

采用高阶累积量的环网柜局部放电在线检测

杨凯, 樊真, 张认成, 杨建红, 赵尚程, 陈首虹

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 根据环网柜的绝缘缺陷,设计 3 种典型的局部放电模型,搭建局部放电试验平台.借助射频电流传感器获取局部放电混合信号,经过放大和高速 A/D 采样后,将信号送入微型计算机进行处理.采用四阶累积量作为局部放电特征量,抑制随机噪声干扰,提高信噪比.通过 Otsu 算法确定检测判据,实现局部放电的在线检测.将检测算法移植到现场可编程门阵列(FPGA)上,研发环网柜局部放电在线检测装置.试验结果表明:该装置能够适应较强的噪声环境,且具有良好的实时检测效果.

关键词: 局部放电;高阶累积量;环网柜;放电模型;现场可编程门阵列;在线检测

中图分类号: TM 835 **文献标志码:** A

环网柜作为环网运行方式中的重要设备,其安全可靠直接会影响到供电系统的正常运行^[1].据统计,绝缘性故障位居环网柜各类故障发生率之首,而局部放电(PD)是环网柜绝缘故障的重要征兆和表现形式^[2-3].因此,对环网柜局部放电实时监测,可及时掌握环网柜的工作状态,避免发生安全事故.现有的环网柜局部放电检测方法包括小波分析、数学形态滤波和独立分量分析等.对于高斯信号,采用小波将局部放电信号进行不同尺度地分解,对小波系数进行处理,从而抑制白噪声^[4-5].对于非高斯信号,采用基于最小均方算法构造自适应的形态开、闭组合形态滤波器,降低局部放电中的周期性干扰的影响^[6].还可根据局部放电与噪声的相互独立性,运用独立量分析方法,从混合信号中分离出单一的局部放电,恢复出局部放电的重要特征信息^[7].这些方法基于离线分析,在提取局部放电信号、降低噪声干扰上取得了一定成效.然而,开发小型在线检测装置还有待进一步研究.本文将高阶累积量作为局部放电特征量,设计了局部放电在线检测算法,并移植到 FPGA 上,研发了一种在线检测装置.

1 实验部分

1.1 试验平台的建立

根据环网柜局部放电检测要求,试验平台应能模拟不同工况下环网柜的局部放电试验.该平台主要由待测品、标准测量系统、数据采集分析系统和 FPGA 开发系统等部分组成,其原理如图 1 所示.

待测品包括故障环网柜和放电模型.

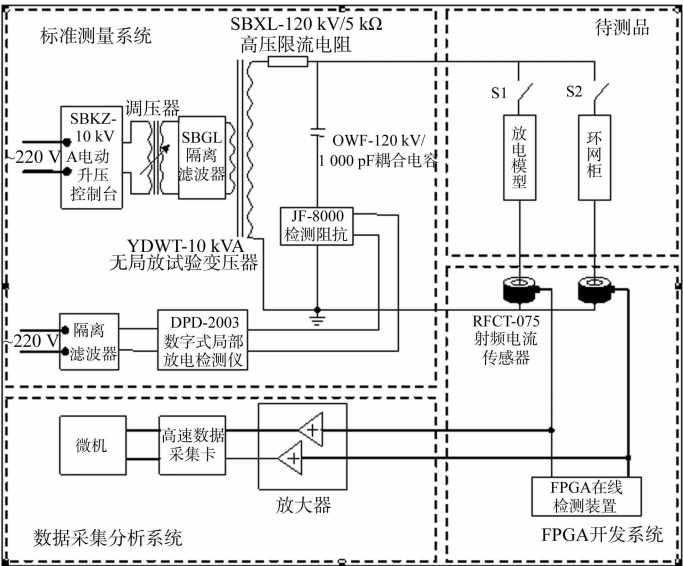


图 1 试验平台原理
Fig. 1 Principle of experiment platform

通过研究环网柜内部结构及其工作情形发现,环网柜内引起局部放电故障的主要缺陷有高压母线连接处接触不良、柜内表面存在金属毛刺、柜内带有可移动的金属微粒、绝缘体内部制造缺陷等. 将这些故障进行模拟近似后,设计并制作了针板模型、内部缺陷模型和悬浮电极模型,可用于模拟电晕放电、内部放电和悬浮放电等. 试验过程中,高压施加在模型两端,模型结构及详细尺寸,如图 2 所示.

