

基于超高频的局部放电窄带在线监测系统

袁 鹏, 史 文, 杨景刚, 黎大健, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 笔者研制了两种超高频传感器, 引进了基于混频技术的信号调理技术, 构造了基于 AGA-BP 神经网络算法的模式识别单元, 设计了系统控制显示软件, 最终形成完整的测量系统, 最后通过变压器和 GIS 典型缺陷局部放电试验验证了系统性能。

关键词: 局部放电; 超高频; 在线监测系统

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0089-04

On-line Monitoring System of Partial Discharge Based on Narrow Band UHF

YUAN Peng, SHI Wen, YANG Jing-gang, LI Da-jian, LI Yan-ming

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

Abstract: An on-line monitoring system is constructed through developing two kinds of UHF sensors, designing a pattern recognition unit based on AGA-BP neural network algorithm, coding a program to control the system and display, and adopting the signal modulating technique based on frequency mixing. The system performance is verified with the experiments of partial discharge in transformer and GIS.

Key words: partial discharge(PD); ultra high frequency(UHF); on-line monitoring system

0 引言

局部放电是造成电力设备绝缘劣化的主要原因, 也是绝缘劣化的重要征兆和表现形式, 对局部放电进行有效的监测对于电力设备的安全稳定运行具有重要意义。

笔者在探究电力设备局部放电超高频电磁波传播特性的基础上, 研制了一套基于超高频的局部放电窄带在线检测系统。该系统由超高频传感器、信号调理和数据采集单元、模式识别单元和系统软件等部分组成, 结构见图 1。

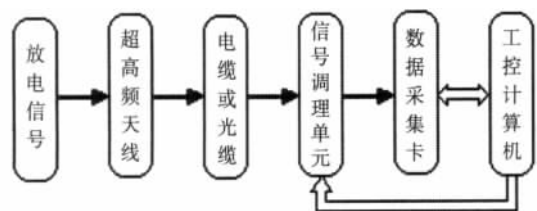


图 1 系统结构图

1 超高频传感器

针对不同的设备和不同的安装条件, 该系统有

两种传感器, 分别为等角螺旋天线和套筒天线, 两者均经过了小型化及现场安装的配件设计, 在不降低性能的前提下最大限度方便现场安装。

1.1 平面等角螺旋天线

平面等角螺旋天线是一个完全由角度确定形状的天线, 天线的外形可以用极坐标表示为 $r=r(\theta)$, 如果矢径 r 增大(或减小)了 k 倍, 相应的 kr 可以在另一个幅角上满足曲线方程式, 只是把表示 $r=r(\theta)$ 的极坐标曲线旋转了一个角度, 表达式为 $kr(\theta)=r(\theta-\beta)$ 。

此处 β 为相应 r 增大(或减小) k 倍时, 整个原始曲线旋转的角度, 具有这种性质的曲线方程式为

$$r=r_0 e^{\frac{\alpha(\theta-\theta_0)}{1/\alpha}} \quad (1)$$

式(1)中, θ_0 为螺旋的起始角, r_0 为对应 θ_0 时的矢径, α 是一个与 r 无关的常数, $1/\alpha=\tan \alpha$ 称螺旋率, α 是螺旋线切线与矢径 r 之间的夹角, 又称螺旋角。因而当 θ 变化时所描绘出来的平面螺旋线, 其螺旋角始终保持不变, 式(1)代表的曲线为等角螺旋线^[1]。

该系统采用双臂等角螺旋天线, 天线的每一臂都是有一定宽度的, 且都是由两条起始角相差为 δ 的等角螺旋线构成, 结构见图 2。

文中取 $\delta=90^\circ$, 则金属等角螺旋天线与其空隙部分的形状完全相同。天线臂长越大, 则天线下限工

收稿日期: 2008-10-27; 修回日期: 2008-12-21

作者简介: 袁 鹏(1975), 男, 博士研究生, 从事局部放电检测和故障诊断技术的研究。



图2 等角螺旋天线结构示意图

作频率越低,天线始端半径越小,则上限频率越高。

螺旋天线具有宽频带、圆极化、尺寸小、效率高以及可以嵌装等优点。由于该天线呈薄片状,可将其安装在电力设备内部,如安装在变压器内壁上,可提高灵敏度、削弱外部放电干扰,也可通过特制装置安装在能泄漏电磁波的地方。

