

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.02.016

# 新型局放特高频传感器的开发和特性分析

马 超<sup>1</sup>, 林 琳<sup>1</sup>, 黄建芳<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司 技能培训中心, 河北 保定 071000; 2. 浙江机械工业联合会, 浙江 杭州 310009)

**摘要:** 为了提高电力变压器局部放电信号的特高频在线监测效果, 设计制作了特高频采集天线、放大电路、检波电路和采集系统软件。采用了 HFSS 软件设计优化特高频传感器的天线, 实现了变压器局部放电特高频频段的有效采集; 采用了 AltiumDesigner 软件设计特高频传感器的分离放大和检波电路, 提高对信号检测的灵敏度和抗干扰能力等, 并制作了电路模块。将天线于信号处理模块结合, 形成了完整的特高频在线监测传感器; 采用了 labview 软件编译检测所需的采集程序, 具备信号采集、阈值设定和报警、历史数据查看和导出等功能; 研究了特高频信号采集装置与基于 labview 编译检测所需的采集程序结合的方法, 形成了完整的特高频局放监测系统。研究结果表明: 监测系统能够完成天线采集、信号放大、检波和输入采集系统等功能。

**关键词:** 局部放电; 特高频; 传感器; 在线监测系统

中图分类号: TM93

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)02-0191-05

## Development of monitoring system based UHF PD sensor

MA Chao<sup>1</sup>, LIN Lin<sup>1</sup>, HUANG Jian-fang<sup>2</sup>

(1. Skills Training Center, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Baoding 071000, China;  
2. Zhejiang Machinery Industry Federation, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** In order to improve the local high-frequency on-line monitoring effect of the partial discharge signal of the power transformer, the special high frequency acquisition antenna, the amplification circuit, the detection circuit and the acquisition system software were designed and manufactured. The HFSS software was used to optimize the antenna of the UHF sensor, which can realize the effective collection of the UHF band of the partial discharge of the transformer. In order to improve the sensitivity and anti-jamming capability of signal detection, AltiumDesigner software was used to design the separation and amplification circuit of UHF sensor and make circuit module. In order to form a complete UHF on-line monitoring sensor, the antenna was combined with the signal processing module. Acquisition program was compiled by the labview software, which can achieve signal acquisition, threshold settings and alarm, historical data viewing and export functions. The method of combining the UHF signal acquisition device and the acquisition program were studied, which based on labview compilation detection to form a complete UHF PD system. The results indicate that the monitoring system can complete the function of antenna acquisition, signal amplification, detection and input acquisition system.

**Key words:** partial discharge; UHF; sensors; on-line monitoring system

## 0 引 言

由于变压器在整个电力系统的运输、分配中所起到的作用, 保障其稳定运行至关重要<sup>[1]</sup>。

变压器内部绝缘老化状况影响变压器运行状态, 是监测电力变压器绝缘状态的重要特征量。实际运行

监测中, 可以通过局部放电作为判别绝缘老化的依据。变压器局部放电的在线检测方法主要包括脉冲电流、化学法、超声波法等, 其中超声波和超高频, 是应用最广泛的两种在线监测方法。

特高频检测法通过采集特高频电磁波实现监测。局部放电发生时, 会向周围辐射的特高频电磁波。特

高频电磁信号频率范围为 300 MHz ~ 3 GHz,处于很高的频率范围,因此电力设备实际运行中的电气干扰不会对特高频电磁信号监测造成影响,降低了干扰,提高了信号的灵敏度,也就大大提高了信噪比,监测准确性和可靠性也得到了提高。近些年来国内外大量研究特高频监测方法,也是因为相比于传统的检测方法,该方法具备无可比拟的优点<sup>[2]</sup>。

本研究利用采集超高频信号的主要方法,开发出一套基于超高频传感器的局部放电在线监测系统。

## 1 传感器的结构

设计过程中,将特高频传感器的结构分为两部分:特高频信号采集装置和信号处理模块。

本研究通过比较多种用于采集特高频信号的天线形状<sup>[3]</sup>,通过仿真手段检验各种形状的特性和效果<sup>[4]</sup>,并基于 ANSYS HFSS 设计和优化相应的特高频传感器的天线<sup>[5]</sup>,设计特高频传感器的分离放大和检波电路,应用 AltiumDesigner 软件,对信号处理模块中的放大和检波电路两部分,进行仿真设计和优化,并制作 PCB 板,最终得到配套的信号分离放大和检波装置实物,将特高频天线与检波电路合理的组合,完成结构封装,形成一套完整的特高频传感器设备。

