

## 交流局部放电宽带检测与分析仪的研制

邓鸿岳<sup>1</sup>, 刘家齐<sup>2</sup>, 司文荣<sup>3</sup>, 吴征<sup>4</sup>, 袁鹏<sup>3</sup>, 李彦明<sup>3</sup>

(1. 承德供电公司, 承德 067000; 2. 杭州市电力局, 杭州 310009; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 4. 新乡供电公司, 新乡 453000)

**摘要:** 笔者系统地介绍了基于 Measurement Studio 软件平台研制的一种新型交流局部放电宽带检测与分析仪。其主要包括利用 NI5112 高速示波采集卡和前置信号处理单元实现的采样率为 100 MS/s、模拟宽带为 10 kHz~40 MHz 的局部放电脉冲宽带检测技术, 和基于脉冲波形时频特征的脉冲群实用快速分类技术以及基于 PRPD 和幅值统计分布谱图的放电识别技术。其工作原理为: 首先, 被同步交流电压信号触发的检测系统, 单周期 (20 ms) 或多周期采集来自宽带传感器的脉冲信号, 并利用移动提取窗实现脉冲波形及其对应相位信息提取; 其次, 利用脉冲群实用快速分类技术将脉冲群分为若干个由相同波形特征脉冲组成的子类脉冲群, 从而实现多局放分类或随机干扰脉冲群剔除; 最后, 利用统计算子对各个子类脉冲群对应的 PRPD 和幅值统计分布谱图进行放电指纹提取, 共 38 个放电指纹形成识别样本文件。220 kV 电压等级的气体绝缘组合电器 (GIS) 的母线尖刺和筒壁尖刺放电的试验结果分析表明, 研制的检测系统具有抗干扰能力强、放电识别准确, 并能够解决和处理多局放源问题。

**关键词:** 局部放电; 脉冲波形; 宽带测量; 分类; 识别; 交流

**中图分类号:** TM835.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-1609(2011)03-0018-08

### Development of a Novel Wide-band Detection and Analysis Device for AC Partial Discharge Pulse Signals

DENG Hong-yue<sup>1</sup>, LIU Jia-qi<sup>2</sup>, SI Wen-rong<sup>3</sup>, WU Zheng<sup>4</sup>, YUAN Peng<sup>3</sup>, LI Yan-ming<sup>3</sup>

(1. Chengdu Power Supply Company, Chengdu 067000, China; 2. Hangzhou Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** This paper systematically introduced a novel wide-band detection and analysis device for AC partial discharge (PD) pulse signals, which was developed based on measurement studio software platform. It contains some practical techniques of PD detection and analysis, while the PD pulse signals extraction resorts to a high speed digitizer with a sampling rate up to 100 MS/s and a bandwidth of 10 kHz to 40 MHz. The PD pulse sequence classification was realized by the fast grouping technique based on pulse waveshape characteristics in time and frequency domain, and the PD identification worked on the fingerprints deduced from several histograms of phase-resolved partial discharge (PRPD) and magnitude statistical distributions (MSD). The PD data processing of the system were splited into three steps. Firstly, signal detection channel samples synchronization PD data with a length of one AC period (20 ms) or several AC periods after triggered by the AC voltage signals from a divider. Then pulse waveshapes and their corresponding phase information were extracted by the moving extraction window (MEW) with a simple algorithm. Secondly, the PD pulse sequence was separated into sub-groups using the pulse fast grouping technique, which results each one of the sub-groups was relevant to a well defined PD phenomenon or electrical noise. And lastly, the PD identification was made based on 38 fingerprints

收稿日期: 2010-10-22; 修回日期: 2010-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50377034, 50877064)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50377034, 50877064).

deduced from the PRPD and MSD of each sub-group. GIS experimental results showed that the developed AC PD measurement system has good performance in anti-interference, PD classification and PD identification, and can solve and deal with the multi-PD source problem.

**Key words:** partial discharge; pulse waveshape; wide-band detection; classification; identification; AC

## 0 引言

目前研制的检测系统处理交流局部放电信号数据的主要流程为<sup>[1-5]</sup>:①采集局部放电信号的峰值—相位(时间)序列;②将峰值—相位序列转换成各种基于相位窗的 PRPD 和幅值统计分布谱图;③再对各放电谱图提取统计算子构成放电指纹。一般情况下,放电指纹样本数据库都是基于单个人工缺陷模型构造的,在获取不同缺陷模型对应的大量放电指纹后,使用 BP 神经网络(或其他人工智能算法)训练,从而建立放电模式并存储在系统的数据库中。在现场进行实测时,局放数据经过上述相同的处理流程,与数据库中的放电模式进行对比,从而可判断当前局放数据的放电模式。但在对电工设备绝缘进行在线监测时,基于脉冲峰值—相位序列的信号检测对于频率成分覆盖检测带宽(硬件滤波器失效)的随机干扰脉冲群,以及存在两个以上局部放电源时,系统获取的局放数据将是随机混叠的峰值—相位序列(峰值和相位均混叠),相应的放电谱图也是随机混叠的,使用统计算子获取的放电指纹将与故障特征数据库中的单个缺陷的放电指纹不匹配。因此,对此类问题再使用上述检测系统对局放数据进行处理,系统将无法对实测数据进行放电模式判别,判别功能将失效。

