

基于 UHF 技术的风电场油浸式主变压器 局部放电监测与分析

任 岩^{1,2,3}, 万 元⁴, 胡 边⁴, 龚传利³

(1. 中国长江三峡集团公司, 宜昌 610041; 2. 华北水利水电大学 水电学院, 郑州 450046;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 五凌电力有限公司, 长沙 410004)

摘要: 为了避开风电场主变压器局部放电在线监测中存在的多种形式噪声干扰, 引入了基于 UHF 技术的风电场油浸式变压器局部放电监测与分析方法, 设计了 UHF 局部放电传感器及配套的硬件降频电路, 仿真验证了传感器及降频电路的有效性, 建立了风电场主变压器超高频局部放电监测与分析模型, 研制了硬件构建方案及软件的功能框架, 并利用现场实测信号对该方法进行验证. 工业实践证明, UHF 技术能达到避开风电场现场电磁干扰、可靠获取真实局部放电脉冲、有效诊断变压器内部故障的目的.

关键词: 风电场; 油浸式变压器; 局部放电; 超高频; 降频电路
中图分类号: TM 855 **文献标志码:** A

Partial Discharge Monitoring and Analysis on the Oil Immersed Main Transformer in Wind Farms Based on UHF Technology

REN Yan^{1,2,3}, WAN Yuan², HU Bian², GONG Chuanli³

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang 610041, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
3. China Water Conservancy and Hydropower Research Institute, Beijing 100038, China;
4. Wuling Power Corporation LTD., Changsha 410004, China)

Abstract: To solve the problem of multiple noises existing in wind farms which affect the partial discharge (PD) online monitoring results of oil immersed transformers, a partial discharge online monitoring and analysis method for the transformers in wind farms based on the ultra high frequency (UHF) technology was put forward and the design of the UHF PD sensor and frequency reduction circuit of its supporting hardware was made. The UHF partial discharge monitoring and analysis model for the transformers, including their hardware framework and software construction scheme was built. The method was verified by the measured signals in a certain wind farm, which proves that the method proposed can effectively avoid electromagnetic interference, obtain reliable real partial discharge pulse, and realize the fault diagnosis for transformers in wind farms.

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: 郑州市科技攻关计划项目(X2013G0432); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(201316)

第一作者: 任 岩(1979-), 女, 副教授. 研究方向: 新能源故障诊断. E-mail: ryanjya@126.com

Keywords: *wind farm; oil immersed transformer; partial discharge; ultra high frequency; frequency reduction circuit*

局部放电是变压器绝缘劣化的重要标志,实时监测变压器内部的局部放电,是预防事故的重要标志^[1].目前,变压器的局部放电监测方法有很多种,包括脉冲电流法、超声波法及油中气体分析法^[2].其中脉冲电流法、超声波法的测量频段比较低(一般低于50 MHz),外界干扰容易耦合到测量回路,直接导致测量结果不准确.油中气体分析法主要通过检测油中气体来分析变压器内部是否发生放电,该方法检测局部放电时灵敏度低,且具有较大的滞后性^[1-2].

电力设备内部发生局部放电时,会向四周衍射UHF(ultra high frequency,超高频)电磁波信号,通过检测空间中UHF电磁波,便能检测电力设备内部是否发生局部放电^[1].局部放电衍射的UHF电磁波频率很高(>500 MHz)^[1],而背景噪声和空气中电晕干扰的频率通常小于400 MHz^[2].因此,UHF检测能避开电力工业现场存在的干扰信号,确保局部放电监测的可靠性.

文献[3-4]将UHF技术应用到电力GIS局部放电的检测中,并采用混频技术实现降频,取得较好的效果.文献[5-6]分别将UHF技术应用至水电站500 kV变压器局部放电的检测中,有效地监测出变压器内部针板放电、内部放电.目前,风电场变压器是连接风电机组与电网的枢纽设备,一旦故障将导致风电场无法向电网馈电,而利用UHF技术监测风电场主变压器局部放电方面,尚未见相应报道^[7-10].

