

# 基于 UHF 法的变压器局部放电在线监测系统的开发

向天堂

(广安电业局, 四川 广安 638000)

**摘要:** 变压器是电力系统中的重要设备, 它的绝缘状态直接关系到电网的安全运行。目前监测变压器局部放电的方法有很多种, 但是由于超高频传感器安置在变压器箱体内部, 变压器壳体的屏蔽作用使得超高频检测法的抗干扰能力优于目前传统局部放电检测法, 该法可以最大限度避开干扰信号。目前, 变压器的在线监测技术已经得到了大量的应用。根据保定某变电站的现场要求, 利用 delphi 基于超高频法开发了一套基于超高频法的管理系统, 并且在现场得到了应用, 取得了较好的效果。

**关键词:** 变压器; 超高频法; 局部放电; 在线监测; 管理系统; delphi

**Abstract:** The transformer is the important equipment in power system and its insulation state directly relates to the safe operation of power grid. The current monitoring method for transformer partial discharge is too much, but because the ultra-high frequency (UHF) sensors are placed in the interior of transformer tank, the shielding effect of transformer shell makes UHF method is better than the traditional ones, and this method can avoid interference signals to the utmost. At present, the on-line monitoring technologies of transformer have been widely used. According to the field requirements of a substation in Baoding, a management system based on UHF method is developed using delphi. It has been applied in the field, and the good results are achieved.

**Key words:** transformer; ultra-high frequency (UHF) method; partial discharge; on-line monitoring; management system; delphi

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)06-0063-04

## 0 前言

近年来, 随着电力系统的快速发展, 变压器的容量和电压等级不断提高, 运行中的安全问题也越来越受到重视。在变压器所发生的故障中, 绝缘问题占很大的比重, 因此需要一种有效的手段对变压器的绝缘状况进行监测, 确保运行中变压器的安全。局部放电监测作为检测变压器绝缘的一种有效手段, 无论是检测理论还是检测技术, 近年来都取得了较大的发展, 并在电厂和电站中得到了实际应用。

超高频法具有高灵敏度, 超高频法(UHF法)是通过超高频信号传感器接收局部放电过辐射的超高频电磁波, 实现局部放电的检测。变压器油一隔板结构的绝缘强度比较高, 因此变压器中的局部放电能够辐射很高频率的电磁波。变压器局部放电测量时, 现场干扰信号的频谱一般小于 300 MHz, UHF 检测技术的检测频率范围一般为 500 ~ 1 500 MHz, 可最大限度避开干扰信号。而且超高频传感器安置在变压器

箱体内部, 变压器壳体的屏蔽作用使得超高频检测法的抗干扰能力优于目前传统局部放电检测法<sup>[1~5]</sup>。

目前, 变压器的在线监测技术已经得到了大量的应用, 市场上也有不少成套的设备, 但是在现场由监测系统取得的数据量极大, 要得到变压器在线运行的有效信息, 必须对这些数据进行高效的管理, 以方便后续的处理。根据保定某变电站的现场要求, 利用高级软件基于超高频法设计了管理系统, 并且在现场得到了应用, 取得了较好的效果。

## 1 超高频法(UHF)

局部放电所辐射的电磁波的频谱特性与局部放电源的几何形状以及放电间隙的绝缘强度有关。当放电间隙比较小时, 放电过程的时间比较短, 电流脉冲的陡度比较大, 辐射高频电磁波的能力比较强; 当放电间隙的绝缘强度比较高时, 击穿过程比较快, 此时电流脉冲的陡度比较大, 辐射高频电磁波的能力比较强。发生在变压器油中的局部放电脉冲非常符合

上述理论。研究表明,该类放电脉冲可以辐射上升沿达到 1~2 ns、频率达到数 GHz 的高频电磁波,为一种横电磁波(TEM)。该电磁波的能量以固定的速度沿电磁波的传播方向流动。对于变压器的运行现场来说,通常的噪声频谱低于 400 MHz,而超高频传感器一般安装在变压器内部,变压器箱体厚度一般为厘米级,对外部噪声有很强的屏蔽作用,因而使得超高频法具有很强的抗干扰性。所以,通过耦合这种以 TEM 波形式传输的电磁信号,就可以监测到变压器内部的局部放电,并进一步认识其绝缘状态。这种监测方法称作超高频监测方法<sup>[6,7]</sup>。