该天线其驻波特性和增益特性见图3(a)、(b)。

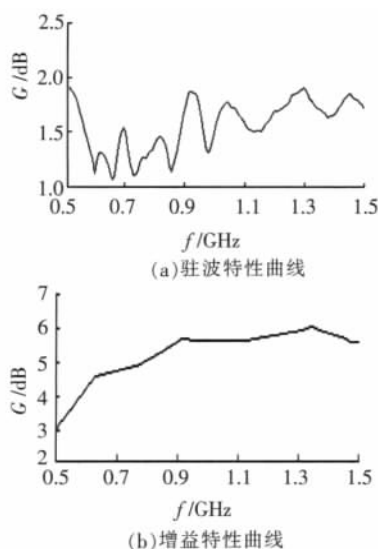


图3 等角螺旋天线的特性曲线

1.2 套简单极子天线

该天线采用同轴结构形式,主要由辐射体、天线馈电装置、转换接头和天线底座等组成,为非频变天线^[2],其结构见图4。

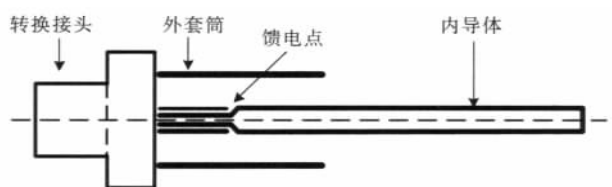


图4 套简单极子天线结构图

该天线的主瓣宽度(半功率波瓣宽度)约为 65° ,具有良好的方向特性,在测量系统所选择的检测频带内具有良好的频率响应和较高的灵敏度,其驻波比和增益分布见图5(a)、(b)。

该天线体积小,可灵活地安装在GIS的盆式绝

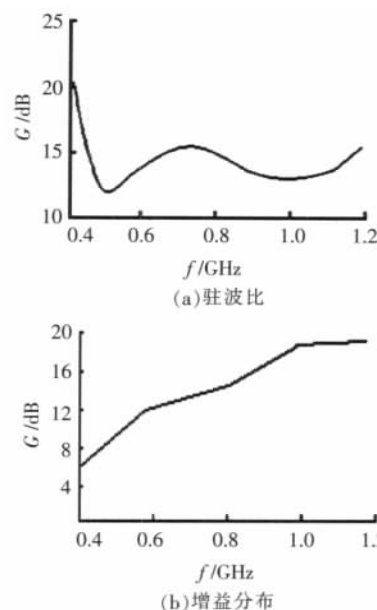


图5 天线特性曲线图

缘子、进出线套管等处。另外,该天线还可从油阀处通过特制的装置伸进变压器内部,不需要改变变压器现有的结构,有利于安装在已经投入运行的变压器中,也可进行在线不断电安装,见图6中圆圈处。

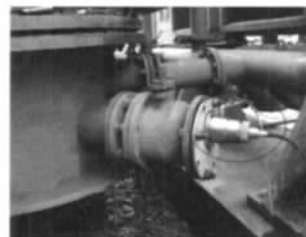


图6 安装在油阀处的套筒天线

2 信号调理与采集单元

对超高频信号进行至少要一个工频周期以上的单次测量时,常用的A/D采集卡在采样率和存储深度等方面很难满足要求,而且局部放电测量通常只关心信号的峰值及其出现的相位,把特高频信号无失真地采集下来也意义不大,且数据量极大,数据处理难度高。因此,必须对信号进行处理,使得能任意选通超高频段一定带宽的某一中心频率的信号,将信号调整到普通采集卡能处理的频率范围,并保留其峰值和相位等特征,达到既能检测信号又降低技术要求的目的。该系统采用的是基于混频技术的超高频信号调理技术。

在本振信号的参与下,将输入信号的频率或已调信号的载频变换到一个新的频率,称为中频,而保持调制类型(如调幅、调频等)和调制参数(如调制频率、调制系数等)都不变,这一变换过程称为混频^[3]。混频器可以看作是一个三端口器件,包括信号输入端口、本振信号端口和中频输出端口。乘积型混频器在原理上相当于一个乘法器,即输出中频信号是输