鉴于此,引入UHF监测方法实施风电场主变压器局部放电在线监测与分析,设计了UHF检测天线及配套的硬件降频电路,利用仿真电路、实测信号验证了传感器及检波降频电路的有效性.在此基础上,构建了风电场主变压器局部放电综合分析模型及软件的功能框架,给出了模型在现场的应用实例.

1 UHF局部放电传感器设计

UHF天线能在三维空间中感应高频电磁波,UHF天线有很多种,包括锥形天线、矩形天线、阿基米德螺旋天线等,其中阿基米德螺旋天线由于其非频变特性强、体积小而广泛应用于电力工业现场^[1,8].

为有效避开现场的电磁干扰信号,选取测量带宽为500~1 500 MHz的阿基米德螺旋天线作为风电场主变压器的超高频局部放电测量传感器.确定阿基米德螺旋天线的测量带宽后,需结合变压器的结构,计算阿基米德螺旋天线的结构参数,具体参数包括:螺旋外径、螺旋内径、螺旋增长率、螺旋宽度、螺旋圈数等^[1,8].假定天线检测的下限工作频率为 $f_{\min}$,上限工作频率为 $f_{\max}$,真空中的光速为 c ,上述计算方法如下所示:

a. 螺旋外径 D 取决于下限工作频率 $f_{\min}$ 对应的波长 $\lambda_{\max}$,波长 $\lambda_{\max}$ 满足

$$\lambda_{\max} = c/f_{\min} \quad (1)$$

螺旋外径 D 要求符合

$$D \geq 1.25\lambda_{\max}/\pi \quad (2)$$

b. 螺旋内径 $2r_0$ 是馈电点间的距离,对天线的阻抗匹配和上限工作频率影响较大.一般应取 $2r_0 < \lambda_{\min}/4$, $\lambda_{\min}$ 是上限工作频率 $f_{\max}$ 为对应的波长, $\lambda_{\min}$ 满足

$$\lambda_{\min} = c/f_{\max} \quad (3)$$

螺旋内径 $2r_0$ 应符合

$$2r_0 < \lambda_{\min}/4 \quad (4)$$

馈电点之间的距离 $2r_0$ 越小则进入馈电点的入射波越接近,故取 r_0 与两条螺旋线间的距离相等.

c. 在螺旋外径 D 一定的情况下,螺旋增长率 a_0 直接决定了螺旋圈数 N .螺旋总长度大,终端效应小,波段特性好.但若 a_0 太小,圈数太多,传输损耗就会加大.综合考虑终端效应和传输损耗,局部放电UHF检测一般取螺旋圈数 $N=10$,即螺旋双臂总圈数为10,单臂螺旋圈数为 $N/2=5$.螺旋宽度大,其输入阻抗就低.当螺旋宽度与间隙宽度相同时,这种结构被称为自补结构,它有利于实现宽频带阻抗匹配.由以上设计参数可知,螺旋外径 D 、螺旋圈数 N 已确定,螺旋宽度、螺旋间距离相等,均为 l .馈电点 A, B 之间的距离为 $2r_0$,并且 $l=r_0$,故可得

$$r_0 + Nr_0 + Nr_0 = \frac{D}{2} \quad (5)$$

式中: r_0 为馈电点 A, B 到原点 O 之间的距离; Nr_0 为螺旋总宽度以及间隙总距离,三者之和即为螺旋外半径 $D/2$.

由式(5)可得螺旋宽度公式为

$$r_0 = \frac{D}{2(1+2N)} \quad (6)$$

代入螺线外径 D 、螺线圈数 N , 可计算得 r_0 . 根据上述螺线极坐标方程, 得到螺线最大极径处的坐标方程为

$$\frac{D}{2} = r_0 + a_0 \frac{N}{2} 2\pi \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得螺旋增长率 a_0 为

$$a_0 = 2r_0/\pi \quad (8)$$

代入 r_0 , 可得 a_0 .