1.2 局部放电试验

按照图 1 所示接线,通过升压控制台调节施加电压,从零开始逐渐升高电压,直至从局放仪上观测到明显的局部放电量. 利用 PXI 高速数据采集系统,以 20 MHz 的采样频率采集试验过程中的局部放电信号,并记录局放仪上显示的放电量,如表 1 所示.

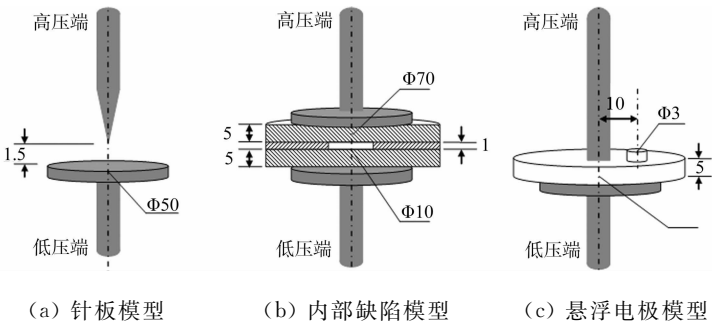


图 2 典型放电模型(单位:mm)

Fig. 2 Typical discharge model (unit:mm)

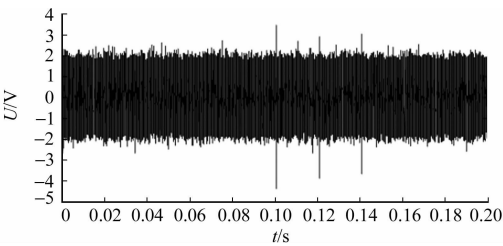
表 1 三种模型和环网柜的局部放电

Tab. 1 Partial discharge of three models and ring main unit

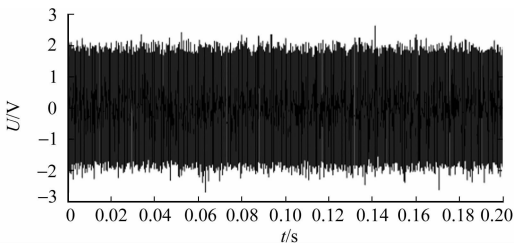
电压/kV	针板模型/pC	内部缺陷模型/pC	悬浮电极模型/pC	故障环网柜/pC
0	0.10	0.12	0.11	0.12
1	0.10	0.10	2.56	10.30
2	0.11	0.11	35.50	19.40
3	0.20	0.30	829.20	40.60
4	0.24	13.45	866.42	100.76
5	10.14	15.08	973.65	120.34
6	107.45	30.56	1 013.00	1 258.00
7	480.00	55.70	1 360.31	1 600.80
8	1 030.21	89.65	1 500.80	2 080.00
9	2 307.25	103.44	1 811.12	4 509.31
10	5 300.00	240.30	2 020.46	6 632.21
11	10 003.40	376.83	2 111.39	8 046.83

不同放电模型产生明显局部放电的电压也有所不同. 其中,针板模型在电压达到 5 kV 时开始产生局部放电,随电压的升高,局放量急剧增加;内部缺陷模型在电压达到 4 kV 时开始产生局部放电,而从 4 kV 升高至 9 kV 时局放量增幅缓慢;悬浮电极模型在 2 kV 左右就产生了一定的局放量,至 3 kV 时急剧增加,然而随着电压的升高,放电量的增幅却变得比较缓慢;故障环网柜在 1 kV 时就有少量的局放,当达到 6 kV 后迅猛增大. 由于引起局部放电的缺陷情况不一样,不同电压下聚集在放电电极两端的电荷量也会不一致,再加上场强分布不均匀,因此,各情况下的局放量也有较大差别.

