

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.033

基于自动时差分析的特高频局部放电检测时域抗干扰技术

冯新岩¹, 李沐², 蔺晓琨³, 张海杰¹, 臧奕茗⁴

(1. 国网山东省电力公司检修公司, 济南 250018; 2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 济南 250000; 3. 国网山东省电力公司建设公司, 济南 250000; 4. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 外部环境干扰是造成特高频在线监测系统发出虚警和漏警等错误报警信息的主要原因, 制约着特高频局放检测技术的发展。针对目前特高频局部放电带电检测过程中外部放电干扰信号识别难度大、识别手段复杂等问题, 文中提出了基于自动时差分析的时域抗干扰技术。利用检测传感器及背景传感器检测到的信号的时间差, 通过参数设置和逻辑判断, 分析其是否为干扰信号并进行滤除。在126 kV GIS试品模型上进行了验证试验, 结果表明, 该方法可以有效地自动滤除外部放电干扰信号, 解决了特高频局放检测中抗干扰这一核心难题, 具有良好的应用价值和重要的推广价值。

关键词: 局部放电; 特高频检测技术; 抗干扰; 时差分析

Time-domain Anti-interference Technology for UHF PD Detection Based on Automatic Time Difference Analysis

FENG Xinyan¹, LI Mu², MAN Xiaokun³, ZHANG Haijie¹, ZANG Yiming⁴

(1. State Grid Shandong Maintenance Company, Jinan 250018, China; 2. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Construction Company, Jinan 250000, China; 4. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Environmental interference is the major factor responsible for false alarm and missing alarm of the UHF online monitoring system, which restricts the development of UHF (partial discharge)PD detection. In order to solve the problem that external discharge interference signal is difficult to identify and the identification means is complex in current UHF PD live detection process, this paper presents a time-domain anti-interference technology based on automatic time difference analysis. The time difference between the signals of detecting sensor and background noise sensor is used, combining with parameters setting and judgment logic, to determine and filter the interference signal. Test is conducted on the 126 kV GIS model to verify this technology, and the result indicates that this technology is able to filter interference signal automatically, thus the anti-interference problem in UHF PD Detection is solved. This anti-interference technology is worthy of application and promotion.

Key words: partial discharge; ultra-high frequency detection; anti-interference; time difference analysis

0 引言

局部放电检测是电力设备绝缘系统结构可靠性检测的重要技术手段。特高频局部放电检测技术由于其灵敏度高、检测范围大、能实现定位等优点, 近年来得到了广泛应用, 从GIS设备, 到变压器、开关

柜、电缆终端等, 均有成功检测出缺陷的案例^[1-6]。加强特高频局部放电检测技术推广应用, 对保证电力系统安全运行具有重要意义。

然而, 特高频检测技术在实践中暴露出了诸多问题, 特高频在线监测系统经常发出虚警和漏警等错误报警信息^[7-9], 严重扰乱了运维单位的正常工作

秩序、降低了在线监测系统可靠性,这阻碍了特高频检测技术的进一步发展。其原因在于当前检测装置的干扰辨识能力和抗干扰水平较低,不能完全适应变电站现场复杂的干扰环境。因此,有必要研究特高频检测抗干扰技术,以提高在线监测的可靠性和稳定性。

为了研究变电站现场特高频干扰信号的抗干扰措施、提高现场局部放电检测的准确性和可靠性,笔者在40多座500 kV变电站使用特高频局放分析仪对干扰信号进行了检测,并使用带宽1 GHz、采样率4 GHz的示波器,对具有放电特征的干扰信号采用了平分面法进行定位。检测结果总结如下:

1)空气中的电晕放电,不会对特高频检测产生干扰。即便阴暗天气下可见电火花的强电晕放电,经过实际检测,也未检测到特高频干扰信号。

2)无线电干扰信号,如GSM制式的手机干扰信号、对讲机干扰信号,这类信号出现随机性强,信号覆盖范围大;但这类信号波形特征与放电信号差异明显,通过波形便可简单识别。特高频在线监测装置也不会对该信号进行报警。

3)导线上的间隔棒、绝缘子串上的金具接触不良放电,以及线路架空接地线间隙部位放电,为最常见的空气中悬浮放电干扰。其信号频谱范围宽,可达1.5 GHz以上;干扰信号覆盖范围较大,覆盖半径可达100 m以上;但离开信号源50 m以上,1 GHz以上信号成分衰减明显。在线监测误报警的信号,基本上都是这类信号。