根据上述设计方案, 设计的基于阿基米德天线的超高频局部放电传感器示意图如图1所示. 为了确保测量的灵敏度, 该传感器主要安装在变压器人孔门的内壁, 通过导线将信号引出.

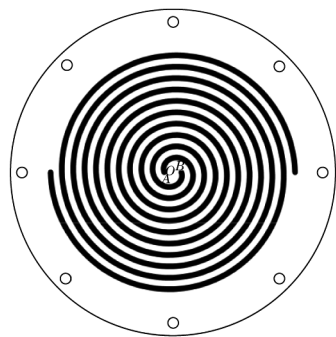


图1 基于阿基米德天线的超高频局部放电传感器

Fig.1 Ultra high frequency partial discharge sensor based on Archimedes antenna

2 硬件降频电路设计

2.1 基本原理

本文设计的 UHF 天线接收的电磁波信号频段在 500~1 500 MHz 间, 频率非常高. 根据香农采样定律, 为了保证信号被不失真地采集到, 检测系统的信号采样频率必须大于 3 GHz, 这样高的采样频率, 实现起来难度非常大. 因此, 不经合适的信号处理手段, 直接对阿基米德天线检测的原始超高频局部放电信号进行处理, 难度非常大, 几乎无法实现^[8].

局部放电监测一般最关心的是放电脉冲的峰值及其在 50 Hz 工频信号上的相位, 对放电波形具体细节关注度不大. 因此, 为了降低监测难度, 本文采用检波电路对信号进行降频处理, 在保证局部放电脉冲幅值、相位基础上, 降低采样频率.

本文设计的基于二极管的检波电路原理如图2(a)所示. 检波电路的输出信号直接反映超高频

调幅波包络变化规律, 由输入回路、检波二极管 D 和 RC 低通滤波器组成. 图中: R_d 为二极管导通电阻, R 为负载电阻, $R_d \ll R$; C 是负载电容. 显然充电时间常数 $\tau_c = R_d C$ 较小, 电容 C 上充电很快, 能迅速地建立电压, 而放电时间常数 $\tau_d = RC$ 一般很大, 远大于超高频局部放电信号的周期.

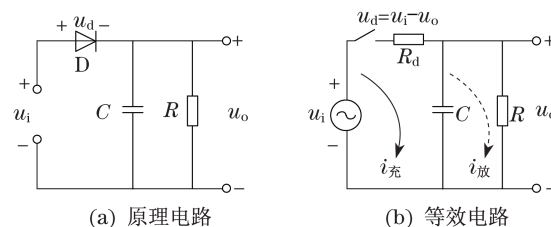


图2 检波电路原理及等效电路

Fig.2 Principle of the detection circuit and its equivalent circuit

检波电路等效电路如图2(b)所示, u_i 为输入电压, u_o 为输出电压, 设二极管 D 两端之间的电压 $u_d = u_i - u_o$. 当 $u_d > 0$ 时二极管正向导通, 超高频输入信号 u_i 对电容 C 充电; 当 u_d 小于 0 时, 二极管反向截止, 电容 C 向负载电阻 R 放电. 由于放电的时间常数 $\tau_d = RC$ 远远大于超高频局部放电信号的周期, 当电容 C 上的电压下降并不多时, 高频放电脉冲的第二个正半周电压使二极管再次导通. 因此, 可以选择合适的参数, 让 τ_c 足够小, 充电时间很短; 而 τ_d 足够大, 放电时间很长 ($\tau_c \ll \tau_d$), 就可使电容 C 两端的电压幅度与输入超高频信号 u_i 的幅度非常接近, 得到检波信号, 达到降低频率的目的.

2.2 仿真验证

采用 Matlab 对检波电路进行仿真, 仿真电路如图3所示.

