

# 电力变压器扫描式超高频法局部放电在线监测

王晓春

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

**摘 要:** 超高频局部放电测量法(UHF 法)与传统的脉冲电流法完全不同, 它采集的被测信号为局部放电过程所产生的超高频电磁波。利用 UHF 法可有效解决电力变压器局部放电在线监测中的抗干扰问题。本文结合变压器结构设计的放油阀式和人孔、手孔盖式超高频信号传感器安装在 220kV 和 110kV 电压等级变压器上, 采用基于 FPGA 扫描式超高频法成功地捕捉到变压器内部局部放电产生的超高频信号。对变压器局部放电故障诊断的判据等问题进行讨论, 为变压器超高频局部放电在线监测提供一种新的思路, 新的方法。

**关键词:** 超高频; 局部放电; 在线监测; 电力变压器

## 0 引言

电力变压器局部放电的在线监测是电力系统十分关心的问题。长期以来, 运行变压器的局部放电在线监测大多沿用或借鉴变压器出厂或交接试验所采用的脉冲电流法<sup>[1]</sup>, 该方法的突出问题是现场电磁干扰信号不能得到有效克服和抑制。变电站属于强电磁干扰环境, 现场广泛存在的电晕放电、开关动作产生的冲击干扰及相邻高压电气设备内部可能出现的局部放电等是变压器局部放电在线监测所面临的主要干扰源。传统的局部放电在线监测, 其测量系统与电网具有较紧密的联系, 或通过耦合电容(如套管末屏)直接与电网连接, 或通过电磁耦合(如脉冲电流传感器)等方式与电网发生联系。尽管干扰信号在进入测量电路过程中会出现一定的衰减, 但由于现场干扰信号属于强电磁干扰, 其能量和幅值往往很大, 传播路径又十分复杂, 这些干扰信号不可避免地窜入测量系统, 对局部放电测量产生严重影响。更严重的是, 干扰信号往往与被测局部放电信号具有相同或类似的特征, 被测信号极易被干扰信号所淹没, 导致有效信号识别困难甚至测量几乎无法进行。多年来, 国内外在局部放电机理、被测信号和干扰信号的提取及检测系统的抗干扰措施等方面进行了大量研究, 取得了一些成效, 但由于上述种种原因, 使变压器局部放电在线测量中的抗干扰问题仍未得到圆满地解决<sup>[2]</sup>。

目前, 超高频局部放电测量技术(UHF 法)在 GIS(SF<sub>6</sub> 封闭组合电器)局部放电检测中获得成功的应用。UHF 法所采集的被测信号为局部放电过程

所产生的超高频电磁波, 有效地避开了现场的电晕等干扰, 因而具有抗干扰能力强的特点, 非常适宜局部放电的线上监测。近年来, 基于超高频电磁波测量的变压器局部放电测量技术成为国内外局部放电研究的热点。现采用自行研制的超高频局部放电测量装置也实现了变压器局部放电的线上监测, 为推广 UHF 法积累经验。

## 1 变压器超高频局部放电在线监测原理

研究表明, 绝缘介质的耐电强度、绝缘缺陷的种类和大小等影响局部放电的发生和发展, 也影响局部放电的电流脉冲陡度。耐电强度越强, 则击穿过程越快, 所产生的放电电流脉冲越陡。变压器油及油/纸绝缘中发生的局部放电, 其信号的频谱很宽, 放电过程可激发出数百甚至数千兆赫兹的超高频电磁波信号。变电站现场的电晕干扰信号频谱范围一般在 200MHz 以下, 且在传播过程中衰减很大。采集变压器局部放电过程所产生的数百兆赫兹以上的超高频电磁波信号, 可有效地避开电晕等多种干扰信号, 达到有效测量变压器局部放电的目的。根据上述原理及变压器箱体结构, 传感器宜安装在变压器箱体内部。电力变压器的箱体厚度一般在厘米数量级, 可有效屏蔽变压器体外空间各种电磁干扰信号, 进一步提高变压器局部放电的在线监测系统的抗干扰能力。