## 2 采集天线选型

笔者针对应用较多的是阿基米德螺线圈、三阶 Hilbert 分形天线、四阶 Hilbert 分形天线 3 种超高频天线,制定工程实际条件约束,并通过应用 HFSS 仿真软件,寻找一种对于天线的分析和设计方法,以保证超高频传感器天线形状尺寸的选取和设计更加合理和有效。

根据研究结果,3 种天线特性如表 1 所示。

表 1 3 种天线特性

参数	类型		
	三阶 Hilbert 分形天线	四阶 Hilbert 分形天线	阿基米德螺旋天线
尺寸/Mm	30 × 30	68 × 69	318
增益/dB	-28.802	-21.520	6.5327
通频带/GHz	0.3 ~ 0.55 1.07 ~ 1.88 2.40 ~ 3	0.42 ~ 0.77 1.05 ~ 1.40 1.59 ~ 1.91 2.16 ~ 1.56	0.3 ~ 3 整个 UHF 频段
方向性	良好	良好	良好

从通频带和方向性两方面采集特性上比较 3 种天线的特点。3 种天线的方向性差异不大,均呈现出良好的特性;相比于三阶 Hilbert 分形天线和四阶 Hilbert 分形天线,阿基米德螺旋天线的增益较高,通频带更宽,而四阶 Hilbert 分形天线的增益和通频带均要优于相同设计下的三阶 Hilbert 分形天线。

阿基米德螺旋天线由于尺寸较大,内置于变压器箱体内部的难度较大,不适合置于变压器箱体内部进行信号采集,而三阶 Hilbert 分形天线和四阶 Hilbert 分形天线尺寸较小,可以通过变压器送油阀将天线置于变压器箱体内,而不必改变变压器箱体结构,因此,适用于作为针对变压器箱体内局部放电超高频信号进行采集的天线装置。

综上所述,阿基米德螺旋天线尺寸较大,不符合笔者针对变压器内置天线的设计尺寸要求。Hilbert 分形天线尺寸较小,能够方便的安装在电力主设备箱体内部,实现更加方便和精确地测量,且相比于三阶 Hilbert 分形天线,四阶 Hilbert 分形天线方向性良好,天线增益系数比三阶 Hilbert 分形天线高,采集信号更精确,因此可以选取四阶 Hilbert 分形天线进行优化设计。

## 3 特高频采集天线

通过分析天线不同导线段对于天线参数和采集效果的影响,在模型中将每种导线段设定为不同的变量,再加入介质层的介电常数、导线宽度和介质厚度 3 个变量,将以上变量同时优化,得到采集效果更良好的变压器局部放电超高频传感器的采集天线。