入信号与本振信号相乘的结果。乘积型混频器实现模型见图7。

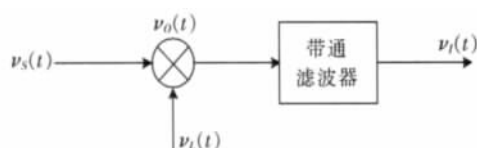


图7 乘积型混频器实现模型

设输入信号是普通的调幅波,即设输入信号为

$$v_s(t) = V_{sm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_s t \quad (2)$$

本振信号为

$$v_L(t) = V_{Lm} \cos \omega_L t \quad (3)$$

设乘法器增益为 k , 则输出中频信号为

$$v_o(t) = k v_s(t) v_L(t) = \frac{k}{2} V_{sm} V_{Lm} (1 + m_a \cos \Omega t) \times [\cos(\omega_L - \omega_s)t + \cos(\omega_L + \omega_s)t] \quad (4)$$

若差频 $\omega_f = \omega_L - \omega_s$ 且 $\omega_f < \omega_s$ 在滤波器的通带内, 而和频 $\omega_f = \omega_L + \omega_s$ 在滤波器的阻带内, 称为下混频; 反之, 称为上混频。滤波器滤除和频分量后, 输出的差频电压为

$$v_f(t) = V_{fm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_f t \quad (5)$$

由式(5)可见, 混频前后调制参数 Ω 和 m_a 都没有变化, 即包络信号的频率没变, 包络幅值与乘法器增益有关, 按某一比例线性变化。这样, 信号经检波对数放大器后, 就可以得到相应信号的包络。

通过调节混频器本振信号的频率即可完成对选通信号中心频率的选择, 通过改变混频器后的低通滤波器的带宽就可改变选通频带的带宽, 即混频技术的应用相当于实现了带宽可选、中心频率可调的带通滤波器。混频后低通滤波与直接高频窄带滤波对非选通频带的干扰具有同样的抑制能力。

经过仿真计算, 混频滤波后得到的信号与直接滤波的结果相比, 峰值衰减了一半, 峰值出现的时刻, 即相位相同。因此, 通过混频技术得到的信号保留了原局部放电信号的特高频分量的峰值与相位特征。

信号调理单元的组成框图见图8。其中1为限幅器, 2为前置放大器, 3为混频器, 4为频率综合器, 5为中频放大器, 6为低通滤波器, 7为检波对数放大器。

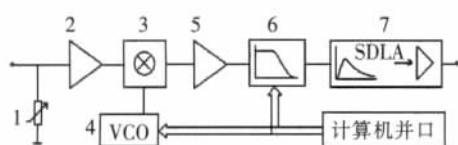


图8 信号调理单元组成框图

考虑到抗干扰等因素, 该系统只接收中心频率在 400~800 MHz 之间的放电信号, 带宽为 10、20、40、80 MHz 可选。经信号调理单元的混频、滤波处理后, 可降频为 0~5 MHz、0~10 MHz、0~20 MHz 或 0~40 MHz, 这样使用百兆采集卡就可记录放电信号。该系统的高速数据采集卡选用了 NI 公司的

DAQScope5112 数字示波采集卡, 系统通过计算机并口进行控制。

3 模式识别单元

结合自适应遗传算法(AGA)的全局收敛特性和 BP 算法的局部收敛特性各自的优点, 该系统构造了 AGA-BP 混合算法作为神经网络的学习算法: 首先利用 AGA 训练神经网络, 使其定位于权空间全局最优或近似全局最优的附近, 然后采用 BP 算法进行局部搜索, 使其迅速地收敛到最终的优化值。

AGA 的作用是宏观搜索, 处理的是大范围搜索问题, 而 BP 算法中线性搜索过程的作用是极值局部搜索, 即微观搜索, 处理的是小范围搜索和搜索加速问题^[4]。混合遗传算法的基本构成框架见图9。