4)室内荧光灯在通常状态下不会产生具有放电特征的特高频干扰信号,但有时灯具或其开关出现异常,也会产生具有典型放电特征的干扰信号。

综上所述,特高频局部放电检测过程中,对检测影响最大的干扰为外部金属部件接触不良产生的悬浮放电干扰。

1 现有抗干扰方法

抗干扰技术是局放检测的关键问题。特高频段电磁波干扰信号的种类比较多,其中通讯信号、白噪声等干扰信号,通过信号谱图特征便能较容易识别。但是对于外部放电,由于其波形、相位特征与内部放电时一致,给现场干扰识别与排除带来很大困难。针对不同情况,研究学者们提出了多种有针对性的抗干扰手段。①对于通过非金属屏蔽的盆式绝缘子等部位进入传感器的外部信号,使用屏蔽带,将包括传感器非金属屏蔽的盆式绝缘子等部位包裹起来,避免外部干扰信号进入传感器,可实

现抗干扰效果^[9-10]。这种方式对内部信号无影响^[11],但是靠近套管等部位,仍会受到干扰影响,抗干扰效果有限。②对于较远距离传过来的外部干扰信号,电磁波频率较低,使用900 MHz的高通滤波器滤波后,如信号依然明显,则设备内部放电可能较大^[12-14]。但有时干扰源距设备较近,也会有很高的高频成分;且目前无有效资料表明GIS内部放电时,信号一定能达到900 MHz以上。因此,滤波器法不能直接作为判断信号是否为干扰的直接依据。③对于外部干扰较多时,基于幅值比较的时域法,将检测传感器的检测信号和背景传感器的检测信号对比分析确定干扰信号^[15]。但是当设备内部放电信号较强时,激发的电磁波信号可通过盆式绝缘子等部位传播到周围空气中,非常容易导致内部放电信号被当作干扰信号滤除掉^[16-18]。④通过高速示波器分析检测传感器信号与背景传感器信号时差情况,可准确判别信号为设备内部放电产生还是外部干扰信号^[19-21]。这是目前最准确、最可靠的干扰识别方法。缺点是使用示波器操作复杂,需要人员较高的专业水平,不能用于在线监测;仅能识别干扰,无法有效滤除干扰,分析信号特征时干扰信号与放电信号叠加,给信号类型分析时带来困难;手动触发信号效率低,容易丢掉放电信号,难以捕捉间歇性出现的信号。可以看出,现有特高频检测抗干扰方法,均存在较大不足,难以应对变电站现场复杂的电磁环境,导致特高频现场诊断往往只能依靠少数专业人员经验操作,难以大范围推广。

为此,文中提出了一种基于自动时差分析的特高频局放检测时域抗干扰方法。利用检测传感器及背景传感器检测到的信号的时间差,结合参数设置和逻辑判断,分析其是否为干扰信号并进行滤除。在126 kV GIS试品模型上进行了验证试验,取得了较好的现场效果,对于局部放电检测设备抗电磁干扰能力的提高奠定了理论基础和实践经验。

2 研究思路及方法

2.1 基本原理

到达时间差(TDOA)法是常用的信号定位方法。根据被测设备上放置的传感器(检测传感器)与周围空气中放置的传感器(背景传感器)之间的时差关系,可准确确定信号源方向,从而确定信号是来自设备内部,还是周围空气中的放电干扰。现场工作中,可使用两个背景传感器,先放置在检测传感器前后两侧(距离2~3 m以上),再将两个背景传感器移动至检测传感器左右两侧,见图1。当任意一个

位置的背景传感器与检测传感器同时检测到信号,且背景传感器信号时间上领先于检测传感器信号时,所测信号为干扰信号;当仅有检测传感器检测到信号,或检测传感器检测信号时间上领先所有背景传感器信号时,所测信号为设备内部放电信号。

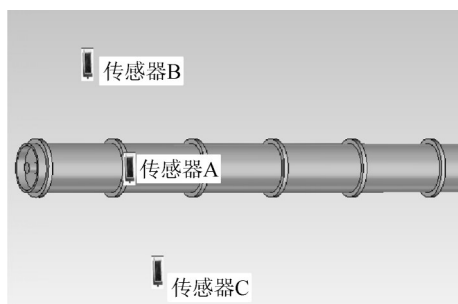


图1 多背景传感器检测时传感器布局示意图

Fig. 1 Sensor layout of multiple noise sensors

基于上述原理,开发具有自动时差分析功能的特高频定位分析仪,自动分析检测通道与背景通道时间差,仅将检测通道领先的信号过PRPD或PRPS等局部放电分析图谱展现出来,其他信号作为干扰滤除掉,达到人工使用示波器现场排除干扰的效果,从而大幅降低误报率。解决外部放电干扰排除难度大的问题。

