

基于光电倍增管的高压电力设备放电检测系统的设计

黄晓博, 杨永明

(重庆大学输变电装备与系统安全及新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对目前电力设备放电紫外检测中存在的灵敏度和线性度上的不足, 设计了一种基于紫外光电倍增管的放电检测系统, 以 C8051F120 单片机为处理核心, 通过数字积分定量测量放电中产生的紫外辐射功率。通过试验室和变电站内的检测试验, 验证了该系统能够在站内实测中检测到放电产生的微弱紫外光并能定量反映紫外辐射的强度, 从而作为判断放电强弱的依据。该系统灵敏度高, 线性度好, 能够应用于高压电力设备的放电检测。

关键词: 光电倍增管; 放电; 紫外辐射; 高压电力设备

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0028-04

Design of Discharge Detection System Based on Photomultiplier Tube for HV Electric Equipments

HUANG Xiao-bo, YANG Yong-ming

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A discharge detection system based on photomultiplier tube was designed to improve sensitivity and linearity of UV detection of HV electric equipment discharge. The system with C8051F120 processor can measure the power of UV radiation in discharge via digital integration. Detection tests in both laboratory and transformer substation were conducted, and the results show that the system can detect weak UV light and quantitatively indicate the intensity of the UV radiation for evaluating the intensity of discharge. The discharge detection system has high sensitivity and linearity, and can be applied to discharge detection of HV electric equipments.

Key words: photomultiplier tube(PMT); discharge; UV radiation; HV electric equipments

0 引言

高压电力设备的绝缘要求很高, 需要检测和追踪设备的局部放电情况以保证系统的运行安全。对输电线路和变电设备运行中产生的放电进行检测具有重要的意义。

目前的高压电力设备放电检测一般通过红外成像仪、紫外成像仪、超声波探测仪等进行, 但存在成本高、操作复杂、灵敏度不足、对早期放电危险难以预报、不能定量表示放电程度等弱点。高压设备放电会辐射出紫外光, 通过检测紫外光的强度来评估放电的情况, 是检测高压设备放电的一种新方法^[1,2]。由于放电产生的紫外光信号在检测时不需要与运行设备直接接触, 而是在与设备相隔一定距离下进行, 紫外检测可以做到不停电、不影响系统运行状态, 并且其抗干扰能力也很强。

文[3-5]曾进行基于紫外脉冲法的绝缘子污秽状态监测和特高压放电检测的研究, 在取得一定成果的同时仍在检测灵敏度和放电强度的标定上存在一些问题。针对这些问题, 采用光电倍增管为传感器, 设计了以数字积分测量紫外辐射功率方式的高压设备放电检测系统, 并进行了电火花发生器放电检测、针板放电检测以及变电站内设备放电检测的试验研究。

1 方法原理

高压设备放电产生的紫外线大部分波长在 280~400 nm 的区域内, 小部分波长在 230~280 nm, 而太阳光中波长小于 280 nm 的部分紫外线几乎全部被大气中的臭氧所吸收, 此区间被称为日盲区^[6,7]。采用特定的紫外传感器, 使仪器工作在紫外波长的日盲区, 可去除日光的干扰, 对这部分波长的紫外线检测, 可作为评估设备放电大小的依据。

在文[3-5]进行的基于紫外脉冲法的绝缘子污

收稿日期: 2008-09-31; 修回日期: 2009-02-06

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2007BA3001)。

作者简介: 黄晓博(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备放电检测。

秽状态监测和特高压放电检测的研究中,采用紫外光敏管作为传感器,在试验应用中达到良好效果的同时也存在一些问题^[8],如光电放大的灵敏度不够、精度受到一定的限制,当光强很微弱时无法响应,不能线性地反映入射光强度等。结合上述问题,笔者采用紫外光电倍增管作为检测传感器,设计了高压电力设备放电检测系统,其通过对放电波形的 A/D 转换和数字积分,可以测量单位时间内放电辐射出的紫外光功率,为判定放电强度提供参考。

