

电力设备局部放电信号的在线检测系统研究

王平¹, 许琴¹, 王林泓², 王鹏¹, 文军¹, 何为¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: 主要研究了以光学信号为基础的电力设备局部放电的在线检测系统。由于电力设备发生局部放电时会辐射频带很宽的光谱信号, 通过检测电力设备辐射的太阳光谱的紫外盲区信号, 可以推断电力设备绝缘是否发生破损, 并配合 USB 光学摄像头可实现电力设备内部局部放电状况的视频检查。实验研究表明: 本系统对检测电力设备局部放电信号具有快速直观、灵敏度高、抗干扰性强等优点。

关键词: 电力设备; 光学信号; 在线检测; 局部放电; 视频图像

Research of on-line detection system for partial discharge signal of power equipments

WANG Ping¹, XU Qin¹, WANG Lin-hong², WANG Peng¹, WEN Jun¹, HE Wei¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: The on-line detection system based on optical signal is introduced, which can detect the internal partial discharge of power equipment. Since the partial discharge will radiate spectrum signal with wide band, through detecting UV blind signal, it can also roughly evaluate the on-line power equipment and analyze the breakage status of internal insulating material. By combining USB camera with UV sensor in probe, the UV detection system can acquire the internal information of power equipment. Experimental results show that the UV detection system has advantages in detecting partial discharge such as quickness, high sensitivity, anti-interference performance and so on.

Key words: power equipment; optical signal; on-line detection; partial discharge; video image

中图分类号: TM769 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0190-05

0 引言

随着输变电电压等级的提高, 电力设备的电压越来越高, 对电力设备的绝缘性能要求越来越高。在这些设备中, 由于电极和绝缘表面存在的缺陷, 导线外绝缘损伤或老化等原因可能造成电力设备局部放电, 如果此类故障得不到及时处理, 有可能会造成绝缘的最终击穿与失效, 甚至造成电力设备的损坏。为预防这类事故的发生, 在不影响正常输变电情况下, 电力设备局部放电的在线检测就显得十分必要^[1]。

在局部放电的过程中, 由于各种电离、激发和复合过程中除了伴随着电荷的转移和电能的损耗之

外, 还会产生电磁辐射、超声、发光、发热以及出现新的生成物等。因此针对局部放电的这些现象, 局部放电检测的基本方法分为电气测量法和非电气测量法两大类。电气测量法主要有脉冲电流法、特高频检测法等。国内不少单位研制的局部放电检测装置普遍采用这种方法来提取放电信号, 但实际应用效果往往不够理想, 主要原因是现场电气噪声干扰太大, 以致很难获取真正的局部放电信号。虽然目前抑制干扰的方法和思路很多, 但真正成功地用于监测系统的并不多, 因此需要在理论和应用方面作进一步的研究和完善。

非电气测量法主要包括超声波检测法^[2]、光测量法、红外检测法^[3]、化学检测法等, 这些方法的优点是测量中不受电气信号的干扰, 抗干扰能力强, 在某些场合得到了广泛的应用。相应的检测设备有: 超声波探测仪、紫外成像仪、红外热像仪、变压器

基金项目: 重庆大学国家大学生创新性实验计划项目资助 (081061101)

油分析仪等。考虑到局部放电过程中,由于各种电离、激发和复合过程中均伴随有光的辐射,对局部放电所辐射的光进行检测也是一种电晕放电的检测方法^[4]。例如:一台正常工作的高压电力设备内部一般不存在也不会产生波长在220~280 nm的紫外光,当电气设备内部发生局部放电时,会辐射出紫外光,应用紫外传感器探测电气设备内部的紫外信号,并结合光学成像技术就能灵敏而准确地检测到电气设备内部人眼和常规设备不能直接探测到的局部放电现象,从而帮助现场工作人员迅速定位放电点,及时发现电气设备内部的故障并及早地排除险情,做到防患于未然。