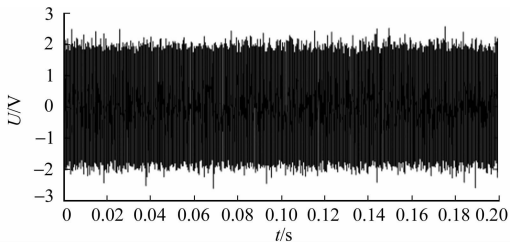
在局部放电试验过程中,采集的典型局部放电波形,如图 3 所示. 混合信号中包含有较强的随机噪声,看不到明显的局部放电特征,难以直接检测出局部放电故障. 这些噪声包括线路噪声、热噪声和环网柜内部随机干扰等,它们接近于高斯分布. 为了有效地抑制噪声干扰并实现实时检测,可引入统计量分析方法,从理论上讲,对于有色噪声,二阶统计量是敏感的,它难以分离原始信号和背景噪声. 因此,文中采用高阶累积量的方法检测局部放电.



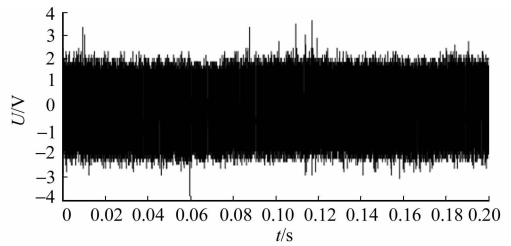
(a) 针板模型在 7 kV 时



(b) 内部缺陷模型在 10 kV 时



(c) 悬浮电极模型在 3 kV 时



(d) 故障环网柜在 5 kV 时

图 3 局部放电波形

Fig. 3 Waveform of partial discharge

2 高阶累积量的降噪原理

对于高斯信号, 其统计特性可用其均值(一阶矩)和方差(二阶矩)完整描述; 但对于非高斯信号, 需要用更高阶的统计量才能完整描述其统计特性, 而且高阶累积量对未知谱特性的高斯噪声具有良好的抑制效果. 对随机向量 $s = [s_1, s_2, \dots, s_l]^T, l=1, 2, \dots$, 其联合特征函数定义为

$$\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l) \triangleq E\{\exp(j(\omega_1 s_1 + \omega_2 s_2 + \dots + \omega_l s_l))\}. \quad (1)$$

式(1)中: ω_l 为角频率. s 的 r 阶矩和累积量分别定义为

$$m_{r_1, r_2, \dots, r_l} \triangleq E(s_1^{r_1}, s_2^{r_2}, \dots, s_l^{r_l}) = (-j)^r \frac{\partial^r \Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l)}{\partial \omega_1^{r_1} \omega_2^{r_2} \dots \omega_l^{r_l}} \Big|_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_l = 0}, \quad (2)$$

$$c_{r_1, r_2, \dots, r_l} \triangleq (-j)^r \frac{\partial^r \ln \Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l)}{\partial \omega_1^{r_1} \omega_2^{r_2} \dots \omega_l^{r_l}} \Big|_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_l = 0}. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $r = r_1 + r_2 + \dots + r_l$.

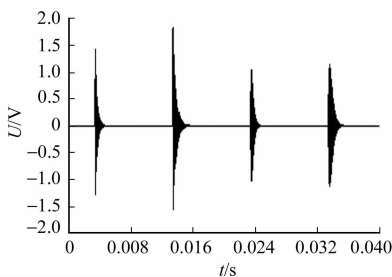
假设随机噪声 z 服从高斯分布 $N(0, \sigma^2)$, 其中, σ^2 为 z 的方差. 由式(2), (3)计算可得, 各阶矩 m_1, m_2, \dots, m_8 分别为 $0, \sigma^2, 0, 3\sigma^4, 0, 16\sigma^6, 0, 105\sigma^8$. 各阶累积量 c_1, c_2, \dots, c_8 分别为 $0, \sigma^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0$. 从以上计算可发现, 高于二阶的 z 的矩不一定为 0, 而高于二阶的 z 的累积量恒等于 0. 因此, 高阶累积量能够较好地消除高斯噪声的影响.