图 1 为变压器超高频局部放电扫描式原理框图。图中采用宽带超高频天线, 工作频带为 500~1500MHz, 输入阻抗约为 50Ω, 驻波比<3。馈线为特性阻抗 50Ω 的高频同轴电缆 (LMR-400)。

为保证天线与馈线的匹配及馈电的对称性,采用 1:4 的双孔磁芯阻抗变换器实现平衡转换和阻抗转换,以达到最佳效果。

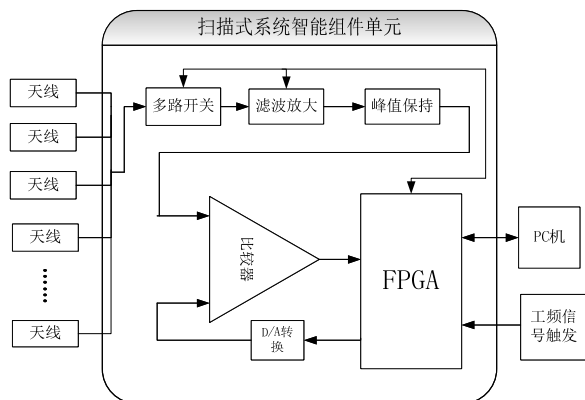


图 1 超高频扫描式监测组件单元

由于超高频电磁脉冲信号的频率很高,带宽很宽,如果直接对其进行采样和实时处理,不仅要求系统具有至少 4GHz 以上的采样率,而且对系统内存、总线传输速率、数据存储容量和 CPU 运算速度等都提出了极高的要求,其技术要求和开发成本均比较高。现有的 UHF 的信号采集方法都是将局部放电信号整体波形采集下来后,再进行分析计算<sup>[3]</sup>,其中设备的花费相当昂贵。由于 UHF 法测量的频率范围为 300MHz~3GHz,要求设备配置高频率的 A/D 转换器,信号传输集中式,且需海量高速存储,导致整台设备价格昂贵<sup>[4]</sup>;且设备运行时处理数据量大,处理时间长,影响检测下一步的进行。为此我们大胆创新采用基于 FPGA 的扫描式超高频监测法<sup>[5]</sup>。

大量实验分析表明在工频电压作用下,电气设备局部放电信号的特征具有工频相位的周期性和统计性,即具有工频相位区间的  $\phi$ -q 谱图和  $\phi$ -n 谱图,具有统计规律性,局部放电脉冲幅值处于一定的范围相位区间,通过一系列有规律的比较电平对信号进行扫描,来获取局部放电信号的相位和幅值特征<sup>[6]</sup>。

扫描法主要是将放电信号的相位和幅值特征提取出来。图 2 中的信号是油中纸板空气间隙放电,经滤波放大后示波器采集到的超高频信号。信号分别在 90°和 265°附近有两次放电,幅值在 250mV 左右。如图所示,若使用不同比较电平 V1、V2、V3 对信号进行扫描,则可得信号的放电幅值在 V2、V3 之间。通过减小比较电平之间的级差,可以准确

地提取放电幅值的大小。同时,若将工频周期分成 360 个相位区间,为每个相位区间分配存放脉冲个数的存储地址。那么在读取数据时,便可获得每个放电的相位区间<sup>[7]</sup>。

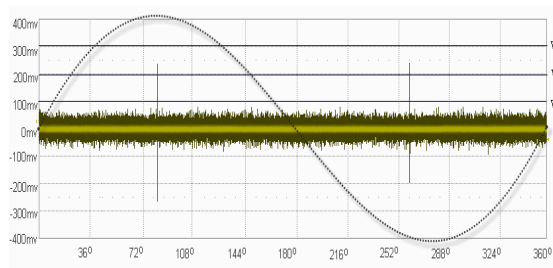


图 2 扫描式系统采集原理

扫描式采集法具体实现步骤如下:

1) 脉冲采集:通过天线传感器探测电气设备的局部放电脉冲,将采集到的局部放电脉冲信号通过滤波单元进行预处理,再通过放大单元将局部放电脉冲信号放大后输入比较器;

2) 比较电平输入:确定一个比较电平,FPGA 通过 D/A 转换电路将该比较电平转换成模拟信号输入至比较器中;