1 工作原理

高压设备发生局部放电时,根据电场强度的不同,会产生不同形式的放电。电离过程中,空气中的电子不断获得和释放能量,通过光谱分析发现,当电子释放能量时会辐射出光波和声波,而辐射出的光谱包括紫外、可见光、红外三个谱段,随着外加电压的增加,局部放电所辐射光谱在紫外区域也随之增强^[4-6]。所以采用紫外信号作为检测局部放电的手段,其主要优势表现在两个方面:

(1) 灵敏度高:由于高压电力设备局部放电产生的紫外光谱主要集中在200~400 nm以下波段,如图1所示。空气中太阳辐射的波长范围很宽,但波长在220~280 nm之间的成分几乎被地球的臭氧层完全吸收,波长在300 nm以下的“太阳光谱盲区”的紫外辐射已经变得极其微弱^[7]。本系统选择工作在220~280 nm波段的紫外传感器UV-R2868作为检测传感器,其灵敏度可以达到5 000 cpm,仅响应185~265 nm波段的紫外信号,如图1中的斜线区域所示。

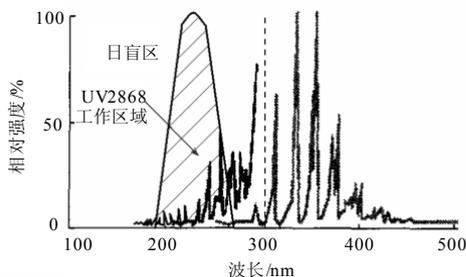


图1 典型的电力设备局部放电光谱

Fig.1 Typical spectrum of power equipment partial discharge

(2) 抗干扰能力强:由于电力设备内部通常是封闭的黑匣环境,正常工作时,设备内部具有很强的电磁干扰,没有紫外信号的存在。由于周围环境

中几乎不存在波长在220~280 nm的紫外光,因此利用该波段的紫外辐射信号作为检测对象几乎不受外界环境光的影响。例如,在正常工作的干式变压器中,如果在其内部检测到该波段的紫外信号,那么只能是电力设备内部的局部放电产生。所以本方法是以特定波段的紫外光信号作为检测对象,由于传感器本身对各种电磁信号不敏感,所以采用紫外光学信号检测系统的抗干扰能力很强。

2 局部放电信号检测的硬件系统设计

硬件检测系统选用了日本HAMAMATSU公司的UV探测传感器UV-R2868,图2是其在各种光源下的光谱响应特性曲线。

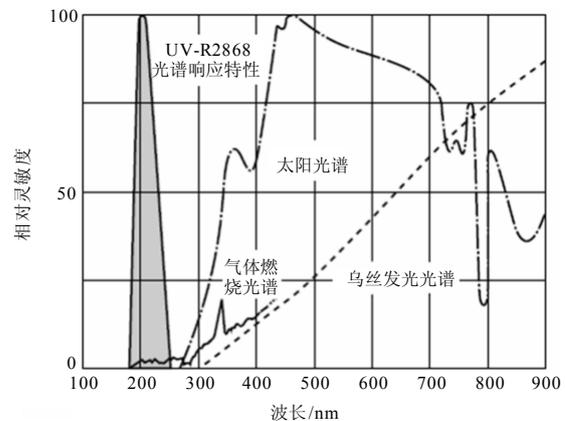


图2 UV-R2868对各种光源的光谱响应特性

Fig.2 Spectral response of UV-R2868

UV-R2868 是利用紫外信号通过金属的光电效应和瓦斯乘法效应来检测局部放电点的。图2中可以看出,UV-R2868 仅仅对185 nm到260 nm狭窄的紫外光谱敏感,对可见光以及其他光源发出的光没有反应。所以利用UV-R2868检测局部放电时所辐射出的紫外信号具有抗干扰性强、灵敏度高的特点。局部放电检测系统的核心是紫外信号检测探头,其原理框图如图3所示。