变压器超高频局部放电在线监测的关键技术之一是解决超高频测量探头的安装问题。根据超高频局部放电监测原理以及变压器箱体结构,可采用3种方式将探头安装在变压器壳体内,一是放油阀安装方式,二是人孔(手孔)盖安装方式,三是预制方式。变压器壳体为钢板制作,由于厚度一般都在 cm 数量级,对电磁信号具有非常良好的屏蔽作用,因此,超高频测量探头无论采用上述哪一种安装方式都可保证局部放电测量免受外界任何干扰信号的影响。

局部放电超高频测量其测量的中心频率通常在数百 MHz、带宽为几十 MHz。通常,超高频范围内(300~3 000 MHz)提取局部放电产生的电磁波信号,包括电气设备外部引线上电晕在内的外界干扰信号几乎不存在,检测系统受外界干扰影响小,因而能较有效地抑止外部干扰和提高信噪比。变压器局部放电超高频在线监测系统的基本结构如图1所示。

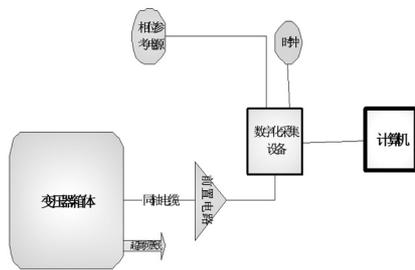


图1 变压器局部放电超高频在线监测系统示意图

## 2 局部放电超高频信号的数字化抗干扰方法

虽然超高频监测方法可以有效抑制低频电磁干扰,但一些通讯干扰、检测设备的热噪声、系统白噪声以及来自于硅堆的操作过电压都会干扰对超高频信

号的检测、识别和分析。通常,抗干扰技术包括硬件滤波技术和软件滤波技术,通过对系统硬件的设计,可以在一定程度上抑制某些类型的干扰,但由于现场干扰的复杂性,仅仅依靠硬件滤波不能达到满意的结果<sup>[8]</sup>。随着现代数字信号处理技术的发展,局部放电在线监测抗干扰的手段开始向软件的方向发展,在实际应用中取得了良好的抗干扰效果。常用的数字滤波方法主要有:有限冲击响应(FIR)滤波器、无限冲击响应(IIR)滤波器和小波分析等。

(1)有限冲击响应(FIR)滤波器<sup>[9,10]</sup>:该滤波器是指系统的单位脉冲响应  $h[k]$  仅在有限范围内有非零值的滤波器。 $M$  阶 FIR 滤波器的系统函数  $H(z)$  可以表示为

$$H(z) = \sum_{k=0}^M h[k]z^{-k} \quad (1)$$

$H(z)$  是  $z^{-1}$  的  $M$  阶多项式,在有限  $z$  平面  $H(z)$  有  $M$  个零点,而它的  $M$  个极点都位于  $z$  平面原点  $z=0$ 。FIR 滤波器具有线性相位特性,在数字信号处理领域得到广泛应用。

(2)无限冲击响应(IIR)滤波器:该滤波器可以由式(2)所示的差分方程表达。

$$H(z) = \frac{\sum_{j=0}^M b_j z^{-j}}{1 + \sum_{i=0}^N a_i z^{-i}} \quad (2)$$

当系数  $\{a_i | i=1, 2, \dots, N\}$  中,至少有一个是非零时,上式所描述的系统被称为 IIR 滤波器。IIR 滤波器通常满足  $M \leq N$ ,这时系统称为  $N$  阶 IIR 数字滤波器。

(3)小波分析<sup>[11]</sup>:无论是信号的时域波形还是频域波形都包含着信号的全部信息,但有些信号,如周期性信号,频域特征明显;有些信号,如离散性信号,时域特征明显;而更多的信号,如局部放电信号,单从时域或频域来分析,往往只能了解信号的部分特性,只有同时从时域和频域两方面来看,才能对信号有更清晰和全面的了解。近年来发展起来的小波分析为局部放电去噪研究提供了新的强有力的工具。小波分析同时具有很强的时域和频域的分析能力,成为近年来数字信号处理研究领域研究的热点。做伸缩得到的结果,若  $a, b$  不断变化,具有带通性能,即  $\psi(a, b)$  围绕着中心频率是有限支撑的,那么  $\psi(a, b)$  和  $F(\Omega)$  作内积以后也将反应  $F(\Omega)$  在中心频率处的局部性质,从而实现良好的频率定位功能。S. Mallat 在小波分析的基础上分析了信号沿不同尺度的传递特