一般情况下,电工设备内部存在的局放源是未知的,即局放脉冲信号经过局放源与检测点之间的传输路径所构成的系统是未知的,但在局放源稳定的工况下该未知系统是确定的。在短时间内,绝缘老化等其他因素不影响局放脉冲信号,局放源产生的局放脉冲信号是“稳定的”。如果使用宽带检测技术<sup>[6-9]</sup>,检测阻抗获取由同一局放源(或是同一干扰源)产生的脉冲群在时域或频域波形上具有强相似性或是高相似度。若将传统的脉冲峰值—相位序列检测改为脉冲波形—相位序列检测,即记录单个脉冲波形及其相位信息,使用某种技术将获取的脉冲群进行快速分类,并对具有相似性脉冲波形组成的各子类脉冲群进行软件峰值保持从而得到各自的峰值—相位序列,然后再按上述传统的放电谱图进行数据处理,与由单个人工缺陷模型构造的放电模式进行对比,从而做出放电模式判别。与系统数据库中放电模式无关的子脉冲群,可判断为噪声(或是无效数据)。这样,该系统不仅解决了峰值—相位序列的

混叠问题,而且可以对存在干扰的多局放源进行检测和模式识别。

由上述分析可以得出,研制上述宽带检测与分析系统的关键是<sup>[8,10]</sup>:基于宽带检测的脉冲群快速分类技术和常规的基于放电谱图的模式识别技术。由于局放脉冲波形的不确定性,该脉冲群快速分类技术必须是非监督的或无教师的,即有训练样本而无目标输出。由于 GIS 或电力变压器等设备中绝缘缺陷对应放电谱图的“确定性”,模式识别技术则是针对单个缺陷的有监督的或有教师的分类技术,其具有训练样本和指定目标输出。

由于基于宽带检测的脉冲群快速分类技术和基于放电谱图的模式识别技术各自均已经在相关的参考文献<sup>[1-18]</sup>中进行了详细描述,因此不再给予讨论。笔者结合上述两种技术,系统地介绍了一种新型交流局部放电宽带检测仪的研制方法,包括检测系统工作原理、系统数据处理流程和维护等,并以 GIS 的实测局放数据为例,对该研制检测仪进行了试验应用和分析。

## 1 检测系统工作原理

图 1 为局部放电脉冲宽带检测系统工作原理示意图。其中,高速示波采集卡采用 NI5112,双通道,单通道最高采样率为 100 MS/s,模拟带宽为 100 MHz,存储深度为 16 MS。系统检测传感器采用带宽大于 40 MHz 的罗氏线圈或检测阻抗。通道 0 接宽带检测传感器,而通道 1 则作为触发源,与分压器低压臂相接。通道 0 采集前端接入 10 kHz~40 MHz 的带通滤波器,滤除工频干扰和无用的高频信号。系统工作时,采集卡参数设置如下:通道 0 采样率 100 MS/s,采集长度为 2 MS;通道 1 为触发通道,上升沿触发,触发电平为 0。这样的参数设置,使得通道 0 采集局部放电信号数据的时间为 20 ms,为一个工频周期,且采集获取数据点的相位信息如图 1 中所示,起始点和结束点分别对应为工频电压初始和结束相位。

在确定上述检测系统硬件工作原理的基础上,笔者基于 Measurement Studio 软件平台研制的数据采集、处理及显示的脉冲群检测与快速分类子界面见图 2。其中,脉冲时域波形和频域波形以及峰值—相位分布等均动态显示,方便操作人员了解观测时的检测结果。

系统在通道 0 检测获取的 2 M 个点数据中,如

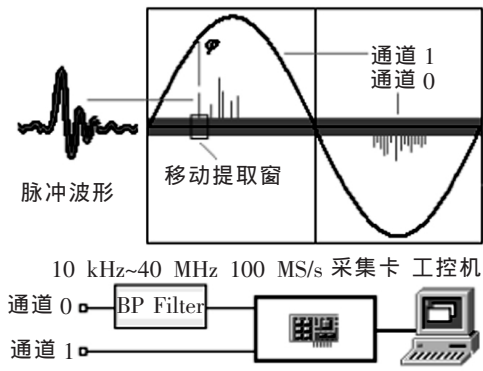


图1 局放宽带检测工作原理示意图

Fig.1 Description of wide-band detection of PD pulse

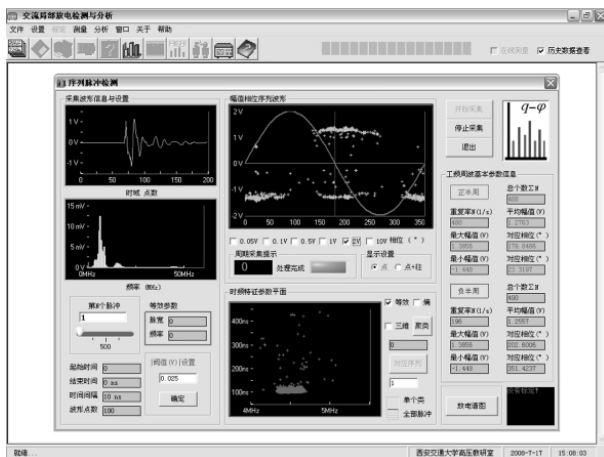


图2 脉冲群检测与快速分类子界面

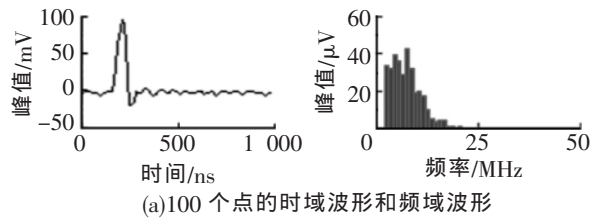
Fig.2 User-interface developed for pulse sequence detection and fast grouping