天线实物图如图 1 所示。



图 1 天线实物图

针对设计制作的天线的特性参数测量,主要是应用网络分析仪,对天线的方向性、驻波比和频谱特性进行实验测量,通过综合分析,检验制作的天线是否满足设计要求。

四阶 Hilbert 分形天线的方向图和增益仿真结果如图 2 所示。

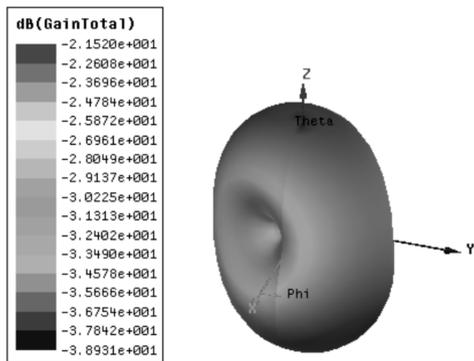


图 2 四阶 Hilbert 分形天线的方向图和增益仿真结果

图 2 中的方向图可以明显看出,天线具有良好的方向性。增益系数也有了显著提高。

用网络分析仪测得的四阶 Hilbert 分形天线的驻波比如图 3 所示。

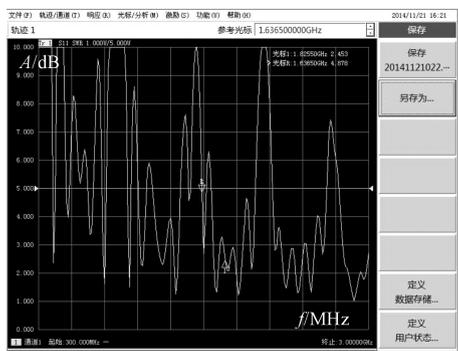


图 3 网络分析仪测得的天线驻波比

由测试参数可知,设计制作的天线的驻波比特性能够达到优化采集信号的目的。同时制作的天线实物与仿真参数结果一致。

通过对驻波比的测量结果,可以得出天线的通频带范围如表 2 所示。

表 2 四阶 Hilbert 分形天线通频带实测分析

通频带范围/GHz	带宽/MHz
0.40 ~ 0.92	520
1.07 ~ 1.54	470
1.70 ~ 2.16	460
2.30 ~ 2.78	480
UHF 频段内	1 920

通频带能够涵盖特高频信号测量频段<sup>[6]</sup>。

## 4 传感器信号处理模块的制作

信号处理模块的结构,是根据采集卡的参数对信号的要求确定的。特高频监测系统的采集卡相关参数

如表 3 所示。

表 3 数据采集卡的参数

参数	数值
采集频率/MHz	20
通道数/5	
电压幅值/V	±5
阻抗/ $\Omega$	50

因此,要求进入采集卡的信号幅值为  $\pm 5$  V,频率范围为 20 MHz 以内,阻抗为 50  $\Omega$ 。其中,由于天线采集到的 4.2 kV 放电电压下局部放电特高频信号幅值为 40 mV 左右,可以确定放大器放大倍数为 50 倍为宜。

基于 AltiumDesigner,根据 RFMD3827 设计的大器。由于选择的运算放大器的增益为 20 dB,放大电路设计了两级放大结构,能够将增益提升到 30 dB ~ 40 dB,对应放大倍数约为 50 倍左右,以满足设计要求。

应用 AV36580 网络分析仪测量的运算放大器的增益结果如图 4 所示。

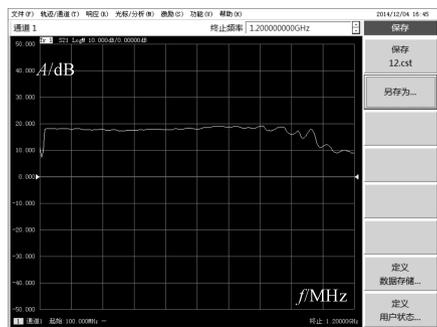


图 4 放大器的增益测量

由测量结果可知,制作的放大器相关参数满足设计要求。根据图 4 可知,放大器在 100 MHz ~ 1 GHz 范围内的功率增益处于 17 dBm 左右,对应电压信号增益为 34 dB 左右<sup>[7]</sup>,即放大倍数约为 50 倍,能够实现预期的放大功能。

变压器局放特高频监测系统应用采集卡进行采集,采集频率为 20 MHz,低于特高频信号 300 MHz ~ 3 GHz 频段范围,因此需要通过检波技术,将原始信号包络为检波信号,合理设置检波时间常数,降低采集频率,使输出信号达到采集卡的采集要求<sup>[8]</sup>。

根据检波频率的要求,检波器的检波二极管为 avago 公司的 HSMP282Y,其导通时间为 0.3 ns,满足 1 GHz 以内的检波要求。根据应用 AltiumDesigner09 设计的原理图。应用信号发生器和示波器,测量检波器的的工作特性,测量结果如图 5 所示。

由信号发生器输出的方波测试信号幅值为 700 mV,脉宽为 100  $\mu$ s,占空比为 10%,检波器的时间

常数 为  $5 \mu\text{s}$ 。由测试结果可知,检波器能够实现预期的检波功能,将波形末端延长  $5 \mu\text{s}$  的指数衰减信号,降低特高频信号的频率,使信号达到采集卡的采集要求。

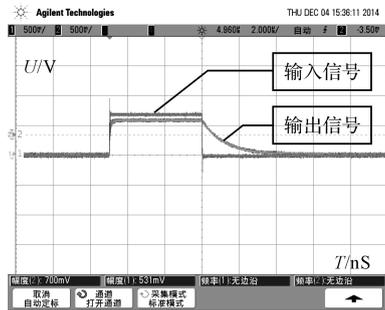


图 5 检波器实验波形图

## 5 检测系统的开发

特高频检测系统由软件和硬件两大部分构成,硬件包括由天线和信号处理模块构成的传感器和由采集卡和工控机构成的数据采集系统,软件由 Labview 平台搭建,包括试局放信号显示、报警、历史数据回调等功能。