工作原理:高压电源模块经电阻R1、R2为紫外传感器UV-R2868的阴阳极之间提供300 V左右的高压,当有微弱的紫外光照射到UV-R2868传感器时,在它内部的阳极和光电阴极之间就会形成很大的电流并产生放电,形成电子繁流现象,从而使传感器UV-R2868导通,电容C1经R2、R3进行放电,在R3正端输出紫外放电脉冲信号,在UV-R2868导通电容C1放电的过程中,UV-R2868的阳极和光电阴极之间的电压迅速下降,当电压下降到一定的程度,UV-R2868关断,这时高压电容C1继续充电,当C1两端的充电电压达到UV-R2868工作电压时,

如果此时再次检测到紫外信号，则 UV-R2868 再次导通，整个过程循环往复就输出了一系列的紫外放电脉冲信号，紫外信号的检测与输出过程如图 4 所示。

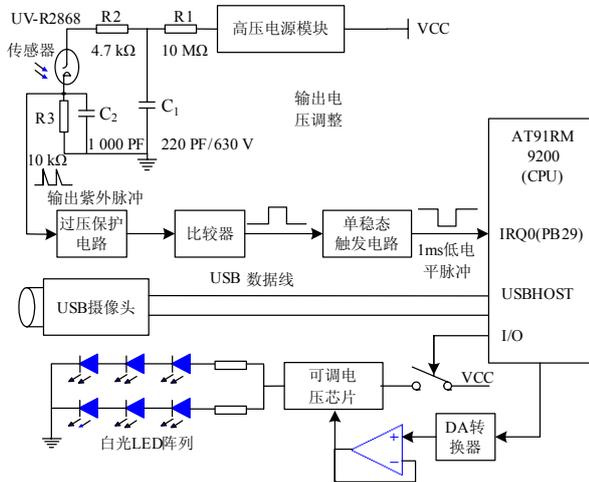


图 3 紫外信号检测探头原理框图

Fig.3 Block diagram of UV detection probe

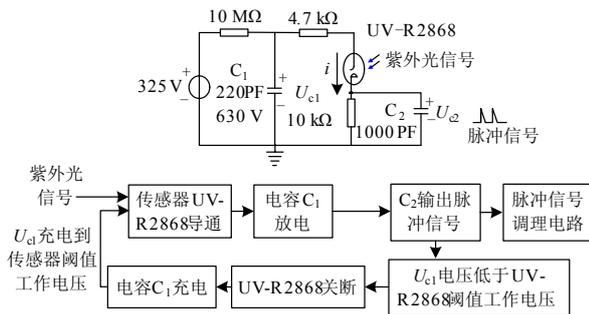


图 4 紫外信号的检测原理框图

Fig.4 Block diagram of UV detection

电容 C_2 输出脉冲信号经过压保护电路，比较器整形电路进行比较，通过对比较器设定适当的阈值电压，抑制检测系统噪声造成比较器的误输出，这样比较器就可以输出 TTL 电平的方波信号，但是这时输出的方波信号持续时间在微秒级，将此方波信号通过单稳态触发电路对波形宽度进行调整后就可以得到标准的 1 ms 低电平方波输出，该输出连接至 CPU 的中断 I/O 口就可以很容易地进行检测与识别了。由于选择的紫外传感器 UV-R2868 对紫外辐射信号具有一定的角度灵敏性，其择向性的特点如图 5 所示。

在实际的检测中，由于某些电力设备（例如干式变压器）内部存在局部放电现象，局部放电时所辐射的紫外信号被机壳所屏蔽，可以将检测探头放入内部，利用紫外传感器角度灵敏度特性的特点，

能够发现局部放电点的大致位置，并配合 USB 摄像头则可以观察到局部放电点的具体位置。由于大多数电力设备内部没有光源，所以在本系统的紫外信号检测探头采用自动光源调节技术。通过视频图像的反馈，操作人员可以通过控制 DA 转换器的输出电压，实现白光 LED 阵列的输出光源增强，从而达到为 USB 摄像头提供光源的目的。通过光源调节有助于提高视频图像的效果，帮助检测人员准确发现并定位局部放电点。