图1所示,可以使用设置某一阈值的移动提取窗(moving extraction window, MEW)进行局放脉冲群提取。MEW的长度可设置为100(1 us)、200(2 us)、400(4 us)等,从而满足不同脉冲波形长度的要求。图2所示数据处理系统中MEW脉冲提取效果见图3。局放脉冲波形信号的相位信息可通过式(1)获取。

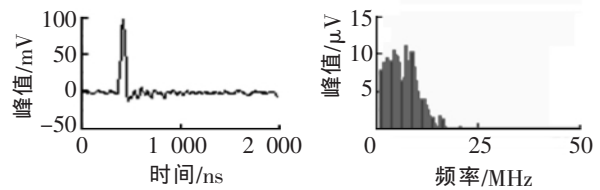
$$\varphi(i) = 360 \times i / (2M), i = 0, 1, \dots, 2M-1 \quad (1)$$

单个脉冲对应的相位以其最大幅值点对应的来近似并记录存储。由式(1)决定的相位分辨率足以满足基于PRPD放电谱图进行放电模式识别的要求。

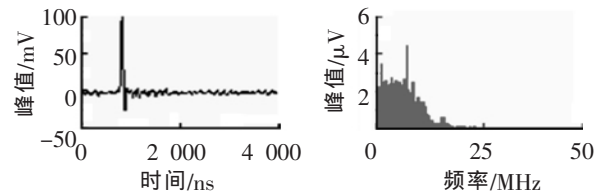
2M个点数据中脉冲提取完毕后,即一个处理周期结束,图2所示界面刷新峰值—相位分布和脉冲群时频特征参数分布等图形显示,检测系统将会被下一个试验工频电压的零相位触发,从而进行下一个周期的信号采集。采集卡采集长度可以设置为16 MS,这样采集一次数据,将处理8个工频周期



(a)100个点的时域波形和频域波形



(b)200个点的时域波形和频域波形



(c)400个点的时域波形和频域波形

图3 不同长度设置移动提取窗的脉冲提取效果

Fig.3 The same PD pulse waveshape extracted with different length of MEW

的局放数据。在系统处理100个工频周期以后,将获取足够多的局放脉冲数,则可以基于放电谱图的统计分析。

## 2 系统数据处理和维护

### 2.1 数据处理

系统数据处理的总体设计思路是:设置采集周期数,致使检测系统可以获取足够多的脉冲个数用于统计分析。针对由脉冲波形组成的脉冲群,首先使用快速分类技术<sup>[6]</sup>对脉冲群进行分类,得到若干个子脉冲群。然后导出各子脉冲的峰值—相位分布的放电谱图并显示,再计算出这些谱图的放电指纹,它由38个统计算子组成(放电谱图及统计算子见第3节)识别样本文件。各子类的识别样本文件与指纹库中存放的标准缺陷类型对应的放电指纹样本文件相比较,实现放电类型的自动识别,从而给出各个子类的识别结果(无用数据或某种放电模式)。整个检测系统软件的数据流程见图4。

### 2.2 放电指纹库维护

放电指纹库是识别时进行数据比较的依据,对于模式判别具有十分重要的意义。因为局放源的识别原理中,任何方法都是根据放电指纹库中已知放电类型样本对未知放电类型进行识别。若放电指纹库中的信息不全或者没有某一放电类型的指纹信息,则对属于该类的待检放电就无法识别。

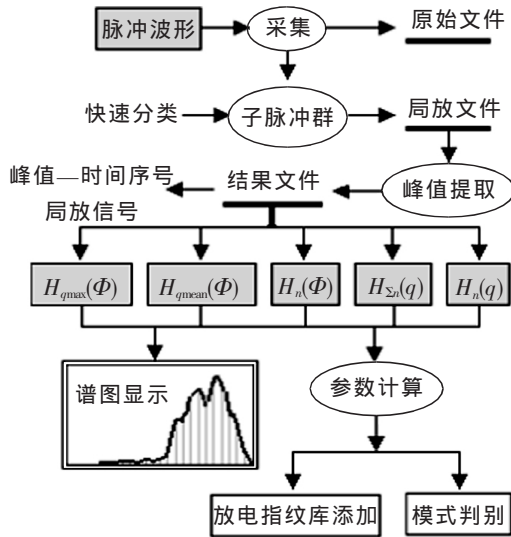


图 4 系统数据处理流程

Fig.4 Schematic of data processing of measurement system

考虑到原始数据和不同的放电类型在实际应用中将不断积累, 笔者采用了较为开放的放电指纹库管理方式<sup>[2,10]</sup>, 采用从大到小的指纹库存放格式, 形成了一个完善的指纹库管理和维护系统。总体上采用“设备级—故障级—指纹级”的结构, 增加了系统的灵活性, 见图 5。在实际应用中, 当用户在不同的级别获得新的有价值的的数据时即可向相应的级别进行数据添加, 这样大大提高了系统的可扩充性。