3) 脉冲比较并存储:将一个工频周期等分为多个相位区间,每个相位区间通过 FPGA 分配一个存储地址,FPGA 通过外接工频参考相位波形进行触发,在每一个触发周期内,比较器将每一个相位区间内的局部放电脉冲幅值与比较电平进行比较,FPGA 根据比较的情况,将幅值大于比较电平的局部放电脉冲的个数进行统计并存储在每个相位区间对应的存储地址上,进行比较的工频周期的数目通过 FPGA 自带的计数器进行计数,当达到设定数目时,停止比较,提取此时存储的所有脉冲个数的统计数值,清零;

4) 变值比较并存储:自动增加比较电平的数值,其级差保持不变,重复上述步骤 3),直至增加到某一比较电平时,没有大于该比较电平的放电脉冲存在,此时,该比较电平近似等于局部放电脉冲的最大电压幅值,并可以通过存储的放电脉冲个数得到平均放电脉冲电压幅值。

扫描局部放电监测单元由比较器、FPGA、外触发单元构成,它与监控主机通讯,实现局部放电参数的获取和存储。比较器实现局部放电信号与参考电平的幅值比较,如局部放电信号幅值大于参考电平,比较器输出高电平,否则为低电平。比较电平可通过程序调节,实现不同扫描比较电平下的局

部放电幅值脉冲比较。外触发单元在工频电压过零点产生上升沿,保证获得的比较脉冲具有局部放电的相位特征。触发单元从 PT 副边获取系统电压信号,将该工频信号通过电压传感器降压后由外触发单元转换为方波,输入扫描式局部放电监测单元的触发输入端。FPGA 实现将工频电压均分为 128 个相位区间,将不同比较电平的脉冲数存储于各相位区间的内部存储器中,如监测周期大于一个工频周期,FPGA 自动实现统一参考电平下多个工频周期的脉冲计数及存储,FPGA 同时实现与监控主机通过网络通讯,实现局部放电的扫描采集。

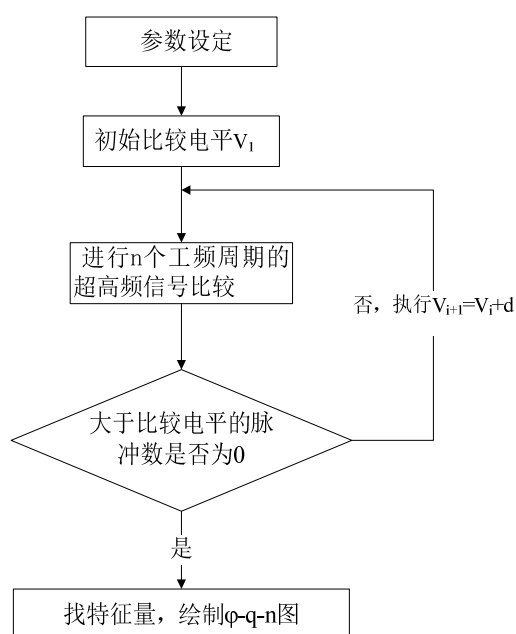


图3 扫描采集流程图

图3为软件扫描采集流程图。主要功能包括:对变压器的局部放电信号进行连续监测,实时显示1个工频周期内的放电情况,并可根据用户的设定决定是否将数据进行保存。所有数据文件按日期目录进行保存管理;采集100个工频周期的信号后,进行一次统计计算,得到局部放电的各种分布谱图,包括:最大幅值与相位分布谱图(Q~φ图)、放电次数与相位分布谱图(N~φ图)、放电次数与幅值分布谱图(N~Q图)。如有需要,还可提供放电次数~幅值~相位分布谱图(N~Q~φ图),并将这些统计结果进行压缩保存。用户可在相应的显示模式下查看这些谱图。系统在每天零点对前一天的统计结果进行计算并得出当日的放电发展趋势,包括最大放电幅值发展趋势和放电次数发展谱图,并取每100个工频周期中放电幅值的最大值形成最大放电幅值发展趋势