光电倍增管 PMT 是一种建立在光电子发射效应、二次电子发射和电子光学理论基础上的,把微弱入射光转换成光电子并获得倍增的真空光电发射器件,具有极高灵敏度和超快时间响应。典型的光电倍增管包括光电发射阴极和聚焦电极、电子倍增极和电子收集极(阳极)。因为采用了二次发射倍增系统,光电倍增管具有较高的电流增益,特别适用于微弱光的探测^[2,9],在可以探测到紫外光、可见光和近红外区的辐射能量的光电探测器件中具有极高的灵敏度和极低的噪声。

2 系统设计

检测系统中,以光电倍增管为检测传感器,传感器的输出信号经过滤波放大、A/D 转换后,在单片机中进行数字积分操作以测量放电产生的紫外辐射的功率,通过人机接口来操作并显示处理结果。紫外检测系统主要包括传感器模块、信号处理模块、人机接口模块和电源模块 4 个部分。系统的结构框图见图 1。

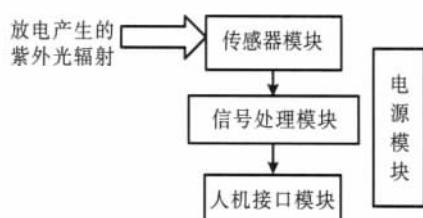


图 1 系统结构框图

2.1 传感器模块

传感器模块由光电倍增管和前端滤光系统组成。采用的光电倍增管是日本 HAMAMATSU 的 R7154 紫外光电倍增管,响应波长为 160~320 nm,最大响应波长 254 nm。R7154 为侧窗型光电倍增管,阴极材料为 Cs-Te,侧窗面积 24 mm×8 mm,内部有九级放大。其反应波长有超过 280 nm 的部分,不完全满足检测频谱的要求,所以要在前端加紫外滤光片改变其反应区间,使其工作在日盲区。

滤光片的选择应综合考虑目标光源和干扰源中紫外辐射的能量分布^[10]。文中选择了紫外滤光片,它是一种干涉滤光片,中心波长为 254 nm,与光电倍增管的响应波长一致;半波宽度为 20 nm;在整个光通范围内的透光百分比为 10%~20%。将滤光片

置于侧窗之外,传感器的工作区间改变为 234~274 nm,转换效率也降为原来的 10%~20%。干涉滤光片的特性和光的入射角度有关。当以一个非零角度入射时,其中心波长将向短波长方向移动,其透过率也会下降。因此,要以零入射角入射一束平行或近乎平行的光。

考虑上述要求,采用了可调整的三角架作为底座,可以在水平方向 0°~180°、垂直方向 15°~165°转动并固定传感器,尽量保证对每个测点、紫外光都以零角度入射。

光电倍增管作为检测微弱光信号的器件,若直接与可见光接触,不但会造成强烈的干扰,影响测量结果,而且长时间暴露在可见光下时,还可能使阴极反应产生强烈的光电流,烧坏器件。因此设计了金属材料的圆筒结构暗室,并在阴极受光处开孔安装滤光片,暗室和紫外滤光片构成了前端滤光系统。

2.2 信号处理模块

光电倍增管检测到紫外光输出电流信号,经检测电阻转换为电压信号,再经过放大滤波后,经 A/D 转换电路,进入单片机中进行数字积分处理,完成对功率的测量。

经光电倍增管直接得到的脉冲信号频率很高,采用带宽达 38 MHz 的放大器 OPA4350 组成多级放大滤波电路。由于光电倍增管的输出信号为负脉冲(图 2),采用反向放大电路改变脉冲信号为正,并调整其幅值,以便 A/D 转换电路的后续处理。滤波电路滤除低频干扰。