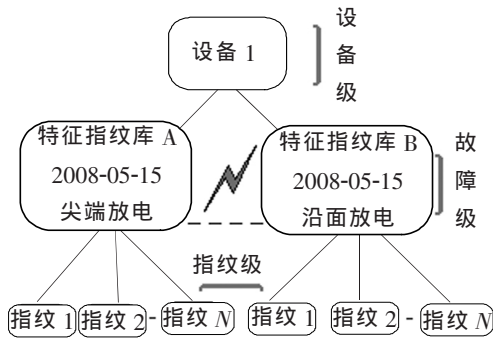


图 5 放电指纹库管理

Fig.5 Management of fingerprint database

### 3 放电谱图及统计算子

系统采用了  $H_{qmax}(\varphi)$ 、 $H_{qmean}(\varphi)$ 、 $H_n(\varphi)$ 、 $H_n(q)$  和  $H_{\Sigma_n}(q)$  5 种重要的二维放电谱图和 6 个统计算子。除 5 个常用统计算子: 偏斜度  $Sk$ 、突出度  $Ku$ 、局部峰个数  $Pk$ 、不对称度  $Asy$  以及相关度  $CC$ , 还添加了中值  $Mv$ , 共包括如表 1 所示的 38 个统计算子。其中  $H_n(q)$  和  $H_{\Sigma_n}(q)$  谱图的横坐标(放电幅值  $q$ )需要进行归一化, 从而避免不同电压以及缺陷结构尺寸对放电谱图  $H_n(q)$  和  $H_{\Sigma_n}(q)$  对应中值的影响。中值  $Mv$  计算见式(2)。

$$Mv = \sum x_i \times p_i \quad (2)$$

式(2)中,  $x_i$  为离散值;  $p_i$  表示  $x_i$  出现的概率。其他统计算子的详细计算见文[15]。

表 1 放电谱图及其统计算子

Tab.1 Histograms of PD and their statistic parameters

放电谱图	统计算子
$H_{qmax}(\varphi)$	$Sk^{+-}, Ku^{+-}, Pk^{+-}, Asy, CC, Mv^{+-}$
$H_{qmean}(\varphi)$	$Sk^{+-}, Ku^{+-}, Pk^{+-}, Asy, CC, Mv^{+-}$
$H_n(\varphi)$	$Sk^{+-}, Ku^{+-}, Pk^{+-}, Asy, CC, Mv^{+-}$
$H_n(q)$	$Sk, Ku, Pk, Mv$
$H_{\Sigma_n}(q)$	$Sk, Ku, Pk, Mv$

### 4 GIS 应用实例

为了验证由上述检测系统处理实测数据的能力, 笔者对 220 kV 电压等级的 GIS 装置内部设置人工缺陷进行局部放电试验, 产生具有相位特征分布的局部放电序列, 以区别于其他干扰脉冲源信号。

#### 4.1 母线尖刺放电

试验时, GIS 内部  $SF_6$  气体相对气压为 0.35 MPa, 在母线上使用螺纹连接一金属突出物以模拟尖端放电。检测系统采样率设置为 100 MS/s, MEW 脉冲波形记录长度设置为 100 个点(1  $\mu$ s)、脉冲阈值设置为 10 mV。在某个试验电压下, 脉冲检测系统采集 100 个工频周期获取的脉冲峰值—时间序列见图 6。

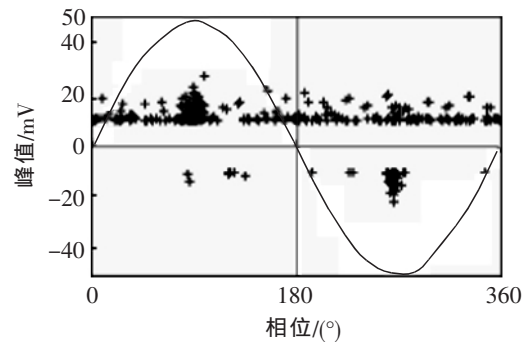


图 6 脉冲群峰值相位分布

Fig.6 Peak-phase distribution of pulse sequence

图 6 所示峰值—相位分布对应脉冲群的脉冲波形—时间序列由等效时频特征提取及聚类分析后<sup>[6]</sup>的分类结果见图 7。等效时频特征平面上明显分 2 个子类。各子类脉冲群对应的峰值—相位序列见图 8。子类 A 和子类 B 对应的典型单个脉冲时域波形和频域波形见图 9。

类 A 子脉冲群对应的峰值—相位分布具有明显的尖端放电相位分布特征, 其对应表 1 所示的放电谱图见图 10。而类 B 脉冲波形类似为局放脉冲波

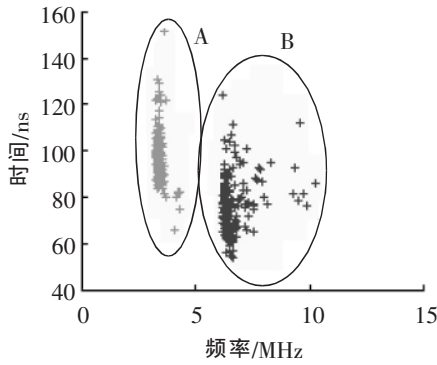
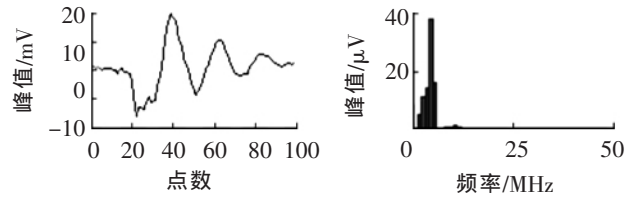
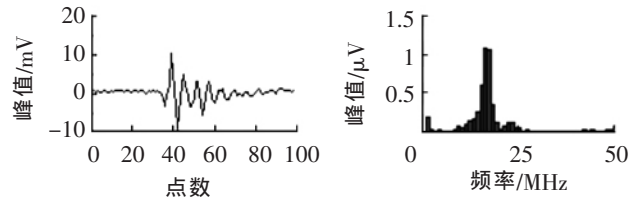