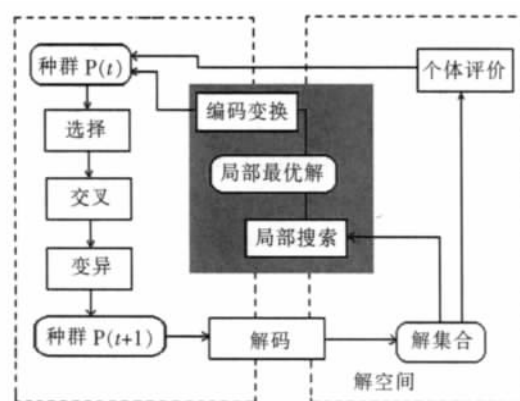


图9 混合遗传算法构成示意图

最后, 将算法应用于“异或”问题, 检验 AGA-BP 神经网络的有效性。

采用 AGA-BP 神经网络对变压器和 GIS 典型缺陷引起的超高频局部放电的 5 种放电模式进行了识别试验。试验结果表明, AGA-BP 神经网络既解决了 BP 神经网络对初始权值敏感和容易局部收敛的问题, 又提高了 AGA 神经网络的收敛速度、稳定性和求解质量, 具有较高的识别率和较强的推广能力。

4 系统控制、显示单元

该系统通过软件实时控制系统的各单元正常运行, 实现了对局部放电的测量及分析等一系列功能, 主要包括以下内容。

(1) 监测显示: 实现了对局部放电的实时自动监测, 并在主界面上显示监测数据图形;

(2) 参数设置: 用户可以进行参数设置, 包括采集参数设置、中心频率参数设置、滤波器参数设置等;

(3) 数据分析及报警、数据保存及历史查询: 软件对采集数据进行分析处理, 提供多种谱图格式, 对放电信号进行最大放电幅值、平均放电量、放电次数的测量计算, 提取局部放电信号特征量, 进行模式识别, 并在数据分析界面显示分析结果。若设备发生异

常,则软件可通过短信、E-mail 等自动报警;监测系统软件可实现对于测量的局部放电的实时原始数据保存、数据分析处理结果的保存,并可进行历史的日、月、年纪录查询;

(4)基于 IP 的控制、采集、显示及文件管理功能;任何连在局域网上的有合法 IP 地址和访问下位机数据库权限的计算机都可以安装客户端软件,通过局域网访问下位机,实时了解设备局部放电的状况,察看历史数据,并可以接收保存采集的数据文件,能显示局放的三维谱图,最大放电量、平均放电量和放电次数谱图。可以通过已经建立的故障指纹库识别放电类型。可以实现多台上位机同时访问一台下位机,也可以一台上位机访问多台下位机。

5 局部放电检测试验

该检测系统可用于多种电力设备,笔者仅以变压器和 GIS 典型缺陷局部放电试验为例说明该测量系统的性能。

5.1 变压器局部放电测量试验

用一油浸式高压试验变压器的铁心和线圈模拟单相变压器的铁芯和线圈。试验时,将饼式绕组线圈靠近高压引线的部分绝缘层剥去,模拟绝缘内部空隙缺陷。

测量时,设置系统的中心频率为 620 MHz,带宽为 80 MHz,相位开窗为 4 000 个,测量工频周期数为 100。

在起始放电时,局放脉冲总是先出现在电压幅值绝对值上升部位的相位上,靠近 90° 和 270° 处,随着电压的升高,出现放电脉冲的相位范围逐渐扩展,甚至超过 0° 和 180° ,但 90° 和 270° 之后的一段相位内放电极少。图 10 为 25 kV 下放电所对应的 $n-q-\phi$ 三维谱图。

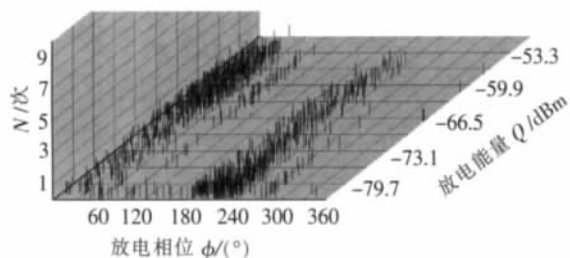


图 10 变压器绕组放电的 $n-q-\phi$ 图

能量分布见图 11。在整个 400~800 MHz 频段范围内均有较强的能量分布,且远大于背景信号(图中阴影部分为背景信号能量分布),见图 11 中 A 线。

利用 AGA-BP 人工神经网络模式识别的结果表明,该放电为内部空隙放电,识别结果见图 12。将网络的输出层的理想输出设为 1,并对相应的输出进行归一化处理,其中 1 为悬浮电位型放电,2 为纸或纸板内部空隙型放电,3 为油-屏障型放电,4 为油中气泡型放电,5 为纸或纸板沿面型放电。