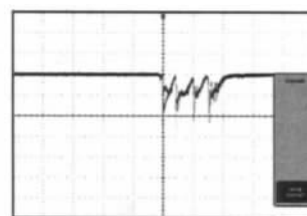


图 2 典型放电紫外辐射脉冲波形

为了体现放电产生的紫外光辐射强度,设计了对信号波形进行数字积分以测量紫外辐射功率的工作方式。采用积分的方法,收集一段时间的紫外光的总和,然后再计算平均功率。连续模拟信号的积分运算是指将连续信号 $f(t)$ 在区间 $(-\infty, t)$ 内求一次积分,所得信号 $y(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$ 称为信号 $f(t)$ 的积分信号。而离散数字信号的积分运算是指将数字信号 $f(n)$ 在区间 $(0, N)$ 内求一次和,所得信号 $y(n) = \sum_{n=0}^N f(n)$,称为信号 $f(n)$ 的积分信号,积分平均值为 $\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N f(n)$ 。

数字积分模块首先对放大滤波得到的放电信号波形进行高速 A/D 采样及数字化转换,再对得到的

数字量进行数字滤波和数字积分处理。采用高速模数转换器件 A/D7825,用中断方式设置采样率为 1 MHz,采样时间为 1 μ s,而整个脉冲波形宽度约 20 μ s,满足采样定律的要求。A/D 转换参考电压为 2.5 V,将 0~2.5 V 的输入电压信号转换为 0~255 的数字量。设置一个可调的数字滤波阈值,小于此阈值的值将被认为是干扰而予以去除,然后在单片机中对经过数字滤波的转换结果进行一定时间内的积分运算并求得积分平均值,积分时间设置为 1~59 ms 可调。在整个测量时间内,以设定的积分时间为周期进行上述处理并发送数据。数字滤波主要用来滤除在强日光条件下因滤光不完全产生的背景干扰。

积分平均值是一个相对的数字量,在液晶中以柱状图的方式显示,以直观还原放电波形,在传输到计算机时,要经过转换,输出紫外辐照强度测量值。转换过程中考虑光电倍增管的反应特性、滤光镜的透过率与面积、放大及 A/D 转换各环节的参数进行逆推导。对一段测量时间内的紫外辐照强度测量值再求平均值得到平均紫外辐射功率。

试验过程中发现,不同位置放电强弱相差很大,当相差几个数量级时,数据处理、显示可能超限或者达不到应有的精度。采用数字积分法可以通过调整积分时间来解决这个问题,这也是数字积分测光功率的另外一个优点。数字积分是对检测到的放电波形积分,是对放电中紫外辐射功率大小的定量测量,直接反映了紫外辐射的强度。

处理器采用美国 silicon 公司 C8051F 系列高性能微处理器 C8051F120。系统时钟通过内部锁相环设置为 100 MHz,指令周期为 10 ns,以满足高速采样的要求。由于数字积分运算数据量较大,外扩了 512 k 外部存储器。

2.3 电源模块

电源模块主要包括两个部分:一部分是驱动光电倍增管工作的高压电源模块,另一部分是为模拟电路和数字电路供电的电源部分。R7154 光电倍增管采用直流高压供电,供电电压最大不超过 1 250 V。供电电压越大,每两级间级间电压越高,对光电子的捕捉能力越强,暗电流干扰也会越大^[11,12]。经过多次试验,设定驱动电压为 850 V 负高压,此时虽然对光电子的捕捉能力有所下降,但是信噪比较高,而且在阴极灵敏度和反应时间取得了平衡。考虑到便于实地试验和数据采集,选择 6 V 的小型蓄电池为整个系统的电源,采用 π 型滤波电路和对地电容进行纹波处理,得到满足要求的电源质量。

2.4 人机接口模块

系统设置了 4 个按键来完成检测操作,采用液晶显示屏输出测量结果。显示屏采用内藏 KS0107 控制器的 YXD-12864A-02 图形液晶显示模块,自

带背光,双电源输入。单片机上还连接有 RS232 串行接口,可将测量数据以 115 200 bps 的波特率发送到计算机。

3 试验研究

应用所设计的检测系统进行了电火花发生器放电紫外检测试验、针板放电检测试验和变电站内放电检测试验,以研究仪器对放电紫外辐射的检测能力。

3.1 电火花发生器放电试验

光电效应第一定律认为,当光源频率一定或光源频谱分布一定时,若光阴极面积是固定的,那么饱和光电流与距离的平方有反比例关系。火花发生器放电脉冲频率稳定,其辐射的紫外光可看作光源频率一定或光源频谱分布一定,因此用电火花发生器进行了不同距离的放电检测试验。