图7 脉冲群等效时频特征分布及聚类分析结果

Fig.7 Time-frequency distribution of pulse sequence and its clustering results



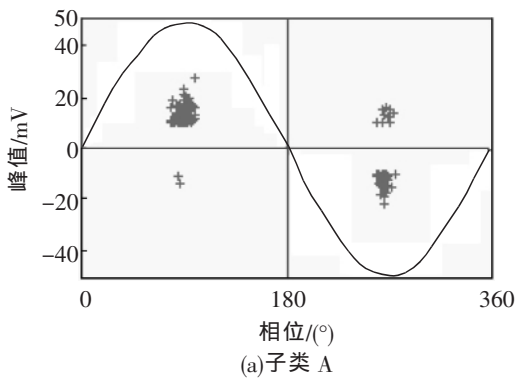
(a)子类 A



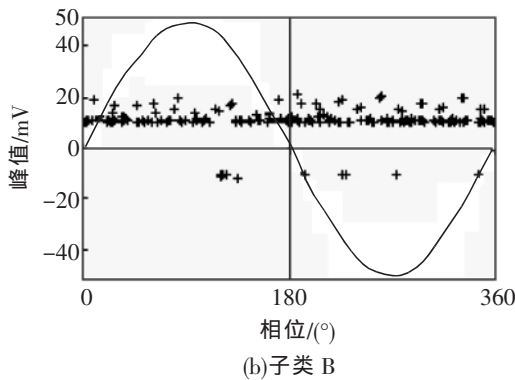
(b)子类 B

图9 各子类典型时域波形和频域波形

Fig.9 Typical PD pulse wavshepe in time and frequency domain of each sub-group



(a)子类 A



(b)子类 B

图8 各子类峰值—相位分布

Fig.8 Peak-phase distribution of each sub-group

形,但其峰值—相位分布无明显的相位特征分布,其对应表1所示的放电谱图见图11。从图6-11可以得出,基于脉冲波形的脉冲群实用快速分类技术具有很好的抗干扰技术,适用于局部放电检测与分类。

利用表1所示统计算子对图10、11两个子类的放电谱图提取的放电指纹见图12。对图12(a)所示的放电指纹文件,系统识别该放电模式为尖端放电。而对图12(b)所示的放电指纹文件,系统识别该放电模式为无效数据。在以后的试验中同样也没有发现由该脉冲波形(见图9(b))组成的脉冲群,可判断其为外部随机干扰脉冲。

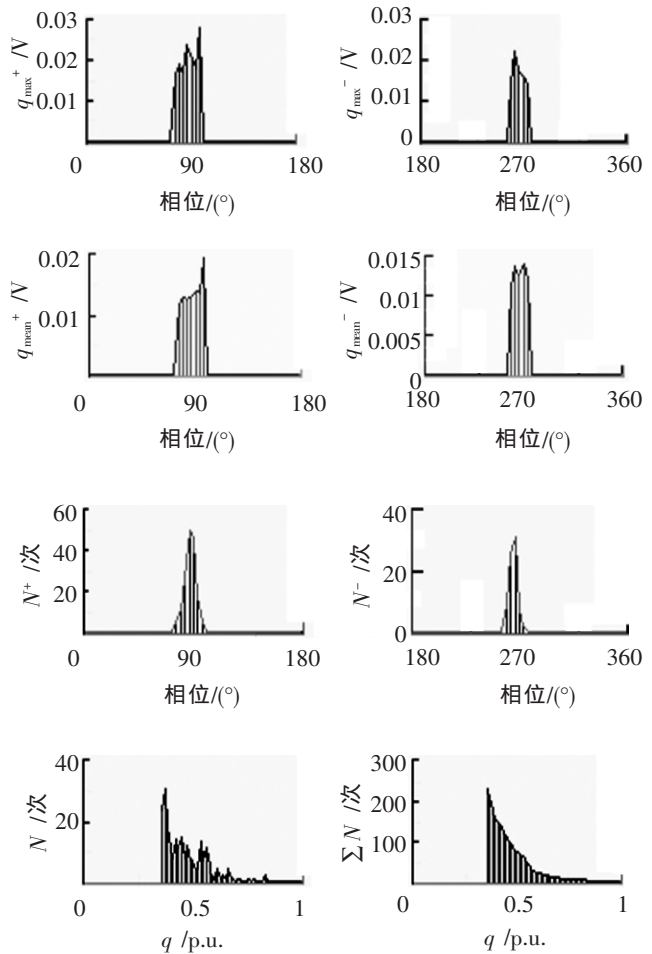


图10 类A的放电谱图

Fig.10 Histograms of PRPD and MSD of sub-group A

### 4.2 筒壁尖刺放电

该缺陷模型试验时,GIS内部SF<sub>6</sub>气体相对气压为0.35 MPa,系统采样率设置为100 MS/s,MEW脉冲波形记录长度设置为200个点(2 μs)。检测系统