局部放电信号通常用 4 种数学模型描述, 分别为单指数衰减函数(SEAW)、双指数衰减函数(DEAW)、单指数衰减振荡函数(SEAOW)和双指数衰减振荡函数(DEAOW)^[8], 其数学表达式为

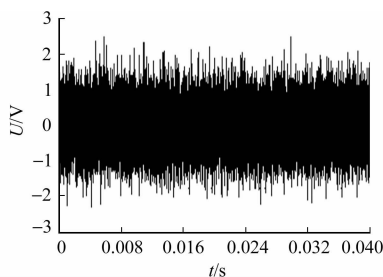
$$\left. \begin{aligned} \text{SEAW: } y_1(t) &= A \cdot \exp(-(t-t_0)/\tau), \\ \text{DEAW: } y_2(t) &= A \cdot (\exp(-1.3t/\tau) - \exp(-2.2t/\tau)), \\ \text{SEAOW: } y_3(t) &= A \cdot \exp(-t/\tau) \sin(2\pi f_0 t), \\ \text{DEAOW: } y_4(t) &= A \cdot (\exp(-1.3t/\tau) - \exp(-2.2t/\tau)) \sin(2\pi f_0 t). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中: τ 为衰减系数; A 为局部放电脉冲幅值; f_0 为振荡频率.

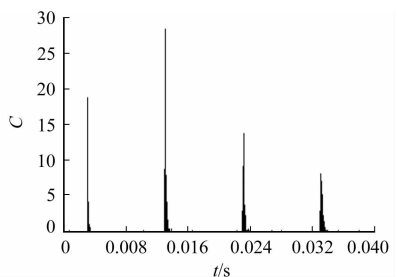
选择式(4)所列 4 种数学模型构成局部放电的模拟信号, 其中包含 4 个不同的局部放电波形, 通过加入随机噪声得到混合信号, 分析混合信号的四阶累积量, 如图 4 所示. 图 4 中: C 表示累积量. 由图 4 可知: 四阶累积量能够有效地抑制了随机噪声, 恢复了混合信号中原始局放信号的特征.



(a) 原始信号



(b) 混合信号



(c) 混合信号的四阶累积量

图 4 模拟的局部放电信号分析

Fig. 4 Analysis of simulative partial discharge signal

3 局部放电的在线检测方法

3.1 特征信号的提取

虽然高阶累积量可以消除高斯噪声,但当阶数太高时,运算量大,在实际应用中须尽可能降低阶数.对于传感器实测的环网柜局部放电混合信号,先进行零均值化处理,分析混合信号的各阶统计量.对于零均值信号,有 $c_3=m_3$.在环网柜有局放和无局放情况下,实测信号的三阶和四阶矩及累积量的计算结果,如图 5 所示.图 5 中: C 表示累积量.由图 5 可知:在计算无局放和有局放的统计量时,除四阶累积量外,均产生一定程度的混叠,难以有效地提取混合信号中局部放电的特征信息.因此,可将四阶累积量作为局放特征量.

