162

# 融合超高频及脉冲电流法的局部放电监测系统

甘德刚,刘 凡,肖 伟

(四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要:基于脉冲电流法和超高频法的基本原理和特点,研制出融合超高频法及脉冲电流法的局部放电监测 系统。系统采用简易的超高频信号波形转换装置,将超高频信号转换成方波信号作为脉冲电流传感器的触发 信号,避开了超高频方法需要高速采集和海量存储的缺点。与传统的脉冲电流法比较,系统有效地去除了局 部放电信号中所包含的脉冲型干扰。实验结果表明该系统可以准确地识别局部放电及干扰信号,有针对性地 找出干扰源并有效地去除干扰信号。

关键词:局部放电;监测;脉冲电流法;超高频监测法;去嗓;绝缘

中图分类号: TM 835 文献标识码: B

## 0 引言

局部放电既是绝缘劣化的征兆,又是造成绝缘劣 化的重要原因<sup>[1-3]</sup>。因此,局部放电的监测是监测和评 估电力设备绝缘状况的重要手段之一<sup>[4-5]</sup>。变压器等 设备局部放电测量目前主要采用脉冲电流法<sup>[6-7]</sup>,其 灵敏度高且传感器易于安装。但由于现场存在严重 的电磁干扰,包括常见的电晕放电和开关动作等,这 些干扰信号特征与局部放电信号极其相似,且幅值可 能淹没局部放电信号,导致把干扰信号当成变压器放 电,以致检修不当造成损失。

局部放电超高频 UHF(Ultra-High Frequency)监测法已成功应用于气体封闭组合开关设备(GIS),并 取得良好的现场效果。该技术主要通过接收变压器 等设备内部局部放电所激发的超高频电磁波实现局 部放电监测<sup>[8-10]</sup>。由于一般干扰频带在 300 MHz 以 下<sup>[11]</sup>,而超高频监测法的监测频带为 300~3000 MHz, 避开了干扰信号,显著提高了局部放电监测的信噪 比。但目前的超高频监测系统复杂,超高频信号采 集存储技术还没有完全实现,其成本高,而且后续的 干扰移除算法、放电量标定等都没有实质地解决。

鉴于以上情况,本文将2种方法结合,提出一种 融合超高频及脉冲电流法的局部放电监测新方法。 首先利用简易的超高频采集装置采集变压器内部放 电信号,将采集到的超高频信号通过电子设计自动 化(EDA)技术处理,转换成方波信号;基于该方波信 号就可以清楚地区分脉冲电流信号中的干扰信号和 放电信号;最后通过脉冲电流法计算变压器内局部 放电量,判断变压器内部绝缘劣化状况。该方法有 效解决了脉冲电流法的干扰移除问题,能够更有效、 准确地监测变压器局部放电。基于 EDA 技术和 MAXPLUS 开发的局部放电识别系统不需要高速采

收稿日期:2011-11-22;修回日期:2013-01-29

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.028

集卡和海量的数据存储设备,大幅降低了局部放电 监测的成本。

目前,运用本文方法的监测系统已经研制成功, 在实验室运行正常,能够及时发现局部放电并有效 滤除脉冲型干扰。监测系统采用实验室研制的3阶 Hilbert 分形天线,其体积小、频带宽,便于在变压器 内部安装。同时设计了固体绝缘内气隙放电模型, 并结合分形天线,针对该模型搭建了变压器局部放 电监测实验平台。本文采用该系统进行了油中气隙 放电实验,并在实验环境中加入各种干扰;采集放电 信号,分析并比较了所提方法与脉冲电流法的区别。 结果表明该系统能够准确地识别局部放电信号,并 有效滤除周围存在的脉冲型干扰信号;与传统的脉 冲电流法相比,本文方法具有更好的监测效果及更高 的识别率。