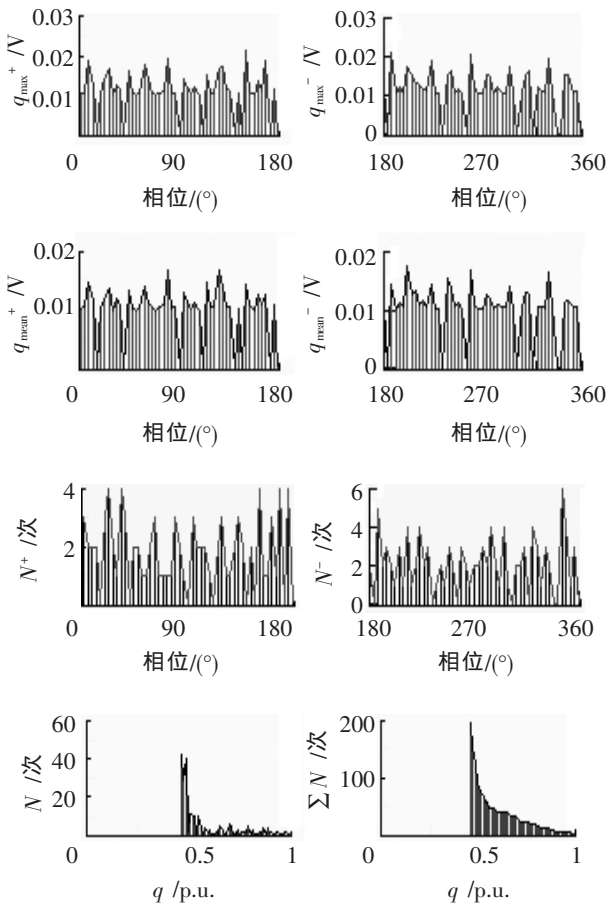


图 11 类 B 的放电谱图

Fig.11 Histograms of PRPD and MSD of sub-group B

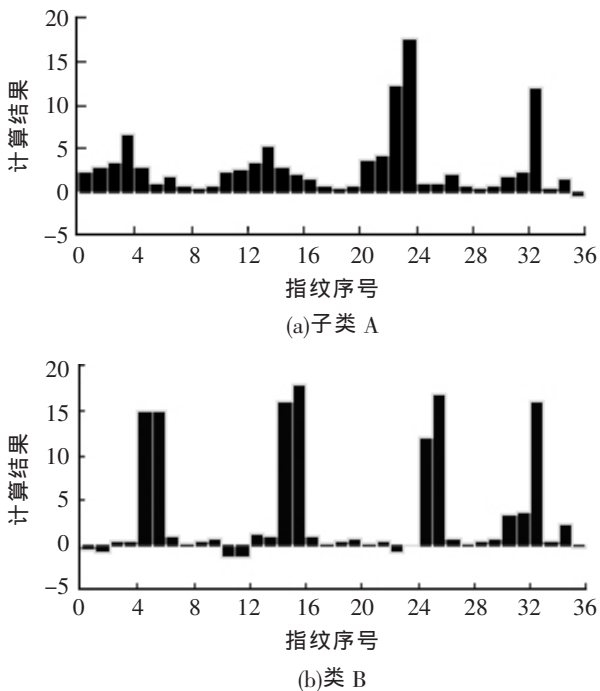


图 12 各子类放电指纹

Fig.12 PD fingerprints of each sub-group

脉冲阈值设置为 5 mV。

在某个试验电压下, 利用研制的检测系统采集

100 个工频周期获取的脉冲峰值—相位序列见图 13。由于筒壁尖刺缺陷自身结构的原因, 试验电压在很高幅值的情况下才开始放电, 此时 GIS 套管接线处早已经发生电晕, 即图 13 所示峰值—相位分布在 270°相位出首先出现局部放电。

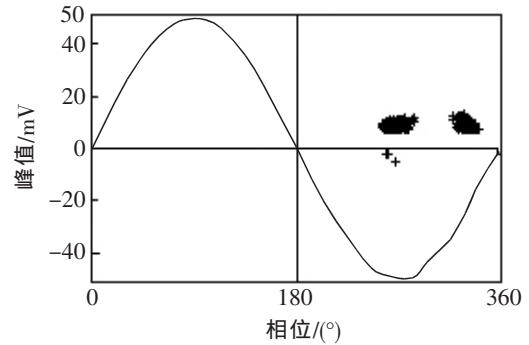


图 13 脉冲群峰值—相位分布

Fig.13 Peak-phase distribution of pulse sequence

图 13 峰值—相位分布对应脉冲群的脉冲波形—时间序列由等效时频特征提取及聚类分析后<sup>[6]</sup>的分类结果见图 14。脉冲群对应的波形特征向量在等效时频面上的分布明显为 2 类, 分布特征与图 13 所示脉冲群峰值—相位分布相对应。类 A 子脉冲群对应峰值—相位分布及其时域和频域波形见图 15 (a)和图 16(a); 类 B 子脉冲群对应峰值—相位分布及其时域和频域波形见图 15(b)和图 16(b)。图 15 对应的放电谱图(限于篇幅, 这里省略提取的放电指纹样本文件见图 17。系统判别该两子类脉冲群均为尖端放电(电晕), 但为了区别筒壁尖刺放电和其他形式的尖端放电, 检测系统则添加了相位分布中心值。