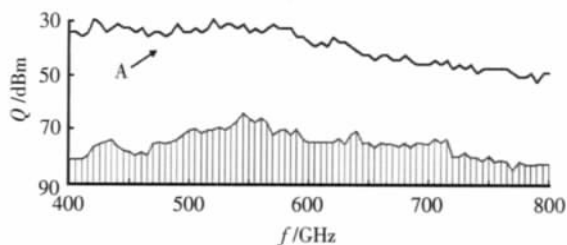


图 11 能量分布图

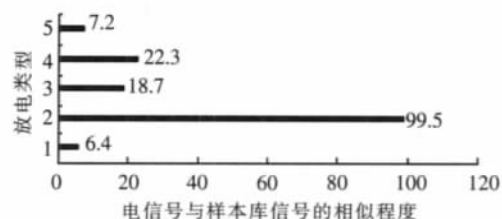


图 12 AGA-BP 神经网络的模式识别结果

同时使用脉冲电流法对测量系统进行标定,结果表明,该测量系统可测量到视在放电量为 3 pC 的局部放电。

5.2 GIS 局部放电测量试验

试品是一段 220 kV GIS 单相母线段,在筒壁内侧径向安装一枚长为 60 mm、其尖端处等效半径为 $130 \mu\text{m}$ 钢针来模拟 GIS 筒壁上的金属尖刺缺陷。

设置系统的中心频率为 620 MHz,带宽为 80 MHz,相位开窗为 4 000 个,测量工频周期数为 40。该模型产生的局部放电主要集中在电源的正峰值左右, $n-q-\phi$ 图见图 13。

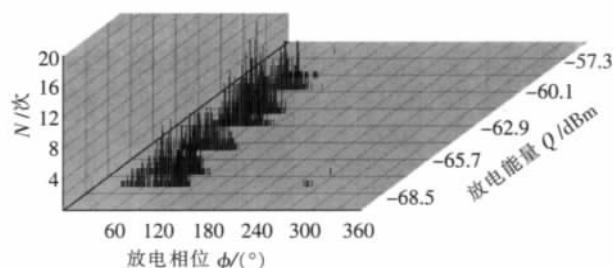


图 13 接地体金属尖刺缺陷模型的 $n-q-\phi$ 谱图

由图 13 可知,局部放电主要集中在电源电压的正峰值左右,其信号幅值较高;而负峰值处的放电重复率较低,且信号幅值要小的多。

该模型产生的局部放电能量主要分布在 400~550 MHz 之间,见图 14 中 A 线。

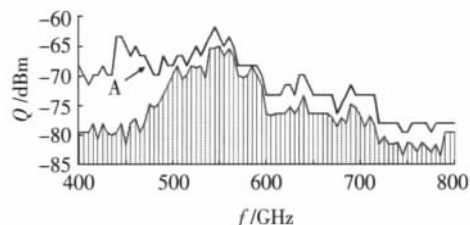
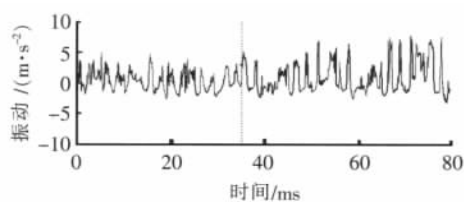


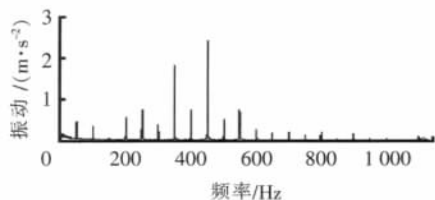
图 14 接地体金属尖刺缺陷模型的能量分布图

利用 AGA-BP 人工神经网络模式识别的结果表明,该放电为接地体上尖刺放电,识别结果见图 15。

其中 1 代表噪声,2 代表绝缘 (下转第 96 页)



(a) 直流偏磁之后振动加速度时域波形



(b) 直流偏磁之后振动加速度频谱分析

图 10 直流偏磁之后测点 1 处振动时域及频谱分析

压器的安全运行有着很大的威胁,需要密切注意这一过程中变压器的振动和噪声变化情况,以监测变压器本体是否出现问题。笔者提出一种判断电力变压器振动和噪声状态受直流偏磁影响程度的方法:

选定测点,考虑负荷对于振动状态的影响,记录无直流偏磁时的振动幅值在不同负荷水平时振动程度;在已记录的直流偏磁对于振动和噪声影响程度的基础上,当再次出现直流偏磁时,考察直线斜率是否在合理的范围内;考察直流偏磁前后在相同的负荷水平条件下,振动时域波形和频谱分析的结果是否一致,如幅值的变化范围是否在 20% 的范围内,500~1400 Hz 范围内的高次谐波是否大量出现^[3]。

如出现以上的问题,则怀疑变压器内部结构可能出现问题。

3 结论

(1) 变压器正常运行时,振动与噪声波形清晰稳定且有着较为明显的周期性,为电力变压器的故障诊断和状态维修提供了有力的数据基础和长期判断依据。

(上接第 92 页)

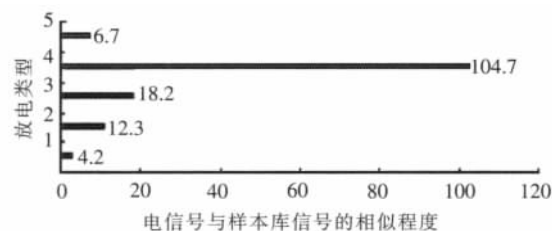


图 15 AGA-BP 神经网络的模式识别结果

子污秽缺陷放电,3 代表高压导体尖刺放电,4 代表接地体上尖刺放电,5 代表自由金属微粒放电。

同时使用脉冲电流法对测量系统进行标定,结果表明,该测量系统可测量到视在放电量为 2 pC 的局部放电。

6 结语

该检测系统中心频率、带宽可调,可选择局部放

(2) 直流偏磁前后,3 个测点的时域波形和频谱具有相似的变化趋势。没有直流偏磁时,油箱壁振动的时域波形清晰稳定且表现出了非常明显的周期性,波形相对规律,上下对称性较好,而直流偏磁出现时,波形变得杂乱,上下波形出现了明显的不对称,3 个测点的振动峰值有明显增长。

(3) 从幅值看,随着流入交流变压器中性点的直流偏磁电流的增加,交流变压器的振动呈线性增加趋势。此外,噪声与振动基本同步变化,噪声水平也是反映变压器运行状况的指标之一。

(4) 变压器正常运行时,箱体表面水平方向振动频率以 100 Hz 为基频,在 200~500 Hz 范围内所占权重最大,1000 Hz 以上基本上可忽略不计。直流偏磁时,出现 500 Hz~1.4 kHz 频率范围内的高次谐波。

(5) 由于变压器结构复杂,目前的监测侧重于对变化量的监测,实现故障程度分析或者故障定位上需要进一步的研究和探讨。

参考文献:

- [1] 钟连宏, 陆培均. 直流感地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003(8): 12-14.
- [2] 蒯狄正. 直流偏磁对变压器影响的研究 [J]. 江苏电机工程, 2004(5): 1-4.
- [3] WEISER B, PFUTZNER H. Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores[J]. IEEE Trans. on Mag., 2000, 36(5): 3 759-3 777.
- [4] 董志刚. 变压器的噪声 2 [J]. 变压器, 1995(11): 27-31.
- [5] 王世山, 汲胜昌, 李彦明. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器, 2002(9): 73-76.
- [6] 汲胜昌, 刘味果, 李彦明, 等. 振动法用于在线监测电力变压器绕组及铁心状况的可行性研究 [J]. 高压电器, 2001, 37(5): 4-7.
- [7] 曹林. 直流偏磁电流对电力变压器励磁特性影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.

电信号强、干扰小的某一高频窄带信号,因而系统的抗干扰能力强,灵敏度高;采用统计方法,可分析 100 个工频周期信号后给出结果,局部放电信号信息更丰富,并可减少随机干扰的影响,可用于变压器、GIS 等电力设备局部放电在线监测。

参考文献:

- [1] 陈小娟, 袁乃昌. 平面螺旋天线的设计与实现 [J]. 雷达与对抗, 2004(4): 31-33.
- [2] 郭景丽, 贺秀莲, 刘其中. 有限圆盘地面上套简单极子天线 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2004, 31(3): 417-421.
- [3] 谈文心, 邓建国. 高频电子线路 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [4] 王国利, 郑毅, 沈嵩, 等. AGA-BP 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): 6-9.