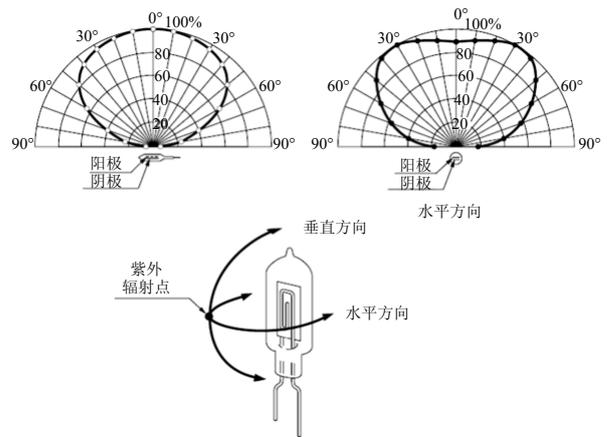


图 5 UV-R2868 的角度灵敏度特性

Fig.5 Angular sensitivity of UV-R2868

3 在线检测系统软件设计与实现

为了实现紫外信号检测系统可视化图形界面和应用程序的研发，选择的软件操作系统方案为：Linux + Qtopia。

在本系统中采用了内存映射的方法。首先使用 `vmalloc()` 申请足够大的核态内存，将其作为图像数据缓冲空间，两个 URB 带回的图像数据在这里暂存；然后使用 `remap_page_range()` 函数将其逐页映射到用户空间中。户态的图像处理程序使用 `mmap()` 函数，直接读写核态图像缓冲内存，从而大大减小 CPU 的额外开销，所以 `mmap()` 方式加速了 I/O 访问^[8-9]，提高了图像数据的采集效率。实际测试表明，在 320×240 的图像分辨率下，该检测系统的视频速度能够达到 10 帧/s，基本能够满足实用要求。

紫外信号检测的软件实现和视频采集类似，首先需要编写紫外信号检测的驱动程序，在启动脚本 `rcS` 中添加：`insmod/usr/lib/ultraviolet.o`，这样在 Linux 系统启动的时候就会自动加载紫外信号检测的驱动。应用程序先打开紫外设备文件，启动系统定时器，在定时器内通过调用驱动程序中的 `ioctl()` 查询紫外信号的脉冲计数值，系统读取单位时间内的紫外

脉冲计数数据,并将检测数据和测量的相关信息交给主线程进行处理。

本文设计的电力设备非接触在线检测系统软件程序采用了多线程结构,主线程的工作是图形界面用户接口的响应,数据采集线程的主要工作是采集图像数据和紫外放电的检测数据,采集完成后发送消息给主线程进行图形化显示,整个系统的软件流程如图6所示。

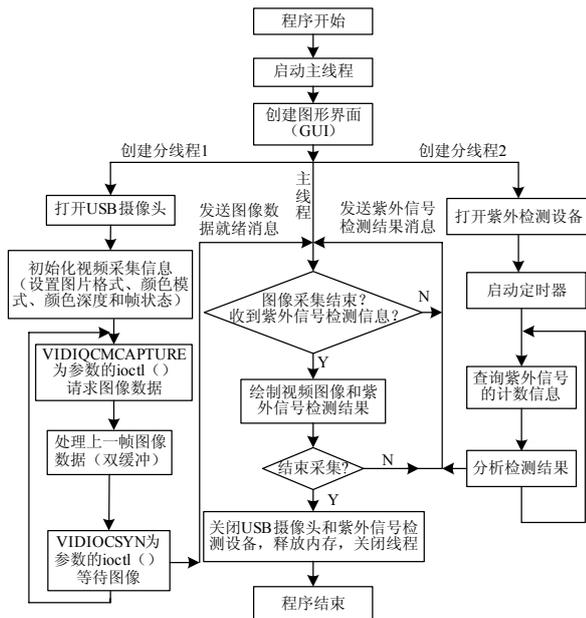


图6 系统软件流程图

Fig.6 Flow chart of system software

4 实验验证

实验1: 可靠性与灵敏度测试

为验证本系统对局部放电检测的可靠性与检测系统的灵敏度,进行了如下实验:

(1) 选择普通家用天然气电子打火枪作为局部放电设备;

(2) 电子打火枪在距离检测探头 5 m 远处放电;

(3) 局部放电点与探头之间增加阻挡紫外信号辐射的障碍物;

(4) 利用其他工业现场的光源进行干扰测试。

实验结果:当局部放电点的紫外辐射信号被障碍物阻挡时,将不能检测到局部放电现象。当局部放电点与检测探头之间没有障碍物时,该检测探头可以准确探测 5 m 远处局部放电(电子打火枪放电)时所辐射的微弱紫外信号,并输出低电平脉冲信号触发 CPU 中断,从而输出报警信号。在测试过程中,传感器对常见的白炽灯、日光灯光源没有任何反应,

但是对紫外信号的检测非常准确,几乎没有误输出的情况发生,其灵敏度远高于常规电磁信号检测方法。

实验2: 电力设备内部局部放电检测

为检验本系统判断大型电力设备内部是否存在局部放电和放电位置的性能,对该系统进行了现场测试和实验验证,具体过程如下:

(1) 选择密闭的900 kVA/150 kV单相试验变压器;

(2) 在变压器经常可能发生局部放电的位置进行人为的模拟局部放电;

(3) 放入紫外信号检测探头进行检测。

由于紫外传感器有一定的择向性,这时需要不断地调整探头的方向,并配合带自动光源调节的USB摄像头,可以看到局部放电点的位置,本次实验的检测结果如图7所示。从图中可以看出,当局部放电发生时,在UV栏中显示检测到的紫外脉冲信号,在UV栏的上方为采集到的局部放电的视频图像,界面的右边为系统信息和检测的结果。

应当指出,大型电力设备的实际结构比上述单相变压器复杂得多,而且三相都是独立的空间,相互不贯通,在实际采用本系统时,尚须对整个检测系统的相关参数进行完善,加上遮光漏斗,提高方向性,并需要对检测探头和线缆的绝缘耐压等级做进一步的改进和提高才可能应用到工程实际中。

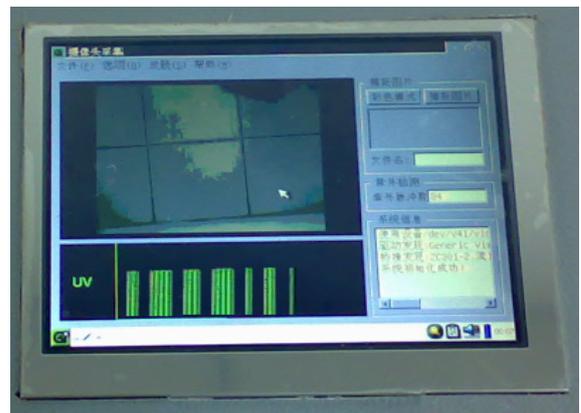


图7 局部放电检测实验结果

Fig.7 Experimental results of flow diagram of partial discharge

5 结论

本检测系统是以紫外光信号检测为基本原理,通过方案设计、系统制作和现场实验,验证了该系统能准确地检测出电力设备的局部放电,并能以视频图像的方式快速定位电力设备内部故障位置点,从而降低了设备的检修与维护难度。

从实验 1、2 可以看出,本检测系统以局部放电点辐射的紫外信号作为检测对象,当电力设备故障点局部放电所辐射的紫外信号被屏蔽时,该系统将不能进行有效地探测,而对于电力设备内部裸露端子的局部放电则可以进行准确的在线检测,并以光学图像的方式定位故障位置。所以以紫外光信号为检测手段,适合电力设备表面,裸露端子连接处局部放电点的故障检测,同时也将为电力设备局部放电检测提供一种新的参考手段。

参考文献

[1] 王光辉,于丰友. 10 kV 干式互感器局部放电试验必要性的探讨[J]. 河北电力技术, 2006, 25 (2): 10-11.
WANG Guang-hui, YU Feng-you. Discussion on the partial discharge detection importance of 10 kV dry-type transformer[J]. Hebei Electric Power, 2006, 25 (2): 10-11.