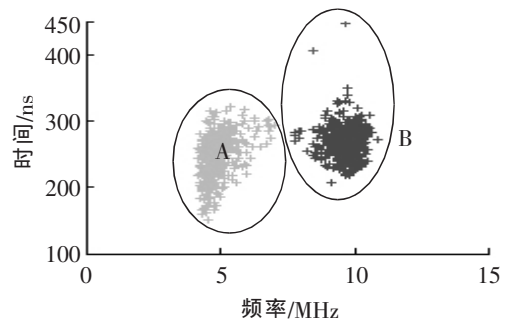


图 14 脉冲群等效时频特征分布

Fig.14 Time-frequency distribution of pulse sequence

GIS 筒壁尖刺电极的局部放电试验再次表明研制的交流局部放电宽带检测与分析仪具有实用性和可靠性。

## 5 结语

笔者系统地介绍了一种新型交流宽带局部放电

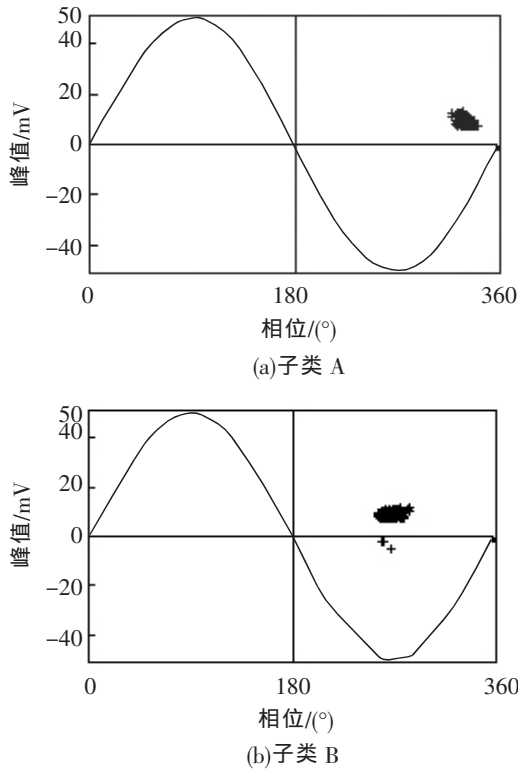


图 15 各子类峰值—相位分布

Fig.15 Peak-phase distribution of each sub-group

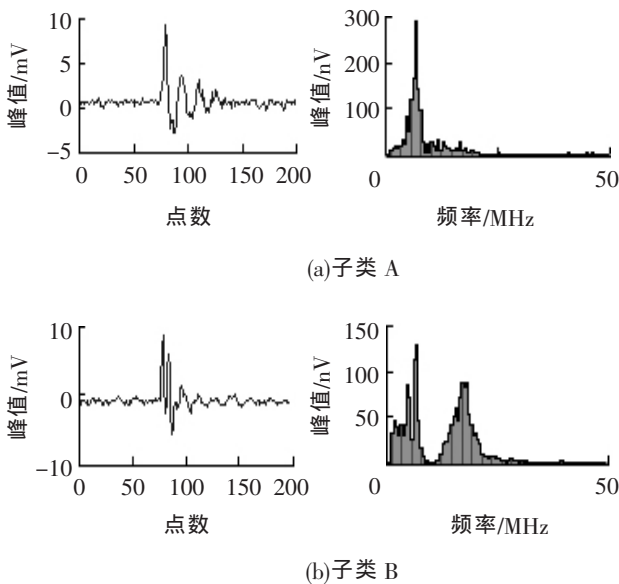


图 16 各子类典型时域和频域波形

Fig.16 Typical PD pulse waveshape in time and frequency domain of each sub-group

检测与分析仪的研制方法，主要包括检测系统工作原理、系统数据处理流程和放电指纹库维护。该检测与分析仪具有基于 NI5112 高速示波采集卡和前置信号处理单元实现的采样率为 100 MS/s、模拟宽带为 10 kHz~40 MHz 的局部放电脉冲宽带检测技术，基于脉冲波形时频特征的脉冲群实用快速分类技术

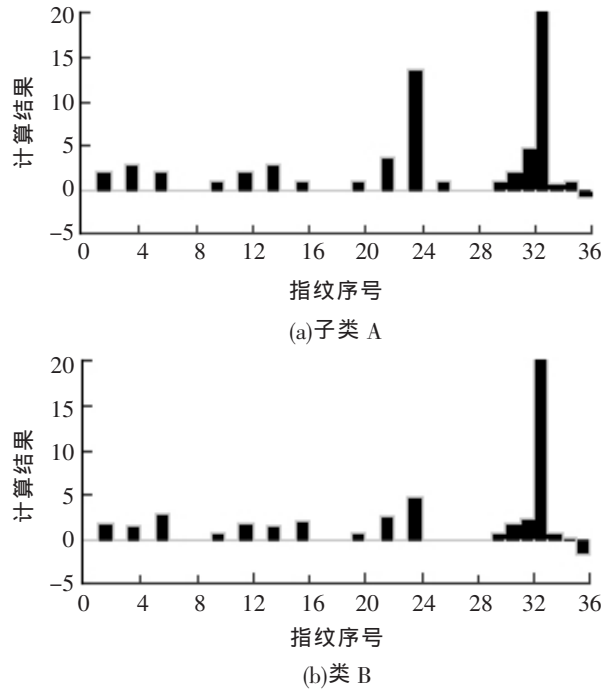


图 17 各子类放电指纹

Fig.17 PD fingerprints of each sub-group

以及基于 PRPD 和幅值统计分布谱图的放电识别技术。220 kV 电压等级的 GIS 的母线尖刺和筒壁尖刺放电试验结果分析表明，研制的检测以具有抗干扰能力强、放电识别准确，并能够解决和处理多局放源问题。