# 1 系统基本构成及原理

融合超高频及脉冲电流法的局部放电监测系统 由脉冲电流传感器、超高频天线和超高频信号波形 转换器组成,系统原理图如图1所示。超高频信号经 过波形转换电路转换成方波,确定设备已经发生放 电现象,触发脉冲电流传感器进行数据采集,这样可 以确保脉冲电流传感器采集的信号中含有放电信 号。脉冲电流放电信号再经过去噪处理,便可得到局 部放电信号波形。





# 1.1 Hilbert 分形天线

目前广泛应用于变压器局部放电在线监测的超 高频阿基米德螺旋天线<sup>[12]</sup>、倒锥状天线<sup>[13]</sup>等都只有 一个频带,而本文采用的监测系统需要小型化内置 天线,因此采用3阶 Hilbert 分形天线。

Hilbert 分形天线依据 Hilbert 分形曲线设计而 成,由于 Hilbert 分形曲线具有严格自相似特性<sup>[14-15]</sup>, N阶 Hilbert 分形天线具有 N个谐振频率<sup>[16]</sup>。小型化 Hilbert 分形天线的谐振频率较高,通过优化设计天 线的几何结构及参数,使天线最低谐振频率处于局 部放电超高频监测频带中,从而用于监测变压器局 部放电。

本系统采用 3 阶 Hilbert 分形天线传感器,其体积小、频带宽,天线的 3 个谐振频率为 817 MHz、1.7 GHz 和 2.5 GHz。谐振频率为 817 MHz 时驻波比约为 1.5,1.7 GHz 时驻波比约为 1.2,2.5 GHz 时驻波比约为 1.6。谐振频率 817 MHz 处的通频带约为 600~900 MHz,驻波比小于 5。

文献[17]中深入研究了天线的外围尺寸、阶数、 导线宽度的改变对天线方向性、驻波比和输出阻抗 带来的影响。本系统采用的 3 阶 Hilbert 分形天线的 相对最优设计几何参数为:传感器宽度 *L* = 30 mm, 阶数 *n*=3,覆铜厚度 *b* = 2 mm。馈电位置于传感器边 角。电介质板的介电常数为 4.4,厚度为 1.6 mm。电 介质板的外围尺寸为 35.4 mm,略大于天线的外围尺 寸,其对角线外围尺寸为 50.1 mm,而变压器放油阀 内径一般为 80 mm,故本文采用的 Hilbert 分形天线 可通过变压器放油阀内置于变压器油箱内壁,并使 用同轴电缆将信号引出。

#### 1.2 超高频信号波形转换

波形转换是指将天线采集到的超高频信号放电 部分转换为高电平方波。它不需完整采集信号,可极 大地节约电力变压器局部放电的监测成本。其核心 为比较器,通过 EDA 技术完成控制。转换过程的原 理如图 2 所示。



图 2 信号转换原理框架图

Fig.2 Schematic diagram of signal conversion

首先将天线的感应信号进行放大滤波,送入比较 器进行比较,其中比较器的阈值由恒压电路给定。当 开始放电且信号幅值大于阈值时,比较器输出正电平, Altera 可编程逻辑器件 EPM3032ATC44-4 也输出 正电平。放电幅值下降到低于比较阈值时,比较器 输出低电平,但 MAXPLUS 仍然在  $\Delta t$  内保持输出正 电平。如果有大于该阈值的放电脉冲再次出现,则 重新开始延续  $\Delta t$ 。 $\Delta t$  可以针对不同的情况在操作 中进行调整,一般较为合理的设置为 20 ns,这样就 保证在放电的一整段时间内 MAXPLUS 输出正电 平。图 3 为超高频监测装置采集到的放电脉冲和经



装置转换后输出的方波。

#### 1.3 脉冲电流传感器

监测系统采用磁芯宽频带脉冲微电流传感器, 该传感器应用罗戈夫斯基线圈基本原理,幅频特性 如图 4 所示。磁芯宽频带脉冲微电流传感器监测频 带宽度超过 12 MHz,远高于传统的局部放电监测单 元的监测频带宽度(1 MHz 以内),用于耦合变压器 高压套管末屏接地线上的局部放电脉冲电流监测, 监测灵敏度为 2 pC。