试验中将电火花发生器作为固定的放电源放置在离检测仪器 1~8 m 不同距离的位置,将仪器的滤光片方向对准电火花光源,保证零角度入射进行试验测量,将结果由串口发送至计算机。试验结果见表 1。

表 1 电火花发生器放电试验结果

距离/m	测量值/ $(\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	理论值/ $(\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	相对误差/%
1	1.861	1.861	-
2	0.432	0.465	7
3	0.195	0.207	6
4	0.121	0.116	4
5	0.076	0.074	3
6	0.061	0.052	15
7	0.036	0.038	5
8	0.033	0.029	12

由表 1 中数据知,测量结果在不同距离处接收到的紫外辐照强度随着间隔距离增加而下降,说明光电倍增管测量的线性度良好。表 1 中理论值为以间隔距离 1 m 时的测量值为基准,按光电第一定律求得的其他各距离理论值。不同距离测量值与之比较,相差不大,考虑到测量方向性的误差,基本符合反比例的关系。由于数字积分的结果直接反映了装置端接收的紫外辐射功率的大小,所以较好地体现了不同距离处紫外辐射功率的变化趋势。

3.2 针板放电试验

仪器外观及针板放电试验示意图见图 3。在高压试验室中进行了针板放电的检测试验。试验时按针板电极极性分为针为正电极和针为负电极两组,每组取针板间距为 1、2、3 cm 进行三点试验检测,每点测量 10 次。检测系统距离针板放电部位 3 m,积分时间 1 ms,通过串口将数据发送至计算机中。使用调压器从零升压直到针板发生击穿后,切断电源,记录击穿电压。在开始升压时,即将仪器对准针板进行测量,直至击穿后切断电源。主要测量的是击穿前后的能量变化,舍去刚开始升压没有发生放电时很多为 0 的测量值,只对击穿前后的有效测量值进

行平均处理,求得整个放电过程中的平均紫外辐照强度。结果见表2、3。表2、3中, D 为针板间距; V 为放电电压,kV; P 为测量结果, $\mu\text{W}/\text{m}^2$;A为平均值。



图3 仪器外观及针板放电试验示意图

表2 针为正电极情况下的试验结果

序号	$D=1\text{ cm}$		$D=2\text{ cm}$		$D=3\text{ cm}$	
	V	P	V	P	V	P
1	5.5	0.584	17.0	4.535	25.00	7.496
2	5.5	0.438	17.5	4.078	23.00	5.979
3	9.0	2.007	17.5	3.412	23.00	6.679
4	9.5	0.984	18.0	4.901	22.00	5.050
5	8.9	1.549	18.0	4.751	22.00	5.602
6	5.0	0.355	18.0	5.305	23.00	6.596
7	9.0	1.020	19.0	6.160	24.00	6.705
8	5.0	0.480	18.0	4.849	23.50	5.873
9	9.0	1.560	19.0	6.028	22.50	6.280
10	5.0	0.550	19.0	5.922	22.50	5.023
A	7.2	0.997	18.1	5.502	23.05	5.922

表3 针为负电极情况下的试验结果

序号	$D=1\text{ cm}$		$D=2\text{ cm}$		$D=3\text{ cm}$	
	V	P	V	P	V	P
1	8.0	1.130	23.0	3.564	31.0	4.697
2	7.6	0.926	22.0	3.116	32.5	4.473
3	7.8	1.159	22.5	6.005	32.5	3.930
4	7.8	1.478	22.0	2.912	35.0	4.095
5	7.7	0.724	22.0	2.941	32.0	4.101
6	7.5	1.061	22.0	4.903	32.0	6.831
7	7.4	0.476	22.0	1.889	32.0	6.000
8	7.8	0.468	22.0	2.563	32.5	4.167
9	7.0	0.771	22.0	3.139	34.0	8.380
10	7.1	0.667	23.0	4.804	32.5	6.164
A	7.53	0.909	22.3	3.884	32.6	5.186