参考文献:

- [1] 刘光斌, 吴少军, 邱昌容, 等. 便携式多参数局部放电检测分析仪的研制[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 35-36. LIU Guang-bin, WU Shao-jun, QIU Chang-rong, et al. Development of the portable multi-parameters PD measuring and analysis device [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 35-36.
- [2] 王国利, 袁 鹏, 李彦明, 等. 变压器超高频局部放电自动识别系统[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(1): 9-13. WANG Guo-li, YUAN Peng, LI Yan-ming, et al. An automated recognition system of ultra-high-frequency PD in transformers [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(1): 9-13.
- [3] 王国利, 袁 鹏, 李彦明, 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, 24(10): 115-120. WANG Guo-li, YUAN Peng, LI Yan-ming, et al. Application of frequency mixing technique of ultra-high-frequency PD detection for transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10):115-120.
- [4] 刘云鹏, 李燕青, 陈志业, 等. 变压器局部放电测量系统的设计与实现[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 32-34.

- LIU Yun-peng, LI Yan-qing, CHEN Zhi-ye, et al. Design and realization of measurement system of partial discharge in transformer [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(1): 32-34.
- [5] 张晓星, 唐 炬, 孙才新, 等. 基于多重分形维数的GIS局部放电模式识别[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 597-601.
- ZHANG Xiao-xing, TANG Ju, SUN Cai-xin, et al. PD pattern recognition based on multi-fractal dimensions in GIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 597-601.
- [6] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Fast feature extraction technique for PD pulse shape based on wideband detection [J]. Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy, 2008, 27(2): 11-15.
- [7] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 局部放电脉冲群的实用快速分类技术及应用[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 1021-1025.
- SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Fast and practical grouping technique for partial discharge pulse sequence and its application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 1021-1025.
- [8] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 气体绝缘组合电器多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.
- SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Detection and identification techniques for multi-PD source in GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [9] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Study on 2D feature extraction method for PD pulse waveshape[C]//RIUGCEE(CSEE, CES), Xi'an: [s.n.], 2008: 1-3.
- [10] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Digital detection grouping and classification of partial discharge at DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1663-1674.
- [11] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Feature extraction methods for time frequency energy distribution of PD pulse [C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing: [s.n.], 2008: 82-84.
- [12] CONTIN A, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 335-348.
- [13] CAVALLINI A, MONTANARI G C, CONTIN A, et al. A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 23-30.
- [14] CAVALLINI A, MONTANARI G C, PULETTI F. A fuzzy logic algorithm to detect electrical trees in polymeric insulation systems [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1134-1144.
- [15] 司文荣. 直流下油纸绝缘系统局部放电检测、分类与识别技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- SI Wen-rong. Study on oil-paper insulation system partial discharge detection, classification and recognition technology under DC [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [16] 孙才新, 李 新, 李 剑, 等. 小波与分形理论的互补性及其在局部放电模式识别中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 73-76.
- SUN Cai-xin, LI Xin, LI Jian, et al. Research on complementarily between wavelet and fractal theory and relevant application in PD pattern recognition [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 73-76.
- [17] 姜 磊, 朱德恒, 谈克雄, 等. 基于人工神经网络的变压器绝缘模型放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 21-24.
- JIANG Lei, ZHU De-heng, TAN Ke-xiong, et al. Ann based discharge pattern recognition of insulation models of electrical transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 21-24.
- [18] 倪远平, 李彬华, 周建华, 等. 基于模式神经网络的故障诊断方法及应用[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 31-34.
- NI Yuan-ping, LI Bin-hua, ZHOU Jian-hua, et al. One method for fault diagnosis and its application based on fuzzy neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 31-34.

邓鸿岳(1970—),男,开关专责,标准化主管,主要从事开关设备管理维护工作。

(上接第 17 页)

- [12] 林 莘, 田 驰. 超高压 GIS 隔离开关操作引起 VFTO 的研究[J]. 高压开关行业通讯, 2008(2): 36-39.
- LIN Xin, TIAN Chi. Research on very fast transient overvoltage caused by disconnecter in EHV GIS[M]. High Voltage Switchgear Reviw, 2008(2): 36-39.
- [13] FUJIMOTO N, DICK E P, BOGGS S A. Transient ground potential rises in gas insulated substations-experimental studies [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3603-3609.
- [14] 张纬钊, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- ZHANG Wei-bo, HE Jin-liang, GAO Yu-ming. Over-voltage protection and insulation coordination[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- 林 莘(1961—),女,教授、博士生导师,从事高电压与绝缘技术、高压电器、智能化电器等方面的教学和科研工作。