谱图;取每100个工频周期的放电次数总和形成放电次数发展趋势谱图<sup>[9]</sup>。

超高频信号传感器的设计和安装是变压器超高频局部放电在线监测的关键技术之一。传感器的安装应尽可能减小或避免对变压器绝缘及运行带来影响。根据超高频局部放电监测原理及变压器箱体结构,传感器一般设计为圆盘状,并安装在变压器体内,通过专门加工的密封结构将馈线引出变压器箱体外。具体可采用3种方式:(1)放油阀式。设计专用传感器辅助安置附件,该附件与变压器放油阀相连接,通过拉杆将传感器伸入变压器壳体内,如图4、5所示。(2)人孔(或手孔)盖式。传感器安装在变压器人孔(手孔)端盖内壁,如图6、7所示。(3)电流互感器式。传感器安装在变压器套管电流互感器二次接线端盖内壁。变压器局放传感器的3种安装方式中,放油阀式和人孔(手孔)盖式传感器与变压器油相接触,可直接接收变压器油及油/纸绝缘中的UHF信号;而电流互感器式传感器通过互感器二次接线盘接收油中传播过来的信号,受电流互感器所处位置的影响,该方式的灵敏度较低。本文根据现场实际情况,设计了放油阀式和人孔(或手孔)盖式2种安装方式<sup>[10]</sup>。



图4 放油阀传感器附件



图5 放油阀传感器现场安装图





图 6 人孔传感器附件



图 7 人孔传感器现场图片

放油阀式与人孔(或手孔)盖式相比,放油阀式安装方式可在不停电情况下实现传感器的安装和拆卸,不影响变压器的正常运行状态,运行单位易于接受。便携式测量装置宜采用放油阀安装方式,当变压器可能存在内部放电性故障时,可随时进行跟踪测量。人孔(手孔)盖式安装方式一般在变压器出厂或大修放油处理时实施安装,传感器永远保留在变压器内,可长期在线、实时监测局部放电。在性能方面,受放油阀自身大小所限,放油阀式中的 UHF 传感器尺寸一般较小,导致测量系统的灵敏度、增益及频率特性等低于人孔和手孔盖式安装方式。根据我们在实验室的实验结果,在放大器等性能相同情况下,放油阀式测量系统的增益是人孔(或手孔)盖式的 1/3~1/4 倍。

## 2 UHF 监测法所关心问题的探讨

与常规局部放电在线监测方法相比,超高频局部放电在线监测方法较好地解决了现场抗干扰的问题,使测量信号的可信度大大增加。但该方法也面临一些新问题需要解决。主要表现在 2 个方面。

放电量的标定问题。局部放电量是现场人员对绝缘状况进行评估以及故障诊断的重要依据。常规局部放电测量以视在放电量(PC 值)来表示放电水平。尽管视在放电量并不是真正意义上的放电量,

与实际局部放电产生的放电量存在较大的误差,但“视在放电量”的概念长期以来已被人们接受。同时,由于被测量一般为 1MHz 以下的低频信号,放电脉冲的陡度与被测低频信号的幅值关系不大,可用一个标准模拟放电源(方波发生器)模拟放电脉冲信号,并对被测的低频信号进行放电量的标定。因此,脉冲电流法对局部放电的大小易于量化。在超高频局部放电检测方法中,被测量为超高频电磁波信号,其幅值与放电脉冲的陡度、放电类型有关。目前的研究尚未得到超高频信号与实际放电量的对应关系,只能采用超高频信号幅值(mV 值)表征局部放电水平。

故障诊断的判据问题。变压器故障诊断判据是现场十分关心的实际问题。从目前超高频局部放电的研究情况来看,可从变压器出厂、交接或大修局部放电试验时进行超高频局部放电测量及放电类型识别等方面开展故障诊断判据的研究。

在变压器出厂、交接或大修中进行局部放电试验时,记录局部放电起始电压和局部放电量(pC),并同时进行超高频局部放电的测量。由于出厂、交接或大修时局部放电试验时的试验电压远高于变压器的运行电压,该试验电压下的超高频局部放电信号最大幅值对于衡量变压器绝缘状况以及变压器运行后的局部放电在线监测具有一定的参考价值。因此,建议通过比较局部放电试验时的放电起始电压与现场变压器实际运行电压,将出厂、交接或大修时试验电压下的超高频局部放电信号最大幅值作为变压器局部放电在线监测初始值,并以此作为运行电压下的局部放电的“注意值”。