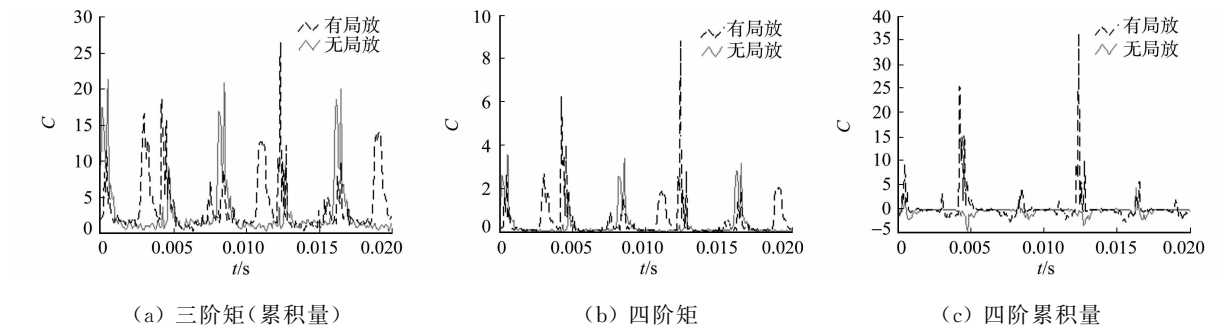


图 5 实测故障环网柜局部放电信号的矩和累积量

Fig. 5 Measured partial discharge moments and cumulants of fault ring main unit

采用移动时间窗计算信号的四阶累积量,移动原理如表 2 所示.每移动一个采样点,就计算一次窗内数据的累积量.由于窗长度 L 的选择会影响计算结果,因此,选用计算后信号的信噪比(signal to noise ratio, SNR)和脉冲数(pulse number, PN)作为评价指标来选择合理的 L ,使 SNR 和 PN 达到最大.经过对比计算大量的局部放电数据,得出 L 与归一化后的信噪比和脉冲数的关系,如图 6 所示.由图 6 可知: $L=32$ 为最佳值.

表 2 时间窗移动原理

Tab. 2 Move principle of time window

计算次序	时间窗内采样点				
1	x_1	x_2	x_3	\cdots	x_L
2		x_2	x_3	x_4	$\cdots x_{L+1}$
\vdots			\vdots		
n	x_n	x_{n+1}	x_{n+2}	\cdots	x_{n+L-1}

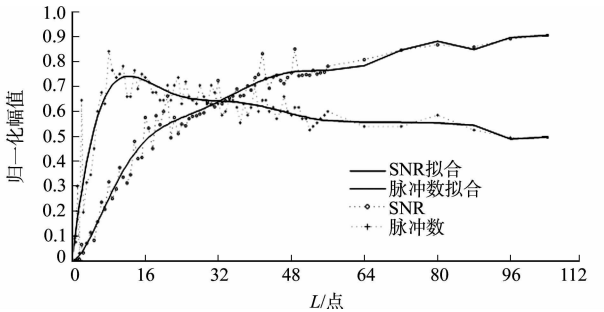


图 6 评价指标变化曲线

Fig. 6 Changing curves of the evaluation index

由式(3)可知:在四阶累积量的计算过程中,存在四次方运算,计算量较大,对检测装置的硬件要求较高.为了保证实时检测并兼顾装置的性能比,采用近似递推公式^[9]计算四阶累积量,即

$$C_{4x}(k) = \beta C_{4x}(k-1) + (1-\beta)x^4(k).$$
 (5)

式(5)中: k 为计算次序; $0\leqslant\beta<1$,称为遗忘因子.

那么,当前时刻四阶累积量的计算可由前一时刻的累积量加上修正值实现,大大减少了运算量,便于环网柜局部放电的在线检测.

最大类间方差法(Otsu)^[10]在图像分割方面获得了广泛应用,对放电模型及环网柜进行大量试验,借鉴其分割思想,以确定局部放电的识别阈值,计算公式为

$$a = \max(\omega_0(t) \cdot (u_0(t) - u)^2 + \omega_1(t) \cdot (u_1(t) - u)^2).$$
 (6)

式(6)中: ω_0 为噪声比例; u_0 为噪声均值; ω_1 为局部放电信号比例; u_1 为局部放电信号均值; u 为混合信号均值.

从 0 到最大幅值,以步长 0.1 选取 t ,分别计算 $\omega_0, u_0, \omega_1, u_1$ 和 a .当 a 达到最大时,即为最佳识别阈值.所求最佳识别阈值 $a=3.6$ 时,放电模型和环网柜局部放电检测结果,如图 7 所示.由图 7 可知:该

检测算法对较强的噪声具有良好的抑制作用,能大幅度提高信噪比,实现局部放电在线检测.