系统进行时差分析,前提条件是能准确识别信号的起始脉冲并准确测量几个信号之间时间差,最好采集原始信号。但是特高频信号速度为光速,且其频率往往超过1 GHz,采集其原始波形,采样率必须高于4 GHz。但是这种高采样率的情况下,成本高,数据处理量大,采样间隔时间长,不可避免会丢失信号,因此,这一路线难以实施。而在检波器响应时间小于10 ns,系统采样率不低于100 MHz的情况下,通过优化软件算法,也能得到准确的时差关系。在这种情况下,信号处理难度大幅降低,系统显示流畅,且硬件成本大幅降低。

2.2 信号起始时刻的确定

信号起始时刻的确定是自动时差分析的关键问题。信号到达特定传感器的时间可根据波形中的第一个峰值出现时刻确定,但当信号波形高度振荡或存在背景噪声时将造成较大误差。文中采用能量积累函数的方法确定信号起始时刻,当局放发生时,放电源将辐射出一个脉冲,该脉冲的幅值远大于背景噪声,故可以在能量积累曲线上形成一个拐点,拐点时刻可以近似认为是信号起始时刻。

能量积累函数的计算式为

$$X = \sum_{i=1}^m u_i^2 \quad (1)$$

式(1)中: u_i 为波形上第 i 个点的信号电压; m 为每路波形采集的点数。按照该公式对信号数据进

行处理可以得到能量积累曲线,见图2。

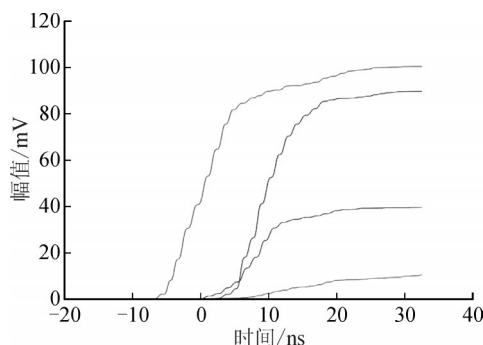


图2 特高频信号的能量积累曲线

Fig. 2 Energy accumulation curve of UHF signal

从图2可以看出,当局放发生时,曲线发生明显偏折。但因为示波器采集到的特高频信号中包含各种噪声干扰。因此,在脉冲信号到达前,能量积累曲线也可能因干扰等出现拐点,导致信号起始时刻的误判断。故在确定拐点之前,需要对能量积累曲线进行平滑滤波处理。

文中采用滑动平均滤波器对能量积累曲线进行平滑滤波处理。滑动平均滤波器属于有限冲击响应型低通滤波器,实现简单且抑制噪声效果佳。 M 阶滑动平均滤波器的公式为

$$Es(n) = Es(n-1) + \frac{1}{M}[E(n) - E(n-M)] \quad (2)$$

式(2)中: $E(n)$ 为原能量积累函数; $Es(n)$ 为平滑处理后的能量积累函数。将图2进行平滑滤波后的能量积累曲线见图3,从图3可以看出,滤波后大大减少了噪声的干扰,更容易通过计算机方法得到拐点。

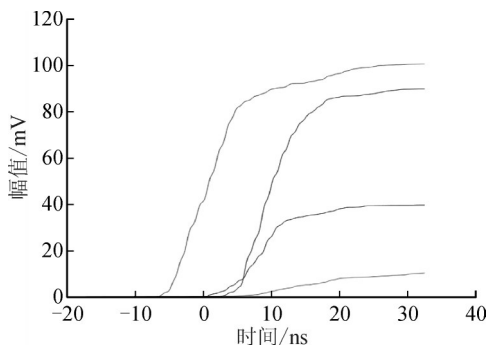


图3 平滑滤波后的能量积累曲线

Fig. 3 Energy accumulation curve of UHF signal after smooth filtering process

2.3 参数设置及逻辑判断

使用自动时差分析抗干扰技术,需设定两个重要的时差参数,分别为信号统计时差 t_1 以及盲区时差 t_2 。

信号统计时差 t_1 是为系统能自动判断各传感器检测到信号是否为同一信号而设定的时差范围,当检测传感器检测到信号时,在检测信号第一个脉冲前后均为 t_1 的时间范围内查找各背景传感器是否存