由于超高频局部放电时间持续时间很短, 大约为几十到几百 ns, 因此, 检波电路的充电时间应比较小, 选取充电时间常数 $\tau_c = 0.1 \text{ ns} \ll 1 \text{ ns}$. 而为了防止信号被遗漏, 选取放电时间常数 τ_d 应适宜, 图3中, 二极管 D 的导通电阻 R_d 选取为 100 Ω , 则电容 C 由式(9)确定.

$$C = \frac{\tau_c}{R_d} \quad (9)$$

式中: 充电时间常数 $\tau_c = 1 \times 10^{-10} \text{ s}$; 二极管导通电阻 $R_d = 100 \Omega$; 代入上式得负载电容 $C = 1 \times 10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ pF}$.

同理, 负载电阻 R 由式(10)确定.

$$R = \frac{\tau_d}{C} \quad (10)$$

式中:放电时间常数 $\tau_d = 0.8 \times 10^{-6} \text{ s}$; 负载电容 $C = 1 \times 10^{-12} \text{ F}$; 代入上式得负载电阻 $R = 0.8 \times 10^6 \Omega$.

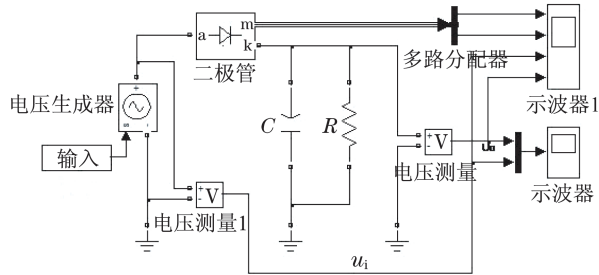


图3 检波电路的 Matlab 仿真模型

Fig.3 Matlab simulation model of the detection circuit

现场检测到的超高频局部放电脉冲信号可用指数振荡模型来模拟,理论上可以用以下两种模型表示^[8]:

$$f_1(t) = A_1 e^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (11)$$

$$f_2(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (12)$$

式中: A_1, A_2 为信号幅值; τ 为脉冲衰减系数; f_c 为脉冲振荡频率; t 为时间. 式(11)为单指数衰减振荡脉冲, 式(12)为双指数衰减振荡脉冲.

由式(11)产生 3 个双指数仿真局部放电脉冲, 具体参数见表 1, 其中 t_0 为脉冲相对 0 时刻出现的时间, 单个脉冲持续时间约 $0.5 \mu\text{s}$. 为了更接近实测信号, 在信号中叠加标准差为 0.005 的白噪声, 得到的混合信号如图 4(a) 所示.

表1 双指数局部放电脉冲仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of partial discharge pulse with double exponent

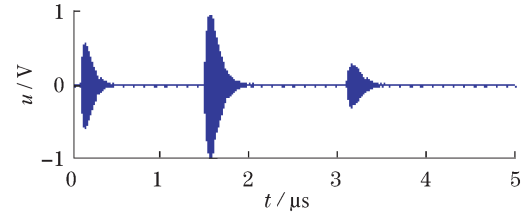
脉冲编号	A_2/V	t_0/s	f_c/MHz	τ/ns
1	3	0.1	300	80
2	5	1.5	400	100
3	1.5	3.1	400	100

从图 4 可知, 检波电路能有效提取超高频局部放电信号, 并保持经检波后脉冲的正向峰值出现的时间不变. 同时, 不同的放电时间常数对是否会出现波形叠加有一定影响, 必须合理地设计检波电路的放电时间常数, 也就是合理地设计电容 C 的大小.

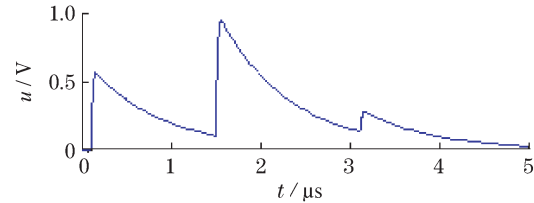
2.3 实测信号验证

将设计的检波电路应用到某风电场主变压器, 现场检测到的检波信号如图 5 所示.