图 4 宽频带型电流传感器幅频特性 Fig.4 Amplitude-frequency characteristics of broad-band current transducer

## 1.4 局部放电及干扰信号识别

监测系统采集到的信号基本可以分为变压器内 部局部放电信号、存在于脉冲电流信号中的低频干 扰信号、现场存在的超高频干扰信号3类。监测系统 可以很好地鉴别这3类信号。

在电缆长度相同时,监测系统采集到的脉冲电 流信号与超高频放电信号具有同时性。假设第1次 信号采集时,脉冲电流法监测到有放电信号,监测设 备输出的方波信号显示高电平,则说明变压器发生 局部放电;第2次信号采集时能监测到脉冲电流信 号,但未监测到超高频放电信号,则说明是白噪、线 路电晕引起的干扰,而不是变压器发生局部放电;第 3次信号采集时脉冲电流法没有采集到放电信号, 但是有高电平的方波信号,则说明是一些无线电波、 载波通信等引起的超高频信号干扰。放电信号识别 分析如图5所示,从上到下依次为脉冲电流信号、超 高频信号、方波信号。

# 2 实验结果及数据分析

#### 2.1 实验平台

图 6 是模拟绝缘内部气隙局部放电的电极系统







图 6 固体绝缘内气隙放电模型 Fig.6 Model of air-gap discharge in solid dielectric

及缺陷模型结构。电极系统结构参照 CMII(CIGRE Method Ⅱ)电极系统结构尺寸设计制作。气隙由 3 层 直径为 60 mm、厚度为 0.5 mm 的环氧板组成,中间 环氧板中心为 1 个直径 20 mm 的圆孔。实验过程 中,模型浸渍在绝缘油中进行局部放电测量。

局部放电在实验室模拟变压器油箱中产生,图 7 为实验室模拟油箱中绝缘缺陷局部放电试验及测 量系统示意图,其中 R<sub>p</sub>为保护电阻,C 为耦合电容 器。天线 S 经传输电缆将接收到的局部放电超高频 信号接入采集装置,然后通过 MAXPLUS 比较输出方 波信号。电流传感器经传输电缆(长度相等)将流过 接地线的局部放电脉冲电流信号接入示波器。



experiment in laboratory

# 2.2 融合超高频方法滤除脉冲电流信号干扰实验 波形及分析

施加电压使气隙发生放电,同时使用脉冲电流 传感器和分形天线检测放电信号,实测信号如图8所 示。其中 u<sub>1</sub>为分形天线接收到的超高频信号,u<sub>2</sub>为



图 8 电晕干扰下的油中气隙放电实测信号 Fig.8 Measured air-gap discharge signal in transformer oil under corona interference

脉冲电流传感器信号。由图 8 可见,在 P<sub>2</sub> 处监测到 80 mV 的脉冲信号,分形天线也监测到 80 mV 的信 号,可以断定 P<sub>2</sub>处发生气隙放电。在 P<sub>1</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>等处脉 冲电流法都监测到 30~40 mV 的脉冲信号,而超高 频法却没有监测到信号,说明存在线路电晕干扰。在 这种情况下,脉冲电流法和超高频法监测的结合就 可以很好地区分放电与干扰。读取脉冲电流放电波 形,计算局部放电视在放电量。

采用油中气隙放电模型施加电压 8 kV,其发生 放电 10 min 后监测系统采集到的放电波形如图 9 所示。脉冲电流法在 250 ns 附近监测到放电信号, 超高频监测装置同样在 250 ns 附近开始输出高电平 (用"1"表示,后同),且放电持续时间上基本一致。 实验结果表明,气隙放电模型在 8 kV 电压作用下存 在稳定的局部放电。



图 9 油中气隙放电实测信号 Fig.9 Measured air-gap discharge signal in transformer oil

在油中气隙放电模型 50 cm 处放置一个正在通话的手机,施加电压至 5 kV,监测系统采集到的信号如图 10 所示。实验结果表明:在 5 kV 电压作用下, 气隙模型基本不放电,所以脉冲电流传感器没有监测到放电信号;但是超高频监测装置输出方波信号 在整段 800 ns 时间内都是高电平,这是分形天线接收到的手机信号干扰,而不是局部放电信号。实验发