在信号,如背景传感器有信号,则认为是同一信号,进行时差分析。通常该时差设定为50~100 ns。

当检测传感器信号与背景传感器信号时间差小于盲区时差 t_2 时,为避免波头识别误差带来误判,对此信号不进行时差分析,直接将信号通过PRPS、PRPD展现出来。盲区时差影响抗干扰性能,在系统硬件能满足情况下,越小越好。

其信号逻辑判断见图4。当在检测信号前后(t_2 , t_1)范围内,无背景信号,检测信号判为设备内部信号;在检测信号后(t_2 , t_1)范围内,存在背景信号,检测信号判为设备内部信号;在检测信号前(t_2 , t_1)范围内,存在背景信号时,则检测信号判为干扰信号。

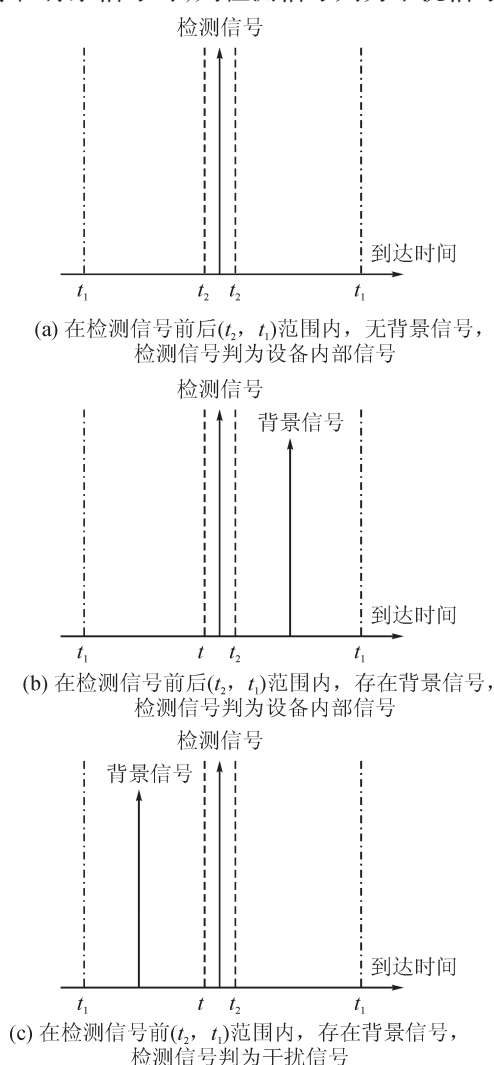


图4 信号逻辑判断图

Fig. 4 Diagram of signal logic decision

3 效果验证

3.1 实验室验证

为验证自动时差分析抗干扰技术的效果,采用126 kV GIS 试品模型进行试验,见图5。在其内部放置一尖端放电缺陷,并在距其3 m左右放置一特高

频信号发生器作为外部干扰信号。尖端放电缺陷由铝制金属材料制成,其针一板电极间距离为20 mm,将模型放置于GIS腔体气室内,充0.5 MPa SF_6 气体,实物图见图6。特高频信号发生器产生电磁波脉冲上升沿时间小于0.5 ns,脉冲重复频率50 Hz。