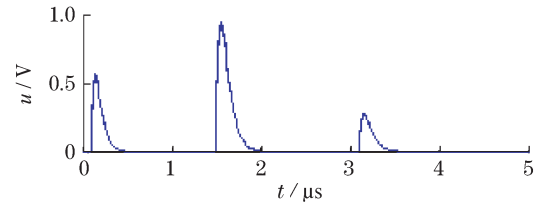
由于现场电磁噪声环境比较复杂, 超高频局部放电信号中混杂了许多背景噪声, 导致检波后的信号没有仿真结果那么有规则, 但有效降低了信号频率, 且基本保留了放电脉冲的幅值、相位等重要信息, 能适合于风电场变压器超高频局部放电在线监测.



(a) 原始局放脉冲



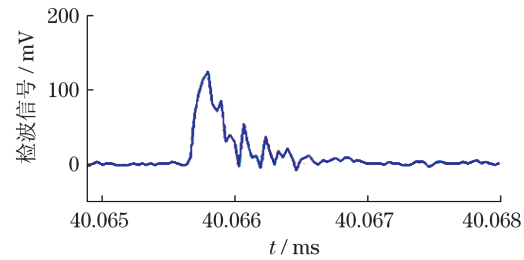
(b) 检波后局放脉冲 $\tau_d = 0.80 \mu\text{s}$



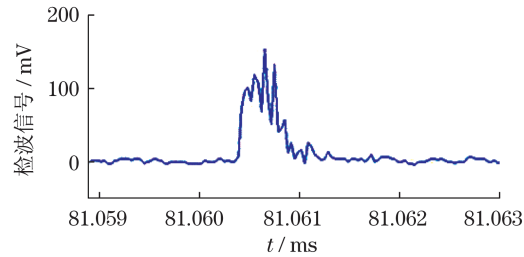
(c) 检波后局放脉冲 $\tau_d = 0.05 \mu\text{s}$

图4 仿真数据的检波效果

Fig.4 Detection effect of the simulation data



(a) 220 kV变压器



(b) 110 kV变压器

图5 现场放电检波输出

Fig.5 Detection output of the field discharge signal

3 变压器超高频局部放电监测与分析模型

3.1 硬件设计

风电场主变压器局部放电监测与分析模型的硬件设计如图 6 所示(见下页).

综合采集风电场变压器铁芯接地电流、油中气

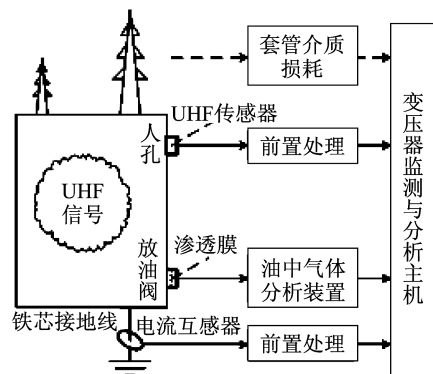


图6 风电场主变压器局部放电监测与分析硬件

Fig.6 Hardware of partial discharge monitoring and analysis of the main transformer in wind farm

体、超高频局部放电信号,判断变压器内部是否存在局部放电.其中超高频局部放电传感器安装在人孔门内,前置处理采用检波电路.该模型以超高频局部放电监测为核心,综合采集油中色谱、铁芯接地电流为辅助监测与诊断手段,可提高诊断的准确性.

3.2 软件功能框架

模型软件功能设计如图7所示.

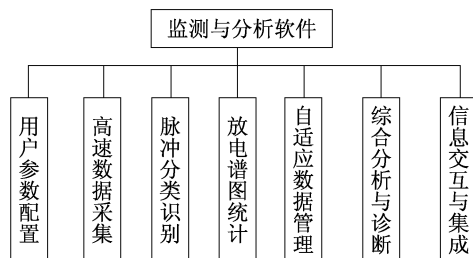


图7 风电场主变压器局部放电监测与分析软件功能

Fig.7 Function of the partial discharge monitoring and analysis software for the main transformer in wind farm

由图7可知,软件包括高速数据采集、数据管理、脉冲分析、放电谱图统计、综合分析诊断、信息交互与集成多个模型.其中放电谱图统计主要是计算变压器内部放电的二维谱图、三维谱图等,为变压器故障诊断及定位提供依据.综合分析诊断主要是综合油中色谱数据、铁芯接地电流数据等,联合监测与分析变压器内部运行状况.