图 10 手机信号干扰下的油中气隙实测信号 Fig.10 Measured air-gap discharge signal in transformer oil under mobile phone interference

现手机接通信号是周期信号,持续时间为 0.5 ms,所 以在 800 ns 内均显示为发生放电现象。

# 3 结论

a. 监测系统能够准确有效地采集到变压器局部 放电信号。超高频监测装置配合脉冲电流法进一步 完善了变压器局部放电信号监测系统,使脉冲电流 法测量局部放电时,能够准确地滤除脉冲型干扰信 号,提高监测效率。同时该方法弥补了超高频监测 法没有完全成熟的缺陷,也为超高频方法监测提供 了一种新的思路。

b. 在油中气隙放电模型实验中,监测系统能够 稳定地识别干扰信号,并可以大致判断干扰源。因 此,监测系统能间接地监测周围环境中存在的放电 现象,能够发现周围环境中是否存在电晕放电、导体 接触不良产生的电弧放电、无线电波和载波通信引 起的干扰等。

## 参考文献:

- [1] 邱昌容,王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京:机 械工业出版社,1994:2-3.
- [2] 刘玲,廖瑞金,周湶,等. 基于放电时差的局部放电模式识别的研究[J]. 高电压技术,2007,33(8):35-39.

LIU Ling,LIAO Ruijin,ZHOU Quan,et al. PD pattern recognition using inter-time[J]. High Voltage Engineering,2007,33(8): 35-39.

- [3] STRACHAN S M,MCARTHUR S D,JUDD M D. Incremental knowledge-based partial discharge diagnosis in oil-filled power transformers[C]//International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. [S.I.]:IEEE,2005:181-186.
- [4] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006:10-11.
- [5] 卞超,陈少波. 基于脉冲电流波形的 GIS 局部放电检测抗干扰技术研究[J]. 高压电器,2010,46(5):30-33.
   BIAN Chao,CHEN Shaobo. Study on anti-interference technique

used in PD detection for GIS based on pulse current waveshape [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 30-33.

- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB7354—2003 局 部放电测量[S]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [7] 沈煜,阮羚,谢齐家,等. 采用甚宽带脉冲电流法的变压器局部放 电检测技术现场应用[J]. 高电压技术,2011,37(4):937-943.
  SHEN Yu,RUAN Ling,XIE Qijia,et al. On-site application of partial discharge detection of transformer using very wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Engineering,2011, 37(4):937-943.
- [8] HAMPTOM B F, PEARSON J S. Experience and progress with UHF diagnostics in GIS[C]//CIGRE Session. Paris, France: [s.n.], 1992:15-23.
- [9] 唐炬,朱伟,孙才新. GIS 局部放电的超高频检测[J]. 高电压技术,2003,29(12):22-23,55.

TANG Ju,ZHU Wei,SUN Caixin. Analysis of UHF method used in partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Engineering,2003,29(12);22-23,55.