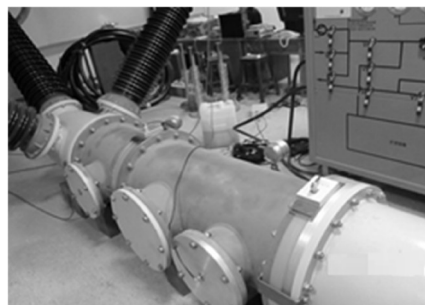


图5 126 kV GIS 试品模型

Fig. 5 Model of the 126 kV GIS

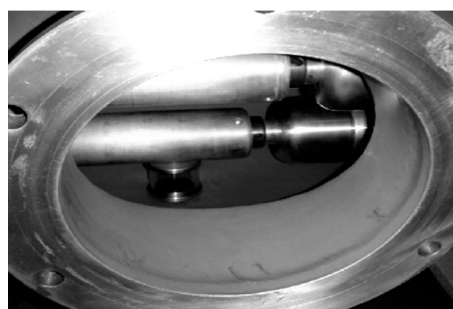


图6 尖端放电缺陷模型

Fig. 6 Model of the tip discharge defect

在GIS试品的盆式绝缘子上放置检测传感器,靠近特高频信号发生器处放置背景传感器。背景传感器检测信号的PRPS图谱见图7。

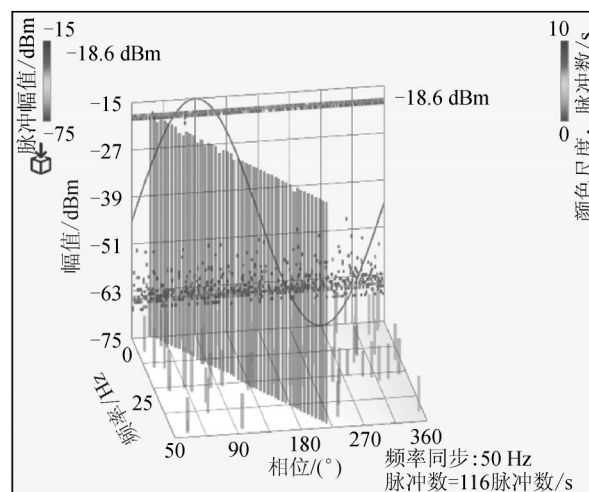
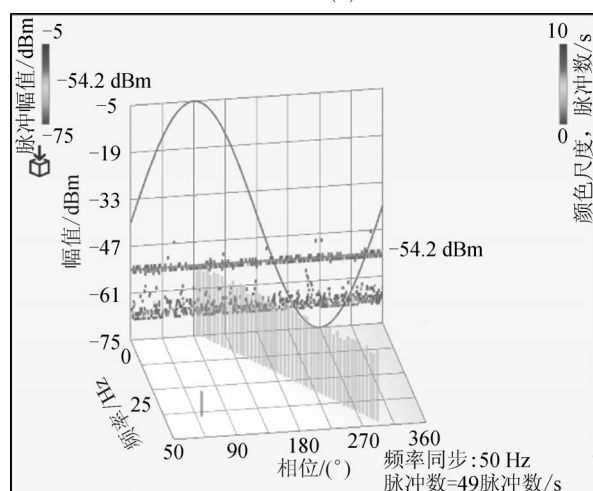


图7 背景传感器检测信号图谱

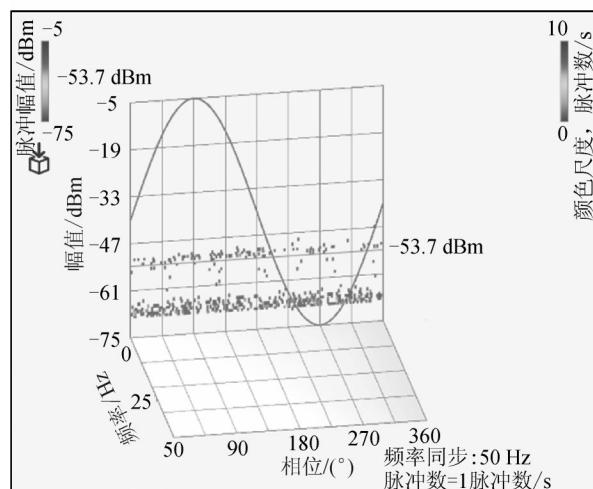
Fig. 7 Signal pattern of noise sensor detection

仿真GIS未加压、内部无放电时,检测传感器检测到的信号见图8。在图8(a)中可看到,受设置的干扰信号影响,检测传感器可检测到明显干扰信号,幅值较小且相对集中。启用了自动时差抗干扰功能后,由于背景传感器更靠近干扰源,时间上领先,干扰信