对于局部放电类型的识别,可采用放电指纹(放电谱图)分析法。放电指纹分析有助于放电类型的判别,该方法首先对各种放电产生的 UHF 信号进行检波,通过计算机处理获得检波信号的二维、三维谱图,根据不同的放电谱图判断放电的类型。目前对绕组绝缘中油间隙放电、绕组端部油隙放电及纸板沿面闪络放电等产生的超高频信号进行了研究,发现一些新现象,这些特征将有助于局部放电危害程度的判断。另外,通过对现场变压器实施长期局部放电的在线监测,可积累有关故障诊断的经验,对于认识和推广变压器超高频局部放电在线监测技术是十分重要的。

## 3 现场应用实例

自行研制的超高频局部放电测量装置分别安装在山东电网的 2 台变压器上,其中之一为新投运变压器(110kV 电压等级,容量 31.3MVA,三绕组),另一台为已服役 3 年的运行变压器(220kV 电压等级,容量 120MVA,三绕组变压器)。根据现场的实际情况,采用不同的传感器安装方式。

### 3.1 在新投运变压器中的应用

该变压器于 2010 年 8 月间投运。采用人孔盖式安装方式,在变压器出厂前将传感器安装到人孔盖的内壁,测量单元等安装在人孔盖外侧,如图 6 所示。在变压器出厂局部放电试验的同时进行了超高频局部放电测量,以此作为运行后超高频局部放电信号的基础值。按有关标准要求,局部放电试验电压为  $1.5U_m/\sqrt{3}=109\text{kV}$ ,而实测放电起始电压约为  $1.4U_m/\sqrt{3}=101\text{kV}$ 。表 1 为出厂局部放电试验(pc 值)与超高频局部放电信号最大幅值(mV 值)对比数据。