综合以上试验结果,在两种极性下,随着针板间距的增加,放电电压均逐渐上升,紫外辐射功率的测量值也是逐渐上升的,符合针板放电随着针板间距的增加、放电电压的增大,针板间放电强度增大的规律^[13],说明检测系统的测量能够体现实际放电的强弱。

3.3 变电站试验

在220 kV重庆邮亭变电站进行了实地试验,对一串完整线路苏邮西线进行了检测。在电路上选取了6个可能发生电晕放电的点进行检测,测点为: I号母线刀闸接头处; 号母线刀闸接头处; 母线侧隔离开关接头处; CT接头处; 线路侧隔离开关接头处; 线路侧PT接头处。每点对A、B、C三相均进行检测。在每个点的正下方用放电检

测系统的传感器对准待测点,每点测量1 min,积分时间1 ms,测量结果通过串口发送到计算机上处理。

在正常运行下,电力设备绝缘的放电较弱,检测时设备放电处和检测仪器的距离一般较远,均在10 m以上,到达检测系统的紫外辐射信号就更加微弱,测量结果一般在1以下。但每点的放电紫外辐射均能够被检测到,验证了该系统对微弱紫外光的检测能力。全串线路的放电紫外辐射功率分布见图4,由图4可以看出,线路各点的放电紫外辐射功率是不同的,整体上A相的放电较强,B、C两相相对较弱,测量结果的差异主要是因为各处绝缘状况的不同。测点距离较远,从地面用仪器对准测点时,难以精确保持零角度入射,在设备密集处还可能引入干扰,是造成误差的原因,也是以后改进的重点。

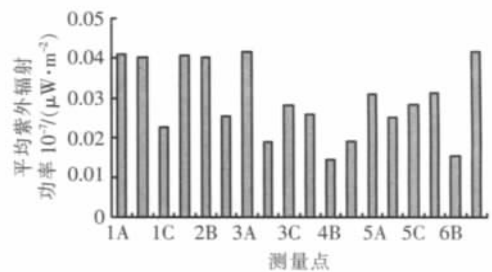


图4 苏邮西线紫外辐射功率分布

为了确认仪器的检测可靠性,检测了站内一条不带电的备用线路。在经过模拟电路滤波和数字滤波后,仪器输出基本为0,仅在个别设备密集处,由于方向性的误差,有极小的输出数值。上述对照结果说明,仪器的检测是可靠的。

3.4 试验结论

根据上述试验,我们可以得出以下结论:

(1)火花发生器放电检测结果说明仪器对紫外辐射的检测能力符合光电效应第一定律,说明其对紫外辐射强度测量的线性度好;

(2)针板放电下的测量结果符合针板放电强度的变化规律,说明其对紫外功率的测量能够有效反映放电的强弱;

(3)变电站内设备放电检测结果表明检测系统在较远的距离时,能够检测到实际电力设备放电产生的微弱紫外光信号,灵敏度好,具有较强的检测能力。

4 结语

针对电力设备放电的紫外检测现状,采用光电倍增管设计了高压电力设备放电检测系统。在火花发生器放电检测试验、针板放电检测试验以及变电站内电力设备放电检测试验中表明,采用光电倍增管作为传感器,灵敏度高,线性度好,可以在站内实测中有效地检测到放电中产生的微弱紫外光,能够线性地反映紫外辐射功率的大小,作为进一步判定放电地强弱的依据。(下转第35页)