号均被滤除,检测信号见图8(b),滤除效果良好。



(a) 未启用自动抗干扰功能时信号



(b) 启用自动抗干扰功能后信号

图8 未加压时检测传感器检测信号图谱

Fig. 8 Background signal pattern of detecting sensor detection

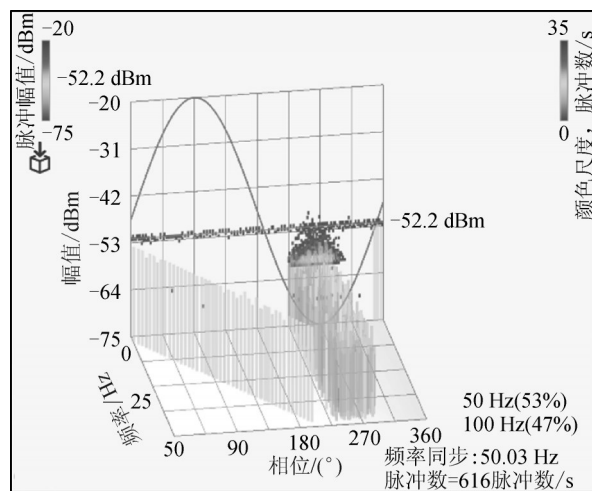
对仿真GIS进行加压,使内部设置的尖端缺陷产生局部放电。由于尖端放电能量较小,背景传感器检测不到该信号,其采集信号的PRPS图谱与图7相同。

检测传感器可同时检测到GIS内部尖端放电信号与特高频信号发生器产生的信号,开启自动抗干扰功能前后检测信号对比见图9。

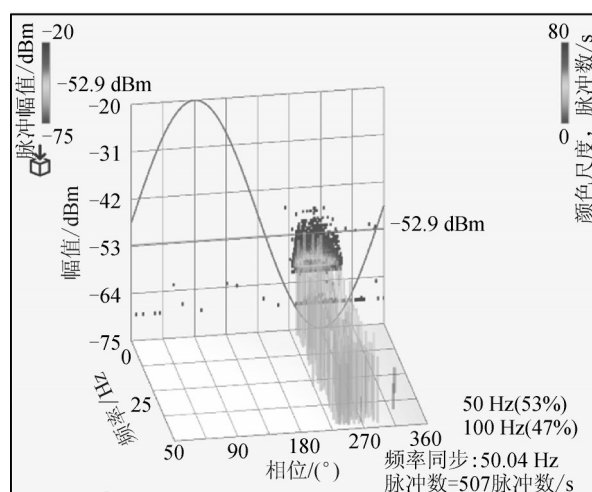
从图9(a)可以看出,未启用自动抗干扰功能前,设备内部放电信号与干扰信号叠加,会给信号识别造成干扰。启用自动抗干扰技术后(图9(b)),有效滤除干扰的同时,对内部放电信号检测无任何影响。

3.2 现场验证

选择一干扰明显的变电站现场进行测试。在某线路间隔无金属屏蔽的盆式绝缘子上进行检测,发现多数盆式绝缘子上均可检测到具有典型放电特征的信号。



(a) 未启用自动抗干扰功能时信号



(b) 启用自动抗干扰功能后信号

图9 加压后检测传感器检测信号图谱

Fig. 9 Signal pattern simulation of tip discharge inside the GIS

将检测传感器放置在一个盆式绝缘子上,在其南北两侧3 m左右各放置一个背景传感器,见图10。

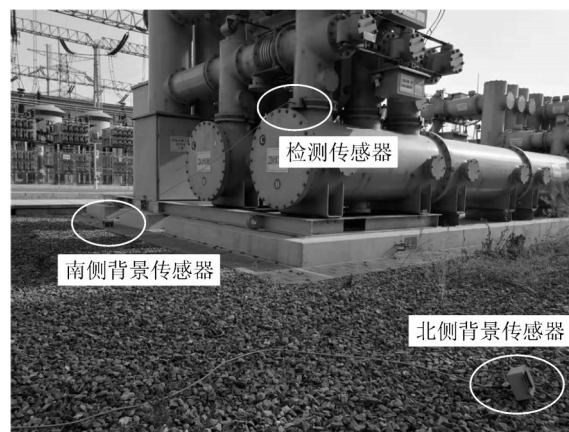
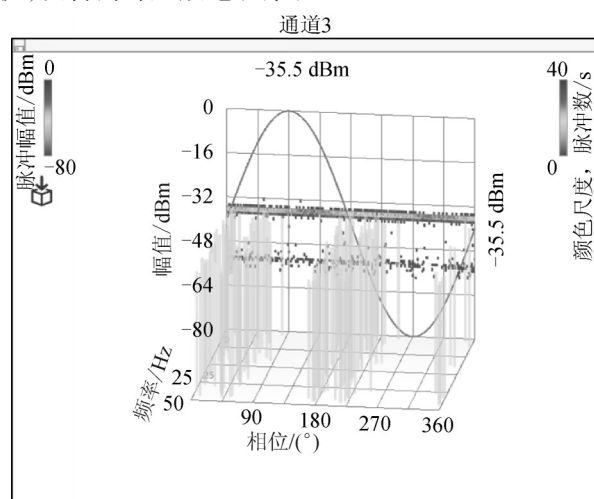