性 提出了一种有效去除白噪声的模极大值法。其主要思路是: 信号和白噪声具有不同的小波分析特性, 白噪声的模极大值点随尺度的减小急剧增加, 而信号的模极大值点随尺度变化不大这样可以认为在某一较大的尺度上模极大值点主要是信号的; 根据模极大值的传递特性, 保留信号对应的模极大值点, 通过反变换即可获得去噪后的信号。

对于局部放电类型的识别, 可以采用放电指纹(放电谱图)分析法。该方法首先对各种放电产生的  $U_t - IF$  信号进行检波, 通过计算机处理获得检波信号的二维(相位—信号幅值图)、三维谱图(相位—信号幅值—信号个数) 根据放电谱图判断放电的类型。

### 3 管理软件的开发

#### 3.1 软件系统功能和结构

系统在中文 Windows 操作平台下构建, 人机交互界面友好, 主程序采用 Delphi 可视化编程, 后台数据库选择 SQL Server2000。软件系统设计的流程如图 2 所示。

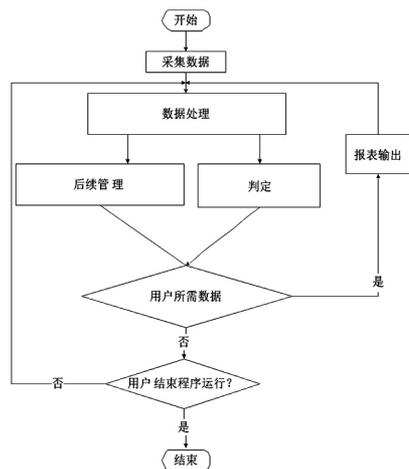


图 2 系统流程图

整个系统结构分为 3 个层次: 功能层、设计层和数据层。功能层面向操作人员, 包括现场数据的输入、修改、查询和删除, 对于图像处理模块, 除了包括图像的载入、删除、保存和还原等基本功能外, 数据导出功能可以将数据(包括图像)以报表和 Excel 的形式输出, 输出文件的路径由用户自己设置。对于管理系统的安全机制, 系统设置了用户管理权限模块, 系统使用的用户权限分为: 管理员、操作员和公共用户。公共用户权限最低, 只有查看、打印输出的权限; 操作员进行绝缘子数据的维护和试验数据的录入操作; 管理员具有最高的权限, 可以执行所有操作。用

户表结构为: 用户名、密码、权限级别。所有模块由后台的数据库有机的结合在一起, 实现对数据的管理。

#### 3.2 数据管理模块开发

##### 3.2.1 数据库构建

数据管理模块管理各种信息数据库, 除基本操作外还增加数据分析统计功能, 应以报表和 Excel 表格方式输出信息。数据库设计是系统的核心, 数据库由数据表组成, 应具备的主要数据表如下。

##### 1) 基本信息数据表

记录变压器基本信息, 表的结构和主要字段为: 变压器编号、类型、制造厂、型号、电压等级、出厂时间和投运时间。在软件开发的时候统一了字段类型, 如规定变压器编号格式为“FH-0001”, 各种时间格式都设置为“年-月-日”的标准格式, 这样既减少了操作人员的工作量又统一了格式, 方便数据对比。

##### 2) 变压器信息数据表

每次用 UHF 法对运行的变压器进行监测后, 都要将大量的信息录入到该数据表中。数据表字段定义为: 测试日期、测试人员、天气情况、风力、放电位置。同时将“变压器编号”设置为主键, 建立其与“变压器信息数据表”的联系, 实现数据表的联合管理。

##### 3.2.2 数据库操作

对数据库的操作主要包括与数据库的连接、信息的录入、修改、查询等操作, Delphi 与数据库的连接主要有 BDE 和 ADO 两种方式, 该系统采用了 ADO 方式, 与数据库的连接主要涉及到数据集、数据源和数据感知控件 3 大类。对数据表的修改、删除或历史记录的操作有两种方式, 一种方式是直接调用 ADOQuery 或 ADOTable 组件相应的“方法”, 另一种是编写 ADOQuery 组件的 SQL 语句, 这两种方法各有特点。相比较而言, 对数据库的录入插入和修改操作采用第一种方式比较简单, 但对数据库的查询, 通过编写 SQL 语句相对更为灵活, 根据需要, 该系统在历史数据查询界面设置了 5 个查询选项, 分别为变电站名、测试人员、测试时间段。选项之间可选择“并且”或“或者”进行逻辑组合, 在程序中根据这些查询条件将其组合成相应的 SQL 查询语句, 然后执行 ADOQuery 组件的 SQL 查询功能, 然后将查询到的结果显示到 DBgrid 数据组件中。