急剧下降,使电流互感器的误差在过渡过程中增大到不能允许的程度,当电流互感器铁心中有剩磁通,且这一剩磁通与励磁电流非周期分量的磁通方向一致时,产生的误差特别大。

一般来说,0.2S级及以上的电流互感器配套0.5S级及以上的电子式电能计量表,基本上能满足大小负载情况下动态计量范围和计量精度要求。另外,目前有一种复合变比电流互感器自动转换计量装置,是与复合变比电流互感器配套使用的一种智能化自动转换大小变比的计量装置。由于它可自动转换电流互感器变比,从而拓宽了电流互感器的计量范围,保证了从小电流到大电流的计量精度,非常适用于用电负荷较大和用电负荷变化大及季节性用电情况使用,能有效防止低负荷或超负荷时计量不准的问题。假如不过于考虑建设成本,采用该类装置配套应用,可有效提高有载调容变压器的电能计量精度。

4 结语

有载调容变压器是一种新技术节能型配电变压器,克服了无载调容变压器不能根据实际负荷大小调节变压器运行容量方式的固有缺陷,扩大了适用范围。通过对有载调容变压器与普通配电变压器的

综合经济性比较和应用分析,验证了有载调容变压器应用的可行性和突出的节能优势。随着配电变压器有载调容技术的逐渐成熟,有载调容配电变压器在用电负荷昼夜变化显著的台区,尤其在季节性负荷较强的农村电网将具有较为广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王金丽,王星,徐腊元. 电容变压器的研制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 91-93.
- [2] 姚志松,姚磊. 新型配电变压器结构、原理和应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [3] 孙成宝,金哲. 现代节电技术与节电工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 魏晓峰. 论10 kV调容变压器在农村配电网中的应用[C]// 华东六省一市电机(电力)工程学会输配电技术研讨会2005年年会论文集, 2005: 90-92.
- [5] 陈玉国,马效坤,崔建江. S11调容变压器[J]. 农村电气化, 2003(7): 5-6.
- [6] 陈玉国. 调容配电变压器的原理与性能分析[J]. 变压器, 1998, 35(1): 24-25.
- [7] 郑国培,刘忠,陈星,等. SH15型非晶合金铁心配电变压器的技术经济分析[J]. 变压器, 2005, 42(6): 1-5.
- [8] 茅建华. 非晶合金变压器节能经济效益分析[J]. 上海电力学院学报, 2005, 21(2): 177-180.

(上接第31页)

以光电倍增管作为传感器的检测系统,通过对放电的紫外检测,可以应用于绝缘子污秽和缺陷的评估,变压器局部放电的检测及输电线路和电力电缆的监测等领域,在高压电力设备的放电检测上具有重要的实用意义和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张海峰,庞其昌,陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(2): 6-8.
- [2] 王灿林,廖永力,王黎明,等. 电晕紫外光脉冲与电晕电流脉冲相关性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 88-91.
- [3] 李青文,陈涛,汪金刚,等. 紫外脉冲法在特高压放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 26-29.
- [4] 何为,陈涛,杨帆,等. 基于紫外脉冲法的绝缘子污秽状态监测[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 39-42.
- [5] 周亮,杨浩,何为,等. 高压绝缘子紫外在线检测器的

- 研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 108-113.
- [6] 柳燕. 大气臭氧层、紫外辐射与人类健康[J]. 地球物理学进展, 1998, 13(3): 103-110.
- [7] 陈涛,何为,刘晓明,等. 高压输电线路紫外在线检测系统[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 88-92.
- [8] 陈章其. 用于火焰探测的紫外光敏管[J]. 传感技术学报, 1996, 9(1): 55-59.
- [9] 郑军,陈金祥. 新型紫外微放电监测仪检测绝缘子污秽状况的试验研究[J]. 福建电力与电工, 2006, 26(1): 20-23.
- [10] 何丽玲. 用于探测电致发光的单光子计数器的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2002.
- [11] 傅晨钊,周建国,肖嵘,等. 紫外电晕检测仪检测线路绝缘子的模拟试验[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 50-53.
- [12] HAMAMASTU P K K. Electron Tube Center Photomultiplier Tubes[EB/OL]. <http://www.hamamastu.com>, 2003.
- [13] 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.

欢迎浏览中国高压电器网(www.chinahva.com)