图10 传感器布置图

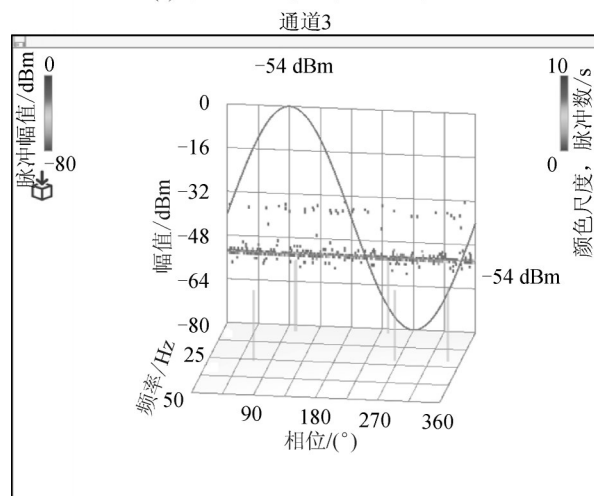
Fig. 10 Schematic diagram of sensor arrangement

未启动自动抗干扰情况下,盆式绝缘子上检测传感器可检测到具有悬浮放电特征的信号,见图11

(a). 启动自动抗干扰功能,放电信号消失,见图 11 (b),由此可见,所测放电信号为外部放电引起的干扰,设备内部无放电现象。



(a) 未启用自动抗干扰功能时信号



(b) 启用自动抗干扰功能后信号

图 11 检测传感器检测信号图谱

Fig. 11 Signal pattern simulation of tip discharge inside the GIS

使用示波器定位法进行验证,确定信号源位于变电站墙外杆塔处,为外部放电引起,基于自动时差分析的抗干扰方法判断准确。

4 结论

文中提出了一种基于自动时差分析的特高频局放检测时域抗干扰方法。通过检测传感器及背景传感器检测到的信号的时间差,设置参数并逻辑判断其是否为干扰信号并进行滤除。经过理论分析以及实际验证,证明了该方法可以有效地自动滤除外部放电干扰信号,具有良好的应用性。与其他抗干扰方法相比,具有以下优点:

1)干扰信号判别准确可靠,有效解决了特高频

局放检测时外部放电干扰识别排除这一核心难题。

2)可以有效滤除干扰信号,对设备内部放电信号检测无任何影响,从而大大方便信号类型的识别。

3)操作简便,无需复杂的专业分析操作,便于特高频检测技术大范围推广。

基于自动时差分析的时域抗干扰技术可有效解决外部放电这类最难识别的脉冲型干扰信号。结合特定窄带带阻滤波器,便可有效滤除白噪声、或脉冲非常宽的通讯信号。因此,使用基于自动时差分析的特高频抗干扰技术,可有效解决特高频局放检测时干扰信号识别难的问题,提升特高频在线监测系统报警信号的准确性,具有重要的推广价值。

参考文献:

- [1] 朱明晓,薛建议,邵先军,等. GIS局部放电特高频信号波形分析与特征参量提取[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4079-4087.
ZHU Mingxiao, XUE Jianyi, SHAO Xianjun, et al. Waveform analysis and feature extraction of partial discharge UHF signals in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4079-4087.
- [2] 刘青,朱明晓,王彦博,等. 基于特高频相控阵原理的变电站站域局部放电测向方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6126-6135.
LIU Qing, ZHU Mingxiao, WANG Yanbo, et al. Partial discharge orientation method in substation based on ultra-high frequency phased array theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6126-6135.
- [3] BOYA C, ROJAS-MORENO M V, RUIZ-LLATA M, et al. Location of partial discharges sources by means of blind source separation of UHF signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2302-2310.
- [4] 张冠军,朱明晓,王彦博,等. 基于可移动特高频天线阵列的变电站站域放电源检测与定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2761-2773.
ZHANG Guanjun, ZHU Mingxiao, WANG Yanbo, et al. Detection and localization of discharge sources in substation area using movable UHF antenna array[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2761-2773.
- [5] 侯慧娟,盛戈皞,苗培青,等. 变电站局部放电特高频信号时延的双谱估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 208-214.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Time-delay estimation algorithm of partial discharge UHF signals in substation based on bispectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 208-214.
- [6] 冯新岩,孟庆承,李凯,等. GIS特高频局部放电检测定

