自耦调压器 T₁ 输出后经隔离变压器 T₂ 接到无局放高压试验变压器 T₃ (额定电压 U_N=100 kV, 额定功率 S_N=10 kV·A, 100 kV 下放电小于 3 pC) 上。隔离变压器 T₂ 可有效地抑制电网中窜入的高次谐波, 改善供电电源的品质。为避免高压引线放电, 引接线采用了光滑铜杆, 所有接头均经过特殊处理。采用自制的亚纳秒脉冲发生器所产生的亚纳秒脉冲模拟局部放电超高频信号发生源。超高频传感器采用平面等角螺旋天线, 其有效检测频带为 400 MHz~1.5 GHz。采用 TDS680B 示波器作为超高频信号分析仪器, 其采样率最高 5 GHz, 带宽 1 GHz, 储存深度 16 kB。图

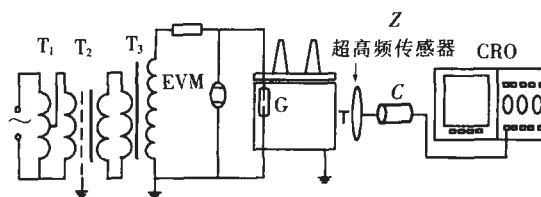


图 1 实验接线原理图

收稿日期: 2006-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50377034)。

作者简介: 王 颂(1983-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 从事局部放电超高频检测技术的研究。

中: T_1 为自耦调压器; T_2 为隔离变压器; T_3 为无局放高压试验变压器; Z 为低通高阻阻抗; EVM 为静电电压表; G 为超高频信号发生源; C 为 50 测量电缆; T 为试验用变压器箱体; CRO 为 TDS680B 示波器。

1.1 亚纳秒脉冲源特性

亚纳秒脉冲发生器以充满 10 个大气压氢气的脉冲放电管为开关元件, 产生的脉冲波形见图 2(a)^[3]。该脉冲上升沿小于 500 ps, 脉宽小于 1 ns, 幅值可达到 4 kV 以上(分压变比 65: 1)。傅里叶变换分析表明, 该脉冲信号激发出高达 3 GHz 的电磁波信号, 见图 2(b), 可用于对 GIS 和变压器局部放电超高频检测方法中电磁波的传播特性研究。

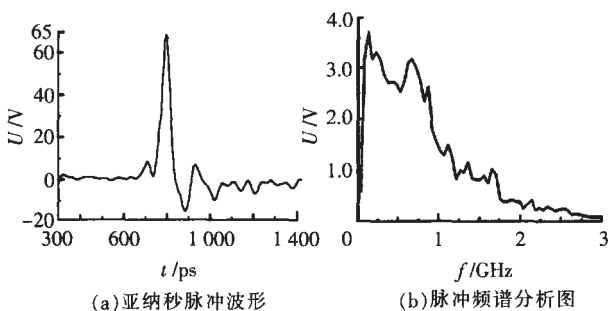


图2 亚纳秒脉冲波形

1.2 超高频传感器

试验采用的超高频传感器(平面等角螺旋天线)实际上是一种非频变天线, 它由两条金属臂组成, 具有对称性, 每一臂都有两条边缘线, 均为等角螺旋线, 见图 3。

平面等角螺旋天线的工作原理为: 当在天线两臂的始端馈电时, 臂上的电流在流过约为一个波长的距离后, 就迅速衰减到 20 dB 以下, 可以认为臂上电流有一个“截止点”。这一段臂上的电流对天线的



图3 实验用超高频传感器

辐射起主要影响^[4]。因此, 从馈电点到截止点的臂长相当于天线的有效臂长。这样当工作频率改变时, 天线的实际臂长没有变, 但由于电流的截止点随电流的变化而发生位移, 它就相当于天线的有效臂长随着频率的变化而相应地改变着, 从而保持了臂上的电流分布形状基本不变, 因而天线具有很宽的带宽。笔者所设计的平面等角螺旋天线其有效检测频带为 400 MHz~1.5 GHz, 可以用于局部放电超高频信号的检测。