表 1 脉冲电流法和 UHF 法的对比

测量方法	测量值		
	A 相	B 相	C 相
脉冲电流法/pC	105	88	63
UHF 法/mV	510	455	382

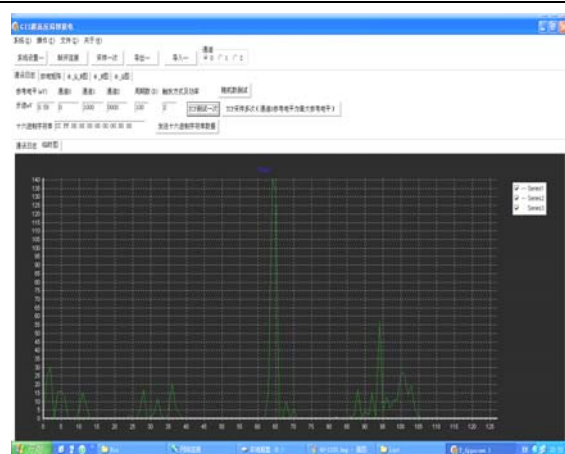


图 8 110kV 变压器超高频信号典型波形

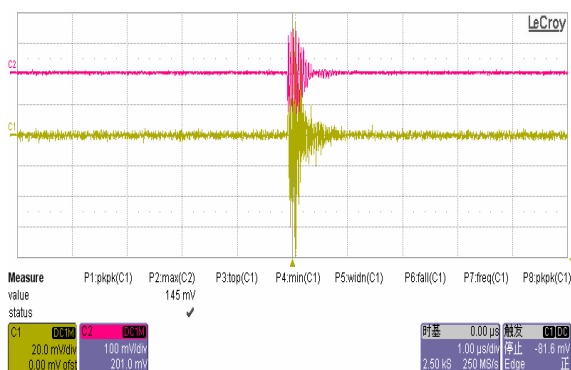


图 9 110kV 变压器超高频信号典型波形

变压器在交付运行后不久即进行了超高频局部放电在线测量,数据采集分别采用高速数字示波器(采样速率 4GHz、带宽 1GHz)以及自行研制的局放在线监测装置,直接采集并显示 UHF 信号波形,如图 8 所示。测量中发现变压器存在明显的超高频局部放电信号,且信号出现的次数频繁,其中最大幅值为 300mV 左右(现场背景干扰小于 20mV)。图 9 为现场捕捉的超高频信号典型波形(图中第 1 个波形)。现场主控室显示,该变压器实际运行相电压为  $110\text{kV}/\sqrt{3}=64\text{kV}$ ,低于局部放电试验时的放电起始电压,说明变压器内部存在某种形式的局部放电。经调查后发现,该变压器在投运前数小时曾进行过注油作业,而本次测量距注油时间不足 1 天,因此,上述所测量到的信号可能为变压器油中混入大量气体所致,所测量到的信号可能为油中气泡放电。在变压器连续运行 7 天后又进行了一次局部放电测量,未出现局部放电现象。在随后对变压器的跟踪测量中也未发有任何 UHF 号。

### 3.2 在已投运变压器中的应用

被测变压器 2008 年投运,投运不久油色谱分析即发现乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )成分,且呈缓慢增长趋势,而  $\text{H}_2$  和总烃指标等为正常范围,随后进行油色谱跟踪。表 2 为 2009 年 7 月~2010 年 6 月间进行的变压器本体油色谱分析部分跟踪结果(此前对该变压器进行过 2 次滤油处理)。该变压器在无局部过热的情况下出现乙炔成分持续缓慢增长的现象,说明变压器内部存在某种形式的高能量放电,但通过对变压器本体、有载分接开关及人孔进入检查等一系列措施和试验均未能发现变压器存在的明显异常现象。

表 2 油色谱跟踪结果 ( $\times 10^{-6}$ )

时间	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{H}_2$	总烃
2009-07-15	1.8	2.8	0	2.0	2.5	6.6
2009-08-13	2.0	2.8	0	2.6	3.2	7.5
2009-09-18	2.8	3.0	0	4.0	3.6	8.4
2009-10-9	3.2	3.5	0	6.5	4.2	9.2
2009-11-27	3.6	3.8	0	8.2	5.8	13.4
2009-12-20	4.0	4.0	0	11.3	6.7	15.8
2010-02-22	4.5	4.5	0	11.8	8.2	19.6
2010-04-15	4.7	4.5	0	12.5	9.9	21.3
2010-06-30	5.2	4.6	0	13.1	10.8	23.2

2010 年初,曾对该变压器进行了针对性超高频局部放电检测。因变压器不具备停电条件,因此采用放油阀式安装方式在变压器正常运行状况将 UHF 传感器伸入变压器内,并以高速数字示波器采

集 UHF 信号, 如图 10 所示。现场实测表明, 测量系统基本上未受到现场电磁信号的干扰, 背景干扰小于 20mV。

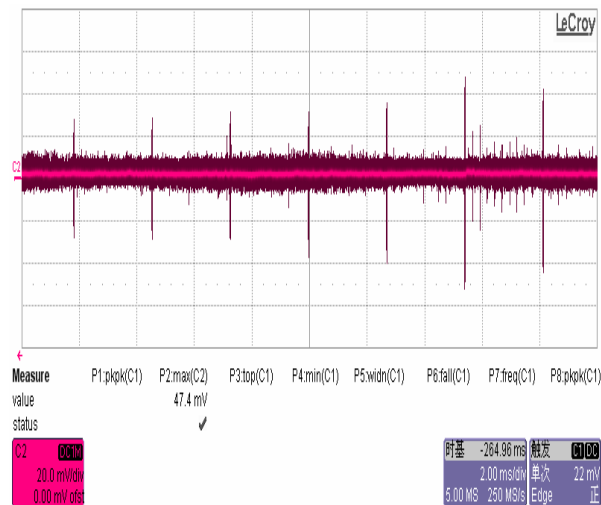


图 10 放油阀安装方式捕捉到的 UHF 信号波形



图 11 套管锥体处的放电点

在对变压器实施的数天连续监测中观测到若干次超高频信号, 信号出现的时间间隔较长, 最大幅值约 120~140mV, 图 10 为局放装置现场捕捉到的典型信号波形。根据现场实验及信号波形特征, 可认为该信号为放电产生的超高频信号。结合表 2 的油色谱分析结果及对该变压器进行的一系列检查和试验, 该变压器内部可能存在间歇性放电, 且放电的能量较大、放电间隔的时间较长。