- 位方法[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10): 72-74.
- FENG Xinyan, MENG Qingcheng, LI Kai, et al. Discussion on fault location in the partial discharge detection of GIS with the UHF method[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(10): 72-74.
- [7] 季洪鑫, 齐波, 赵林杰, 等. ± 800 kV 换流站现场干扰信号的测量及实验室模拟[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3961-3971.
- JI Hongxin, QI Bo, ZHAO Linjie, et al. Measurement and laboratory simulation of site jamming signal in ± 800 kV converter station[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3961-3971.
- [8] TRIPATHY M, MISHRA S. Bacteria foraging-based solution to optimize both real power loss and voltage stability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 240-248.
- [9] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [10] 魏晓伟, 孙峥, 张恩伟, 等. 双屏蔽法消除电容型套管介损测量误差[J]. 华北电力技术, 2015(5): 24-29.
- WEI Xiaowei, SUN Zheng, ZHANG Enwei, et al. "Double shielding method" to eliminate the $\tan\delta$ measurement error of capacitive-type bushing[J]. North China Electric Power, 2015(5): 24-29.
- [11] 王俊波, 章涛, 李国伟. 在线检测 10 kV 开关柜局部放电方法研究[J]. 绝缘材料, 2011, 44(6): 60-64.
- WANG Junbo, ZHANG Tao, LI Guowei. On-line detection of 10 kV switchgear by partial discharge technology[J]. Insulating Materials, 2011, 44(6): 60-64.
- [12] 汤放奇. 变压器局部放电在线检测中的抗干扰技术[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 51-52.
- TANG Fangqi. Study of interference suppression in partial discharge on-line monitoring for transformers[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 51-52.
- [13] UDOMSUK S, AREERAK K, AREERAK T, et al. Power loss identification of three-phase induction motor using adaptive tabu search[C]//2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON). Pattaya: [s. n.], 2017: 1-4.
- [14] 王晓宁, 朱德恒, 李福祺, 等. 现场局部放电信号中周期性窄带干扰的抑制[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 16-17.
- WANG Xiaoning, ZHU Deheng, LI Fuqi, et al. Rejection for periodical narrow-band noises of on-site PD monitoring signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 16-17.
- [15] 王彩雄, 唐志国, 常文治, 等. 局部放电超高频检测抗干扰与多源放电信号分离方法[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 46-50.
- WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, et al. A method for anti-interference and multi-source discharge signal separation in ultra high-frequency partial discharge detection[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 46-50.
- [16] 冯义, 陈志勇, 方琼, 等. 变压器局放在线监测系统现场干扰及抑制试验[J]. 高电压技术, 2004, 30(s1): 110-112.
- FENG Yi, CHEN Zhiyong, FANG Qiong, et al. Field interferences and rejection tests for on-line partial discharge measurement of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(s1): 110-112.
- [17] VAN DER WIELEN P C J M, WOUTERS P A A F, VEEN J, et al. Synchronization of on-line PD detection and localization setups using pulse injection[C]//Proceedings of the International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 327-330.
- [18] MAO Yizhi, LI Song, LI Zhangqiang. Research on denoising method of partial discharge signal of transformer[J]. Transformer, 2011, 48(3): 47-50.
- [19] 侯慧娟, 盛戈皞, 苗培青, 等. 基于超高频电磁波的变电站局部放电空间定位[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1334-1340.
- HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Partial discharge location based on Radio frequency antenna array in substation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1334-1340.
- [20] ZHU M. Detection and localization of partial discharge in air-insulated substations using UHF antenna array[C]//3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy. Yogyakarta: IEEE, 2016: 221-224.
- [21] LIU Bin, AN Jingde, ZHANG Weidong, et al. A design of multi-band UHF sensor for partial discharge detection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(394): 435-440.
- 冯新岩(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备绝缘及故障诊断技术(E-mail: fengxinyan0214@163.com)。
- 李沐(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划与设计(通讯作者)(E-mail: 422131472@qq.com)。
- 蔺晓琨(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计。
- 张海杰(1989—), 男, 大学本科, 工程师, 主要研究方向为电力设备绝缘及故障诊断技术。