信号采集天线位于油浸式变压器内部,通过油浸式变压器的放油阀或者端盖置入变压器内部,并浸于变压器油内。这样设计能够利用变压器箱体的屏蔽作用,避免来自于变压器箱体外的干扰信号,方便数据的现场采集。

信号处理模块和采集卡工控机位于操作人员所在场所。将信号处理模块置于控制室,可以方便地对信号处理模块安全供给直流电源,同时能够方便监测人员操作,避免变压器周围电磁环境干扰<sup>[9]</sup>。

硬件安装结构应用天线和信号处理模块分离的方法,将特高频信号采集天线置于变压器箱体内部,保证信号采集的灵敏度;信号处理模块和采集卡、工控机置于监测人员操作场地。传感器与采集卡通过同轴电缆传递信号,端口为 BNC 接口。

特高频天线通过变压器放油阀进入到变压器箱体内部。由于变压器箱体的集肤效应,发生于变压器内部的局部放电产生的电磁波很难穿过变压器箱体,将传感器采集天线置于变压器箱体内部,不仅能够保证采集灵敏度,同时能够有效屏蔽变压器箱体外的电磁干扰信号<sup>[10]</sup>。放油阀位于变压器箱体的底部,远离高压侧,安装天线时基本上不会破坏变压器内部的电场分布,所以是比较适合的天线安装位置。

笔者设计改进的 Hilbert 分形天线外接圆直径为  $84 \text{ mm}$ ,能够进入  $90 \text{ mm}$  的放油阀内部,并且具有良好的采集特性。

变压器特高频在线监测系统软件是基于图形编程环境 Labview 搭建的,实现了同步采集、放电量的标定和数据管理功能。系统运行时,快速同步采集由特高频传感器输入的 PD 信号波形,采集完之后进行判断是否发生局部放电,若发生局部放电,则对局部放电量的标定,并存储到相关的数据库。

监控系统主界面包含参数设置、波形和信息显示、报警提示 3 个区域,其中参数设置提供给用户调整采样频率、输入通道等参数;波形和信息显示向用户提供监测信息的实时波形和信号最大值;报警提示向用户提供局放报警状态,一旦传感器监测到变压器内部发生局部放电的超声波信号,则会由监测系统报警,提醒监测人员尽快排除故障,变压器局放特高频在线监测系统的功能如下:

- (1) 实时显示局部放电的最大值,局部放电的实时值以及实时波形等信息;
- (2) 超过警戒值进行报警;
- (3) 历史数据的存储和显示。

## 6 测试实验

笔者应用针板放电模型、油箱、示波器和频谱仪搭建实验,测试系统接线如图 6 所示。

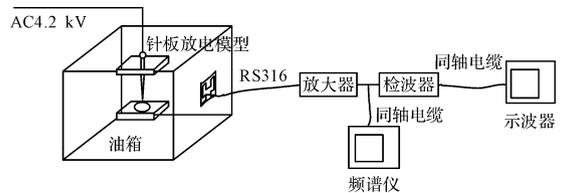


图 6 实验示意图

实验电源经升压器升至  $4.2 \text{ kV}$  加在针板放电模型上,产生的局部放电特高频信号由制作的改进 Hilbert 分形天线采集,并经过信号处理模块,由示波器和频谱仪采集<sup>[11]</sup>。

笔者将制作的针板放电模型,置于装满变压器油箱中,箱体尺寸为  $50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ,箱体壁厚  $4 \text{ mm}$ ,外壳接地,形成屏蔽结构,特高频天线贴放于箱体侧壁上。高压电源通过箱体壁上的小孔给针板放电模型供电。加至合适的电压后,特高频天线采集局部放电产生的电磁波信号,并将信号经过放大器送入频谱分析仪,经过放大器和检波器进入示波器显示。特高频天线置于箱体内部,这样既可以提高检测灵敏度,又减少了外部干扰。