2 实验结果与分析

用上述试验系统分别对超高频传感器放置在变压器箱体内部和在外外部接缝处进行了测量。实验过程中, 将亚纳秒脉冲源放置在实验用变压器箱体内一侧, 测量当超高频传感器放置在箱体内部时接收到的超高频信号。然后将变压器的铁盖与变压器的箱体中间用木质支撑物支撑, 留出 1 cm 的夹缝, 将超高频传感器正对夹缝约 1 m 处进行测量, 结果见图 4。

通常电力变压器绝缘结构中的局部放电可看成是由一个点源发出的, 当绝缘介质某处发生局部放电时, 所产生的电磁扰动随时间变化而产生电磁波,

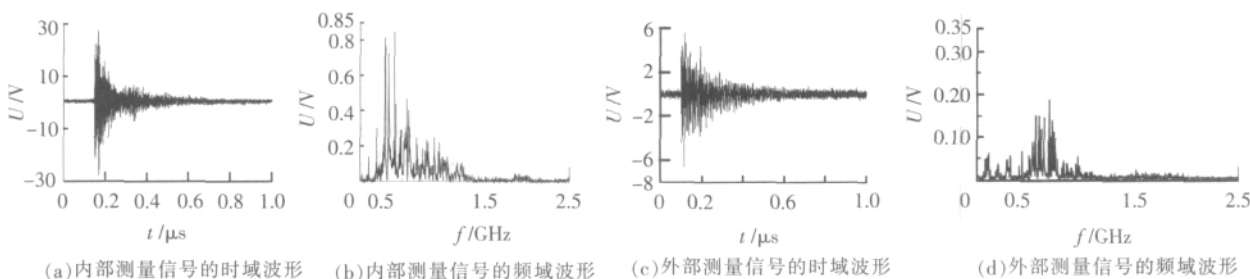


图4 变压器箱体内外测得的波形

它们遵循麦克斯韦的电磁场基本方程^[5-6]。在传播过程中, 每处的电场强度和磁感应强度的方向总是相互垂直的, 并且都与该处电磁波的传播方向垂直。所以说电磁波是一种横波, 其能量沿电磁波的传播方向流动。电磁波在传播过程中离开直线传播路径而绕到障碍物背后的现象叫衍射, 电磁波在任何情况下都会发生衍射现象, 但在障碍物或孔与波的波长差不多或者比波的波长小时, 才会发生明显的衍射现象^[7]。我们知道, 任何电磁波在真空中的传播速

度都等于真空中的光速即 $c=3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且有 $\lambda = c/f$ 。局部放电时产生的电磁波是由在频域范围内分布很广的各种波长不等的波所构成的。当波穿过变压器的夹缝向外传播时, 由于夹缝的存在, 电磁波会发生衍射现象, 波长与夹缝宽度差不多或比夹缝宽度大的波会发生明显的衍射现象。实验过程中变压器的夹缝宽度为 1 cm, 相对应的可以发生明显衍射的波的频率界限是 $f < 30 \text{ GHz}$ 。可以得出, 局部放电时所发射出的电磁波在通过箱 (下转第 105 页)

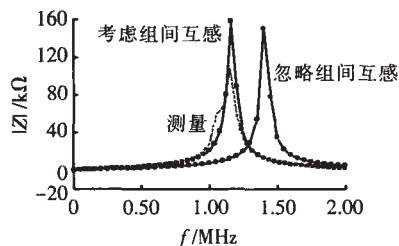


图7 线圈输入阻抗的模值

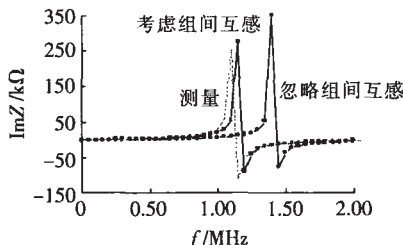


图8 线圈输入阻抗的虚部

电路2时,共振点的仿真与测试结果非常接近,但是由于忽略了分组内部的电容以及一系列隔匝互感,因此,仿真结果仍然略大于测试结果。由仿真和测试结果的对比可以验证该仿真方法的合理性。