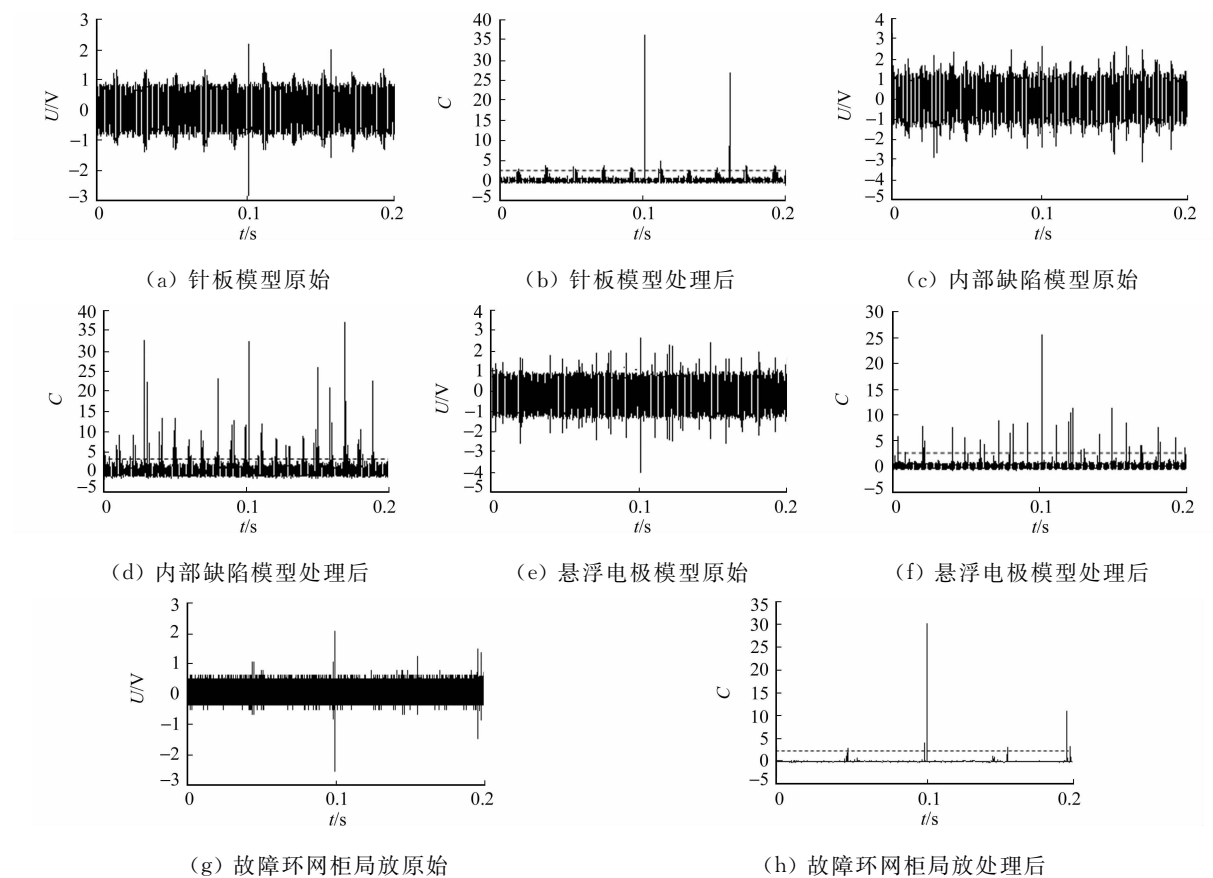


图 7 局部放电检测结果信号

Fig. 7 Detection result signals of partial discharge

4 基于 FPGA 在线检测装置的研发

为了满足环网柜局部放电在线检测和装置的安装要求,选用 Xilinx 公司的 Spartan-6 系列 FPGA 的 XC6SLX16-FTG256 作为核心处理器.

FPGA 内部四阶累积量算法的运算示意图,如图 8 所示. $x^4(k)$ 是输入信号,前一级基本模块的输出作为到下一级基本模块的输入,将 32 个基本模块串联,构成了四阶累积量递推算法的顶层模块,所有模块共用一个时钟.文中算法采用了流水线的运算方式,在经过 32 个启动时钟后,每个时钟周期都能输出一个新的累积量值.

局部放电在线检测装置结构紧凑,可安装于环网柜内部.通过 Modelsim 软件读取 FPGA 处理信号的结果,如图 9 所示.混合信号通过 FPGA 在线检测装置后,较强的噪声得到了极大地降低,局部放电信号被有效地提取出来,达到了预期的在线检测效果.综上所述,所研发的在线检测装置对环网柜局部放电具有良好的识别效果.