针板放电模型中的针接高压,板接低压,放电间隙的距离为 20 mm。笔者给针板电极加压,在 4.2 kV 电压下出现局部放电。

此时示波器记录的由特高频传感器检测到的放电所激发的电磁信号波形如图 7 所示。

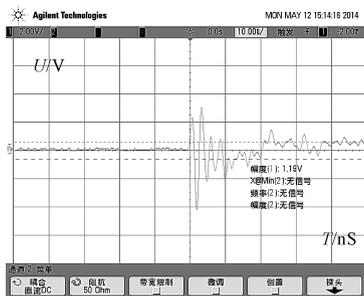


图 7 实验测得的波形图

采集的信号幅值约为 1.2 V,信号波形显示符合特高频信号的特征为振荡衰减信号,持续时间为 100 ns 左右。

此时频谱分析仪记录的由特高频传感器检测到的放电所激发的电磁信号频谱如图 8 所示。

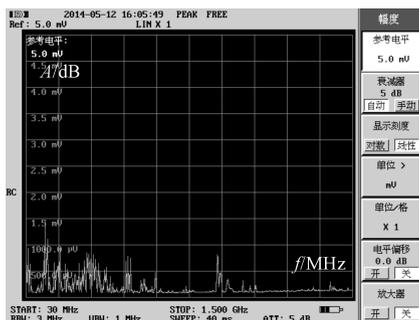


图 8 天线采集信号频谱

由于采集实验应用示波器和频谱仪针对特高频信号采集,不涉及频率的降低以及检波装置的应用,采集结果为应用天线和放大器的传感器实验数据。频谱显示特高频传感器采集到的局放频段主要集中于 300 MHz ~ 1 GHz 范围内,同时由于天线通频带的特点,采集的信号分为 30 MHz ~ 800 MHz 和 900 MHz ~ 1 120 MHz 两部分。

由于实验室局部放电能量主要集中于 100 MHz ~ 1.5 GHz,频谱测量范围主要选取了 30 MHz ~ 1.5 GHz。频率为 30 MHz ~ 1.5 GHz 范围时改进的 Hilbert 分形天线采集的频谱如图 8 所示。显示局放信号的特征为

频谱能量集中于 30 MHz ~ 1 GHz 范围内。同时通过频谱图可以验证,天线在 300 MHz ~ 1.5 GHz 内存在两个通频带,通频带范围分别约为测量的驻波比对应的 0.44 GHz ~ 0.85 GHz 第一通频带和 0.86 GHz ~ 1.12 GHz 第二通频带。

## 7 结束语

本研究通过对变压器局放特高频采集天线的优化研究和 UHF 频段信号处理模块的设计开发,制作完成了特高频传感器,经过相关参数的测试和实验验证,传感器能够精确采集信号;将特高频传感器应用于采集卡工控机,构成特高频监测系统,并设计了系统的安装结构;同时基于 Labview 平台,开发了变压器局部放电特高频在线监测系统软件。运行试验证明,系统能够安全稳定运行。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈习,王鹏,刘瑛,等. 10 kV 配电变压器重过载问题解决方法新思路[J]. 机电工程技术,2017,46(9):112-115.
- [2] 王国利,郑毅,郝艳捧,等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):154-160.
- [3] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [4] 王永强,马超. 基于 HFSS 的局放超高频信号采集天线特性比较[J]. 传感器世界,2014,20(4):21-25
- [5] 谢拥军,刘莹,李磊,等. HFSS 原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2009
- [6] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35
- [7] 张肃文. 高频电子电路[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [8] 蒋庆云,张重远,刘云鹏,等. 检波技术在超高频 PD 信号提取中的应用研究[J]. 华北电力大学学报,2006,33(3):10-13
- [9] 孙才新,许高峰,唐炬,等. 检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):89-94.
- [10] 王颂,赵晓辉,方晓明,等. 变压器局部放电超高频信号的外部检测[J]. 高电压技术,2007,33(8):88-91.
- [11] 宁佳欣. 电力变压器局部放电超高频在线监测方法研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2007.

[编辑:张豪]

## 本文引用格式:

马超,林琳,黄建芳. 新型局放特高频传感器的开发和特性分析[J]. 机电工程,2017,35(2):191-195.

MA Chao, LIN Lin, HUANG Jian-fang. Development of monitoring system based UHF PD sensor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,35(2):191-195.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>