2009 年 11 月, 该变压器在现场实施了吊罩检查。发现变压器中压 A 相套管下部锥形瓷件距均压球约 250mm 处有一约 2cm×2cm 的黑斑, 经仔细检查确认该处为深度数毫米的气孔(砂眼), 直径约 5mm, 其内有明显的碳黑痕迹, 如图 11 所示。经与现场及生产厂家讨论认为, 套管下锥体中的气孔(砂眼)位于高电位区, 极有可能发生局部放电现象。在变压器更换中压 A 相套管和滤油等处理并重新运行后近 2 个月内, 油色谱分析未再出现乙炔等放电特征气体成分, 证明上述故障点为乙炔产生的主要

原因。套管下锥体与变压器本体相通, 气孔(砂眼)中的放电为油中(或油/瓷介质表面)放电形式, 具有典型的放电间歇性, 这一放电形式导致变压器本体油中的乙炔呈缓慢增长趋势。

在变压器重新投入运行前进行了现场变压器局部放电试验及超高频局部放电测量。UHF 传感器安装采用人孔(手孔)盖式, 分别在中性点手孔和人孔处安装 2 个传感器, 如图 7 所示。参考有关标准要求, 选择局部放电试验  $1.3U/\sqrt{3}=189(\text{kV})$ , 试验时间为 30min。在变压器加电的 10min 内, 实测局部放电电量最大值约 2000pC, 对应 UHF 信号最大值为 150mV。由于人孔(手孔)盖式测量系统增益为放油阀式的 3~4 倍, 因此, 经折算估计该变压器运行电压下采用放油阀式时所测量到局部放电电量在 6000~8000pC 数量级(UHF 信号最大幅值约 120~140mV)。在随后进行的局部放电试验过程中, 放电量逐渐下降, 各相放电量均在 300pC 以下, UHF 信号不再出现。

为继续跟踪该变压器局部放电发展情况, 目前已将超高频局部放电在线监测系统安装在该变电站, 可对局部放电实施在线、实时监测。

## 4 结论

变压器超高频局部放电监测所具有的双重抗干扰效果有助于解决变压器局部放电在线监测中的抗干扰问题。2、根据现场的实际情况, 对传感器可采用放油阀式或人孔(手孔)盖式安装方式。3、有关放电量的标定及故障诊断的判据问题尚需进一步研究和积累经验。

## 参考文献:

- [1] 王晓莺. 变压器故障与监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 杨易, 李德化, 何树林. 变压器局部放电在线监测中信号干扰分析与抑制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003(S1).
- [3] 杨霖, 李剑, 王有元, 等. 变压器局部放电监测中的小波去噪方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004(10).
- [4] 高金峰, 李祥飞, 王俊鹏. 小波包算法在电力变压器局放信号检测中的应用[J]. 郑州工业大学学报(自然科学版), 2005(2).
- [5] 邱毓昌. 用超高频法对变压器绝缘进行在线监测[J]. 高压电器, 1997(4): 36-39.

- [6] 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.
- [7] 胡明友,谢恒. 基于人工神经网络的绝缘局部放电信号提取方法的研究[J].高电压技术,1999(2).
- [8] 高宁,高文胜,李福祺,等. 变压器局放在线监测中的现场干扰分析[J].变压器,2002(z1).
- [9] 刘益成,孙祥娥.数字信号处理[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [10] 王国利,郑毅,沈嵩,等. AGA2BP 神经网络用于变压器超高频局部放电模式识别 [J]. 电工电能新技术,2003,22(2):629.
- [11] 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.

---

**作者简介:**

王晓春(1978-),男,江苏东台人,工程师,研究方向:电站在线监测, E-mail: wxc68@qq.com。