4 实测数据的监测与分析

本文设计的系统已应用到云南、湖南两地共6个风电场,共有效检测出两次风电场主变压器内部放电故障.

案例1 云南某风电场主变压器低压侧电压为

3.5 kV,高压侧绕组为220 kV,变压器容量为100 MVA,投产时间为2010年,该变压器安装了一套本文设计局部放电在线监测系统.2014年12月起,系统显示变压器放电趋势逐步增加,初步诊断该变压器内部存在放电,导出该变压器放电谱图如图8所示,其中,图8(a)~(c)依次对应最大放电量-相位谱图、放电次数-相位谱图及放电次数-放电量谱图.

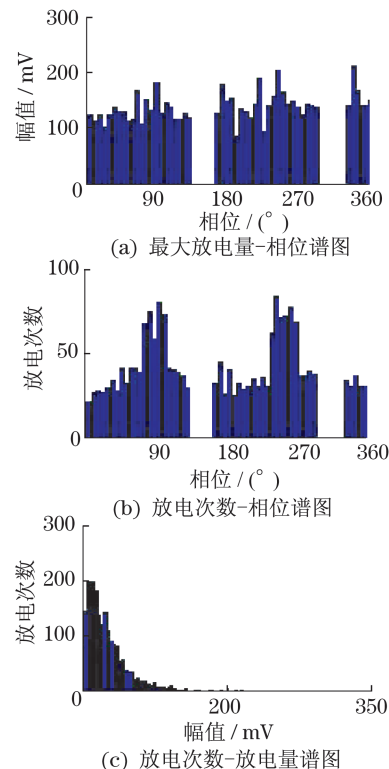


图8 云南某风电场主变压器二维放电谱图

Fig.8 Two dimensional phase-resolved partial discharge spectra of a main transformer of a wind farm in Yunnan

由图8可知,该风电场主变压器放电幅值在工频相位上的分布比较均匀,主要发生在工频信号的第1,3象限,并少量延伸到2,4象限,其放电次数-放电量谱图呈2次抛物线形状.利用文献[1,8]建立的专家诊断知识库对放电谱图进行识别,确定为油中含有微粒放电引起.该风电场组织抽取油样进行颗粒度检测,发现油中颗粒含量严重超标.电厂组织对油进行硅胶滤油处理,处理后局部放电数据正常^[11-12].

案例2 湖南某风电场油浸式变压器低压侧电压为3.5 kV,高压侧绕组为110 kV,变压器容量为70 MVA,投产时间为2012年.该变压器安装了一套本文设计局部放电在线监测系统,2015年8月起,系统显示变压器放电趋势逐步增加,可诊断该变压器内部存在放电,导出该变压器三维放电谱图如图9所示.其中,图9(a)~(c)依次对应最大放电量-相位谱

图、放电次数-相位谱图及放电次数-放电量谱图。

由图9可知,该风电场主变压器放电主要发生在工频信号的第1,3象限,且工频相位1,3象限上的放电基本对称,其放电次数-放电量谱图呈指数衰减形状。利用文献[1,8]建立的专家诊断知识库对放电谱图进行识别,确定放电为内部放电,主要原因是由于油中气体含量过高所致。电厂组织对油进行真空脱气处理,处理后局部放电数据正常。