### 4 结 论

通过选定超高频法对变压器进行在线监测, 根据

现场的需求开发了一套数据管理系统,总的说来做了如下工作:①论述了超高频法的应用优点,它在变压器局部放电的监测中有着较强的抗干扰能力;②利用 delphi 开发了数据管理系统,同时利用 SQLserver 建立了后台运行的数据库系统;③通过现场的应用,取得了较好的成果。

### 参考文献

[1] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[2] [苏]r. C. 库钦斯基著,徐永禧,胡维新译. 高压电气设备局部放电(第1版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.

[3] 葛景滂,邱昌容主编. 局部放电测量(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.

[4] 邱昌容,王乃庆主编. 电工设备局部放电及测试技术(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[5] 朱德恒,谈克雄主编. 电绝缘诊断技术(第1版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[6] 吴广宁主编. 高电压技术(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[7] 吴玉鹏,陈丽娟,王鹏等. 2002年全国电力可靠性分析[J]. 中国电力, 2003, 36(5): 1-7.

[8] 陈庆国. 变压器局部放电特高频检测及干扰抑制算法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[9] [苏]r. C. 库钦斯基著,徐永禧,胡维新译. 高压电气设备局部放电(第1版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984年.

[10] 王颂,李香龙,李军浩等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 100-102.

[11] 王国利,郝艳捧,李彦明. 光纤技术在电力变压器绝缘监测中的应用[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 32-35.

(收稿日期:2011-10-08)

(上接第49页)

并且对干扰有较强的抑制能力。

## 3 结 论

(1) 通过对模拟信号仿真和现场采集的局部放电信号去噪仿真都可以看出,传统的基于傅里叶变换的滤波方法有其局限性:因这种变换难以获得信号的局部特性,对放电这样的非平稳突变信号,较难获得理想结果,自适应滤波器能自动调节参数,但其稳定性较差,所采用的 $K$ -均值阈值方法能有效地从被周期性窄带干扰淹没中提出局部放电信号,准确率高,波形失真小,并且对干扰有较强的抑制能力。证实了 $K$ -均值阈值方法在局部放电信号提取和噪声抑制的能力方面有较高的准确性和有效性。

(2) 窄带干扰形成的干扰峰,在大尺度下的幅值比小尺度下的大,粗略信号部分峰值比细节信号部分的幅值大,窄带干扰会呈现强烈的干扰峰,而PD信号在整个频域呈均匀分布,该重要特征是所采用 $K$ -均值阈值算法抑制干扰的重要依据。

(3)  $K$ -均值阈值法首先将采样数据进行聚类划分,对含噪信号进行初次筛选,再对筛选的信号数据选择合适的阈值进行去噪,有效地提高了去噪效果,增强了经典阈值法对窄带干扰频率的自适应性。

### 参考文献

[1] 许高峰,孙才新,唐炬等. 基于小波变换抑制GIS局部放电检测中白噪干扰的新方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 87-90.

[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] 司文荣,李军浩,袁鹏等. 气体绝缘组合电器局部放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 119-126.

[4] 徐淑珍,朱子述,秦松林等. 局部放电在线检测中周期性干扰的抑制[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 32-34.

[5] 王晓霞,孙书星,马殿光. 局部放电在线监测信号中周期性脉冲干扰的抑制[J]. 变压器, 2002, 39(Z1): 36-38.

[6] 王国利,郝艳捧,袁鹏等. 变压器局部放电超高频检测中的混频技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 39(S1): 36-38.

[7] 朱根良. 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]. 高压电器, 2002, 24(10): 115-120.

[8] 杜彦明,顾霓鸿. 中国电力系统配电开关设备现状及事故情况[J]. 高压电器, 2001, 25(11): 60-65.

作者简介:

李建明(1952),男,教授级高工,高电压与绝缘技术专家,四川电力科学研究院副总工程师。

(收稿日期:2011-09-28)