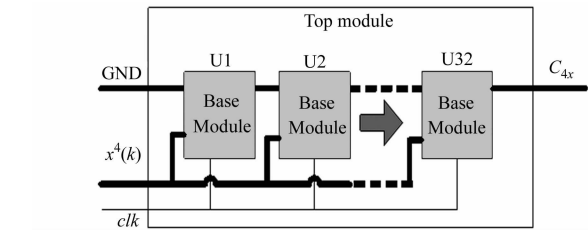


图 8 四阶累积量算法示意图

Fig. 8 Diagram of fourth-order cumulants

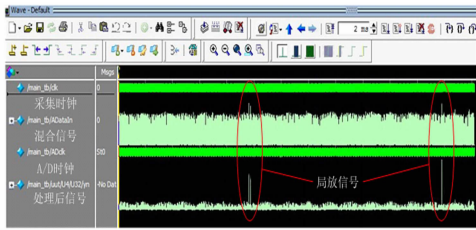


图 9 算法调试结果

Fig. 9 Algorithm debugging results

5 结 论

- 1) 通过递推算法计算四阶累积量,提取了混合信号中局部放电特征量,所设计的在线检测算法既能减少运算量,提高信号处理速度,又能保证抑制混合信号中未知谱特性的高斯噪声的干扰.
- 2) 基于 FPGA 的环网柜局部放电在线检测装置,能适应较强噪声环境下局部放电的在线检测,系统实时检测效果良好.

参考文献:

[1] 胡秋野,杨世春,欧景茹. 论环网柜在城市电网中的应用[J]. 高电压技术,2004,30(增刊 1):8-9.

[2] DING Dengwei,GAO Wensheng,YAO Senjing,et al. Analysis of excitation characteristics of ultra high frequency electromagnetic waves induced by PD in GIS[J]. High Voltage Engineering,2013,39(8):1893-1901.

[3] 岳森. 10 kV 环网柜的常见问题分析及对策[J]. 电气时代,2014(2):52-53.

[4] LI Jian,JIANG Tianyan,GRZYBOWSKI S,et al. Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(6):1705-1714.

[5] DEY D,CHATTERJEE B,CHAKRAVORTI S,et al. Cross-wavelet transform as a new paradigm for feature extraction from noisy partial discharge pulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(1):157-166.

[6] 刘云鹏,律方成,李成榕,等. 基于数学形态滤波器抑制局部放电窄带周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):169-173.

[7] 杨凯,张认成,杨建红,等. 基于频率约束独立分量分析的开关柜局部放电故障识别[J]. 高电压技术,2014,40(11):3452-3460.

[8] 李立学,黄成军,曾奕,等. GIS 局部放电信号超高频包络检波电路的研制[J]. 高压电器,2008,44(5):406-408.

[9] 郭业才,赵俊渭,陈华伟. 基于四阶累积量极性迭代的自适应动态谱线增强快速算法[J]. 兵工学报,2004,25(2):171-174.

[10] CHEN Zhongshan,TU Yan. Improved image segmentation algorithm based on OTSU algorithm[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology,2012,4(15):206-215.

On-Line Partial Discharge Detection of Ring Main Unit
Using Higher-Order Cumulants

YANG Kai, FAN Zhen, ZHANG Rencheng, YANG Jianhong,
ZHAO Shangcheng, CHEN Shouhong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the insulation defects of ring main unit, three kinds of typical partial discharge (PD) models were designed, and the PD test platform was built. With used radio frequency current sensor to obtain the mixed PD signals, and the signals were sent to a microcomputer for processing after amplification and high-speed A/D sampling. Then, fourth-order cumulants were used as PD characteristic to suppress the random noise. Meanwhile, the signal to noise ratio (SNR) was improved. Detection criterion was determined by the Otsu algorithm in order to realize the on-line PD detection. The detection algorithm was transplanted to the field-programmable gated array (FPGA) and an on-line PD detection device for ring main unit was developed. The experimental results showed that the device could adapt to the strong noise environment, and had good effects of real-time detection.

Keywords: partial discharge; higher-order cumulants; ring main unit; discharge model; field programmable gate array; on-line detection