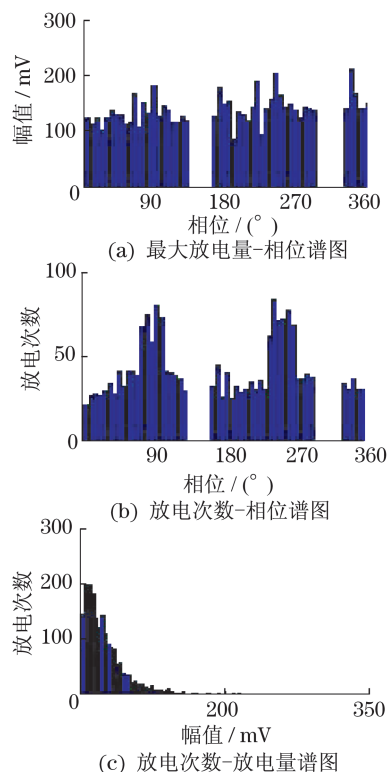


图9 湖南某风电场主变压器二维放电谱图

Fig.9 Two dimensional phase-resolved partial discharge spectra of a main transformer of a wind farm in Hunan

从上述的案例可知,本文设计的风电场变压器监测与分析模型是有效的。

风电场主变压器是连接风电机组与电网的关键设备,一旦出现故障,整个风电场都无法向电网馈电。对于50 MW的风电场,年发电量约1亿kW·h,平均折合到日发电量约30万kW·h,在有效发现变压器局部放电后实施检修,较之变压器出现严重故障后实施检修,工期大约可节约半个月。因此,采用本文设计的基于UHF技术的风电场主变压器局部放电监测与分析系统,可在变压器故障出现时减少电量损失约500万kW·h,还不包括额外增加的检修费用,而一套风电场主变压器局部放电监测与分析系统市场推广成本仅十余万元,并且系统传感器安装在主变压器的人孔门上,丝毫不影响变压器

的正常稳定运行。综上,从技术成本上讲,系统的研制能为风电场带来较好的安全、经济效益。

5 结束语

风电场油浸式主变压器内部局部放电故障是引发变压器突发事故的重要根源,有效地监测变压器内部局部放电活动,是预防变压器重大事故的重要手段。本文引入了基于UHF技术的风电场油浸式主变压器局部放电监测与分析模型,利用设计的超高频传感器及检波降频电路,有效地避开了现场存在的强电磁干扰,实现了变压器内部局部放电信号的检测。同时,设计了模型的硬件及软件实现方案,现场的检测结果表明,该模型能达到有效诊断变压器内部故障的目的。

致谢 感谢三峡新能源公司对本文提供资金支持。

参考文献:

- [1] 王国利. 油浸式电力变压器局部放电特高频检测技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2003:65-68.
- [2] 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.
- [3] 刘君华,姚明,黄成军,等. 采用声电联合法的GIS局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(10):2458-2463.
- [4] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于UHF法的GIS局部放电测量与分析[J]. 电测与仪表,2012,49(4):5-8.
- [5] 欧阳旭东,陈杰华,林春耀,等. 基于超高频法的电力变压器局部放电检测技术的研究与应用[J]. 变压器,2007,44(2):38-42.
- [6] LIU M J, LI Z H. An online UHF PD monitoring system for power transformer and its applications [C]// Proceedings of 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: IEEE, 2010.
- [7] 童超,郭鹏. 基于特征选择和BP神经网络的风电机组故障分类监测研究[J]. 动力工程学报,2014,34(4):313-317.
- [8] 刘明军. 变压器局放超高频监测与基于知识的分析方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [9] 李辰奇,许昌,杨建川,等. 基于CFD的复杂地形风能分布研究[J]. 上海理工大学学报,2013,35(3):270-274.
- [10] 靳忠伟,陈康民,闫伟,等. 基于支持向量机的中长期电力负荷预测研究与应用[J]. 上海理工大学学报,2008,30(2):129-132.
- [11] 胡边,张宏治,魏宇明. 水电厂汽轮机油颗粒度的在线测量装置研究[J]. 水利水电技术,2014,45(12):82-85,90.
- [12] 胡边,张宏治,魏宇明. 水电厂汽轮机油颗粒度的超声衰减谱法研究[J]. 人民长江,2015,46(3):94-98.

(编辑:丁红艺)