应该指出的是,文[6]中利用 Ansoft HFSS 对模型进行了全波电磁场分析(扫频范围为 100 kHz ~ 2 MHz),消耗的 CPU 时间约为 14 h,而同等配置计算条件下,采用局部建模以及准静态求解方式,CPU 时间为 30 min(包括电磁场计算以及电路仿真的时间)。

3 结语

为了在设计阶段掌握罗氏线圈的频率特性,由电磁场数值计算的方式确定线圈的分布电容和分布电感。从提高建模效率出发,讨论线圈分组与分布参数的关系,得出以下结论:随着分组匝数的增加,分组自容、隔组电容与组间电容相比可以忽略;随着分

(上接第 101 页)体夹缝传播时,都可以发生明显的衍射现象。衍射现象的存在使得利用超高频传感器在外部接收通过夹缝衍射出来的电磁波成为可能。从图 4 可以看出,在外部测量到的超高频信号明显比在内部测量到的幅值要低很多,但其频率分布基本一致。

3 结论

(1)设计的超高频局放测量系统可用于研究变压器局部放电产生的超高频信号的传播特性。

(2)实验证实,在变压器铁箱外能检测到有效的超高频信号,信号强度较内部测得的要弱得多,但覆盖的频率范围基本一致。

(3)局部放电激发的高频电磁波可以通过变压器夹缝衍射出来,这为检测变压器内局部放电提供了一种新途径。

组匝数的增加,隔组互感与组间互感相比可以忽略。由以上讨论过程建立简化的罗氏线圈的高频等效电路,并通过试验测试验证了整个分析过程的合理性。同时,利用该方法可以方便地建立罗氏线圈传感器的二端口高频等效电路,对整个测量系统的设计和频率特性的研究具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 翟小社,王颖,林莘.基于 Rogowski 线圈电流传感的研制[J].高压电器,2002,38(3):25-28.
- [2] Jun Kato, Tomioka T, Kuwabara N. Improved Frequency Characteristics of Large Rogowski Coil Using Lightning Surges Observation [C]// Electromagnetic Compatibility, International Symposium on 7-21, 1999: 310-313.
- [3] Kojovic L. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection Computer Applications in Power[J]. IEEE Computer Application in Power, 2002, 15(3): 50-53.
- [4] 樊宽军. 微秒级电脉冲的测量 [J]. 核技术, 1999, 22(8): 469-473.
- [5] Van den Bossche A, Ghijselen J. EMC Combined di/dt Current Probe [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2000: 569-573.
- [6] ZHAI Xiao-she, GENG Ying-san, SONG Zheng-xiang, et al. A New Method to Calculate the Frequency Characteristics of the Rogowski Coil Based on the High Frequency Simulation [J]. IEICE Technical Report, 2004, 104(356): 19-23.
- [7] 张玉红. Rogowski 线圈频带特性分析 [J]. 科技资讯, 2006 (16): 7-8
- [8] 李维波,毛承雄.分布电容对 Rogowski 线圈动态特性影响研究[J].电工技术学报,2004,19(6):10-17.
- [9] Eric Bogatin. 信号完整性分析 [M]. 李玉山,李丽平译.北京:电子工业出版社,2005.
- [10] 邹积岩,段雄英.罗柯夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J].电工技术学报,2001,16(1):81-84.

参考文献:

- [1] Rutgers W R, FU Y H. UHF PD-detection in a Power Transformer[C]// Proc. 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering. Montreal, Canada, 1997: 219-222.
- [2] 王国利,郝艳捧,李彦明.电力变压器局部放电检测技术的现状和发展[J].电工电能新技术,2001(2):52-57.
- [3] 李军浩,王晶,李彦明.一种亚纳秒脉冲源的研制 [J]. 电工电能新技术,2006,25(1):77-80.
- [4] 李忠,陈杰华.外部传感器 GIS局部放电超高频检测的研究[J].高电压技术,2003,29(6):35-37.
- [5] 金亚秋.复杂系统中的电磁波 [M].上海:复旦大学出版社,1995.
- [6] 王国利,单平,李彦明,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.
- [7] 王绍民,赵道木,林强.对光波及电磁波衍射现象的认识和判断[J].浙江大学学报(理学版),2000,27(1):109-113.