[2] 林介东,胡平,马庆增,等. 500 kV 增城变电站变压器局部放电的声发射检测[J]. 广东电力, 2006, 19(5): 53-56.
LIN Jie-dong, HU Ping, MA Qing-zeng, et al. Acoustic emission detection of power transformer partial discharge in 500 kV Zengcheng substation[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19 (5): 53-56.

[3] 陈晓军,杨立中,邓志华,等. 电气线路红外热像检测和诊断[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19 (6): 463-466.
CHEN Xiao-jun, YANG Li-zhong, DENG Zhi-hua, et al. Test and diagnosis of electric circuitry by IR thermal image[J]. J Infrared Millm Waves, 2000, 19(6): 463-466.

[4] 赵文华,张旭东,姜建国,等. 尖板电晕放电光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23 (5): 955-957.
ZHAO Wen-hua, ZHANG Xu-dong, JIANG Jian-guo, et al. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003, 23 (5): 955-957.

[5] 王文春,刘东平,吴燕. 空气中电晕放电高能电子密度沿反应器分布的光谱研究[J]. 分子科学学报, 1999, 15 (3): 125-128.

WANG Wen-chun, LIU Dong-ping, WU Yan. A study of density distributions of high energy electrons produced from corona discharge in the air along the radial of reactor by advanced emission spectral method[J]. Journal of Molecular Science, 1999, 15 (3): 125-128.

[6] 王文春,刘峰,张家良,等. 利用发射光谱研究脉冲电晕放电中的自由基[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24 (11): 1289-1292.
WANG Wen-chun, LIU Feng, ZHANG Jia-liang, et al. Study of radicals in pulsed corona discharge by emission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24 (11): 1289-1292.

[7] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 4 (14): 709-713.
YAN Feng, YU Zi-jiang, YU Xiao, et al. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 4 (14): 709-713.

[8] 王滔,于洁. Linux 系统下 USB 摄像头驱动开发[J]. 电子技术应用, 2004, 11: 8-10.
WANG Tao, YU Jie. The development of USB camera driver in Linux[J]. Application of Electronic Technique, 2004, 11: 8-10.

[9] 冯丽芳,孙俊,周俊华,等. 基于 ARM9 的网络视频监控系统的实现[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (10): 95-97.
FENG Li-fang, SUN Jun, ZHOU Jun-hua, et al. Network video monitoring system based on ARM9[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (10): 95-97.

收稿日期: 2009-12-19; 修回日期: 2010-01-15

作者简介:

王平(1976-),男,博士,讲师,主要从事局部放电检测、嵌入式计算机系统等方面的研究; E-mail: cqu_dq@163.com

许琴(1986-),女,硕士研究生,主要从事嵌入式计算机软件系统的程序设计与相关研究工作;

王林泓(1974-),女,博士研究生,主要从事光学信号的检测与研究。

(上接第 171 页 continued from page 171)

[2] 邹思轶. 嵌入式 Linux 设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[3] 胡志保,苗世洪. IEC60870-5-103 传输规约在微机保护装置中的实现[J]. 电气应用, 2007, 26 (6): 39-42.
HU Zhi-bao, MIAO Shi-hong. Realization of IEC60870-5-103 transmission protocol for microcomputer based protection devices[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26 (6): 39-42.

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-05-24

作者简介:

郑飞(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化; E-mail: zhengfei19840409@163.com

路建涛(1974-),男,本科,工程师,主要从事输变电设计;

高莉(1968-),女,硕士,高级工程师,主要从事电力系统配电网自动化的研究与管理。