- [10] 袁鹏,史文,杨景刚,等. 基于超高频的局部放电窄带在线监测系统[J]. 高压电器,2009,45(3):89-92,96.
  YUAN Peng,SHI Wen,YANG Jinggang, et al. On-line monitoring system of partial discharge based on narrow band UHF
  [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):89-92,96.
- [11] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等. 油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J]. 高电压技术,2008,34(7):1401-1404.
  ZHAO Xiaohui,YANG Jinggang,LU Xiuli,et al. Comparative research on current pulse method and UHF measurements of partial discharge in mineral oil[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(7):1401-1404.
- [12] 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.
  WANG Guoli,ZHENG Yi,HAO Yanpeng,et al. Study on the ultra-high-frequency sensor for PD detection in power transformer [J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):154-160.
- [13] CLEARY G P,JUDD M D. UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil[J]. IEE Proceeding of Science, Measurement and Technology. [S.I.]:IEE, 2006,53(2):47-54.
- [14] ZHU Jinhui, HOORFAR A, ENGHATA N. Bandwidth, cross polariztion and feed-point characteristics of matched Hilbert antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003 (2):2-5.
- [15] CHEN Xuan, SAFIEDDIN S N, LIU Yaxun. A downsized printed Hilbert antenna for UHF band[C] // Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus, USA: [s.n.], 2003: 581-584.
- [16] VINOY K T,JOSE K A,VARADAN V K,et al. Resonant frequency of Hilbert curve fractal antennas[C] // Antennas and Propagation Society International Symposium. Boston,USA:IEEE, 2001:648-651.
- [17] 李剑,宁佳欣,金卓睿,等. 变压器局部放电在线监测超高频 Hilbert 分形天线研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):31-35.
  LI Jian,NING Jiaxin,JIN Zhuorui, et al. Research on UHF Hilbert fractal antenna foronline transformer PD monitoring[J].
  Electric Power Automation Equipment,2007,27(6):31-35.

#### 作者简介:

甘德刚(1980-),男,四川成都人,工程师,硕士,研究方 向为电网设备状态检修与故障诊断技术(E-mail:gandegang@ 126.com);

刘 凡(1978-),男,四川攀枝花人,高级工程师,博士, 主要研究方向为电网设备技术管理与设备故障检测技术 (**E-mail**:liufan2003@163.com);

肖 伟(1966-),男,四川成都人,工程师,研究方向为电 网设备带电检测与在线监测技术(E-mail:xiaowei3425@163. com)。

(下转第 170 页 continued on page 170)

WANG Fang,QIU Daoyin,YUE Yanjie,et al. Wireless thermoelectric temperature monitoring of substation based on infrared technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31 (8):135-138.

- [14] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:73.
- [15] BANERJEE S, JAYARAM S H. Thermal effects of high-frequency voltage on medium voltage cable terminations [C] // International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK: IEEE, 2007: 669-672.
- [16] BOGGS S, DENSLEY J, KUANG J. Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2):310-315.

#### 作者简介:

周 凯(1975-),男,四川宜宾人,副教授,博士,主要研 究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:zhoukai\_scu@163.com); 熊 庆(1990-),女,四川泸州人,硕士研究生,主要研究 方向为高电压与绝缘技术(E-mail:xq\_scu@126.com)。

# Hot spots of medium-voltage cable termination under harmonic voltages superposed on fundamental voltage

# ZHOU Kai, XIONG Qing, TAO Santao, LI Xutao, ZHAO Wei

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The effect of high-frequency harmonic voltage on the temperature and electric field of  $35 \, \text{kV}$  cable termination is investigated and the relationship between hot spot and electric field distribution is analyzed. Voltages of different frequencies are exerted on the cold-shrinkable cable terminations of two types (stress grading and geometric) and it is found that, along with the increase of frequency, there are obvious hot spots on the stress grading termination, which are corresponding to the concentrating spots of electric field, while there is no obvious temperature change on the geometric termination. The electric aging test indicates that, along with the increase of aging time, the hot spot temperature of stress grading termination rises obviously while that of geometric termination is not so obvious.

Key words: electric cables; termination; insulation; harmonic voltage; resistive heating; electric fields

(上接第 165 页 continued from page 165)

# Partial discharge monitoring system based on ultra-high frequency method and pulse current method

GAN Degang, LIU Fan, XIAO Wei

(Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract**: A PD (Partial Discharge) monitoring system is developed based on the fundamental principles and characteristics of ultra-high frequency method and pulse current method, which transforms the ultra-high frequency signal into square signal by a simplified waveform conversion device and uses it as the triggering signal of pulse current transducer to avoid the high-speed data acquisition and mass storage needed by the ultra-high frequency method. Compared with the traditional pulse current method, it effectively removes the impulse interference from the PD signals. Experimental results show that the system recognizes PD accurately, finds out the interference sources and removes the interference signal effectively.

Key words: partial discharge; monitoring; pulse current method; ultra-high frequency monitoring; denoising; insulation