

文章编号:1004-4213(2011)03-0383-5

# 基于通道型光电倍增管的电弧放电检测

何宁,梁坡,于胜云

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

**摘 要:**针对电气设备接触不良或质量缺陷引起的电弧放电现象对用电设备安全运行的影响,本文分析了电弧的产生机理及检测方法,依据紫外光强辐射特点,设计了基于通道型光电倍增管的检测系统.通过实验,对放电弧光进行捕获,作为判断电弧放电程度依据,实现对电气设备的有效保护和控制.实验表明,该系统灵敏度高,线性度好,能实现微弱紫外光探测在线监测.

**关键词:**电弧;光电倍增;紫外检测;辐射强度;线性度

**中图分类号:**TM835

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114003.0383

## 0 引言

电气设备由于接触不良或质量缺陷会产生电弧,辐射出紫外光,通过检测紫外光的强度来判断放电情况,是目前非接触测量的新手段.它在与设备一定距离内可实现紫外光的在线检测,不影响系统的运行状态.电弧放电弧光检测技术在电力系统的网络运行安全监测应用有着重要意义,它可以检测电力设备表面和局部的放电现象,20 世纪 80 年代由俄罗斯电力专家最早应用于电力系统,现在美国、英国、日本、以色列、印度等国家得到广泛关注和应用.目前国内也积极开展这项技术研究,并逐步在输电线路和变电站电气设备的放电监测进行应用.检测手段有放电弧光强度检测和成像可视测量,紫外成像是一种有效的电气设备放电检测方法,该方法的优点是形象直观,具有优良的放电检测定位能力<sup>[1-2]</sup>,但紫外成像仪在外部光照不足时输出图像往往比较模糊,存在对比度差、成本高、灵敏度低,对早期放电危险难以预报等弱点<sup>[3]</sup>.本文采用光电倍增管进行电气设备早期的微弱放电弧光强度检测具有灵敏度高、应用方便灵活等优点,可实现预先监测,通过感知紫外光辐射强度,可以有效控制电弧故障引起的火灾事故,在电气设备放电检测上具有实用价值.

## 1 电弧的产生原理

电弧放电产生的紫外光波长在 230~400 nm 间,而 230~280 nm 波长区域的紫外光为日盲区.

采用滤光技术,除去日光的干扰,只检测 280 nm 以下部分的紫外光,可作为评估用电设备放电大小的依据<sup>[4]</sup>.当用电设备接触部分两间隙的电场强度足够大,极间自由电子的运动能量撞击空气中的中性分子或原子并足以使其游离出更多带负电的自由电子和带正电的正离子时,电场强度会进一步加强.在该电场中,电子撞向阴极,而正离子撞向阳极.若正离子的能量能使阴极游离出新的电子,辉光放电就转化为弧光放电,即形成电弧.由此可见,电弧是一种气体游离放电现象,也是一种等离子体.GERMER 等的研究表明:接通过程产生的电弧与触头材料及电路电压有关,而产生的电弧还取决于电路的电流.在潮湿环境下,因为空气中的湿度加大,因此,也易引起电弧放电现象<sup>[5]</sup>.

放电电弧可分为正常电弧和非正常电弧(即故障电弧)两种.一般认为,电器的正常开关、插头插拔等操作引起的电弧属正常电弧;而触头松动、绝缘老化、击穿、接地故障等引起的电弧视为故障电弧.

## 2 故障电弧的检测方法

要检测故障电弧首先需检测到电弧,然后考虑如何判断是否为故障电弧.目前,国内外电弧检测的方法可归纳为 3 类<sup>[6]</sup>:1)建立电弧模型,并通过检测相应的参量检测电弧;2)根据电弧发生时的电流、电压波形变化检测电弧;3)根据电弧发生时所产生的弧光检测电弧.

### 2.1 基于电弧数学模型的检测

对于故障电弧而言,最接近的模型应该是空气

基金项目:国家高技术研究发展计划(No.2007AA0860)资助

第一作者:何宁(1958-),男,研究员,主要研究方向为光通信与光学测量. Email:eicnhe@guet.edu.cn

通讯作者:梁坡(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为紫外光探测. Email:yingqianlou@163.com

收稿日期:2010-10-11;修回日期:2010-12-05

开关电弧的数学模型,最常用的电弧模型是 Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型.

Cassie 电弧模型的表达式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $u_c$  为恒定电弧电压,它是电弧瞬态恢复电压表示方法中的参考电压,取为瞬态恢复电压的峰值;  $g$  为电弧电导;  $u$  为电弧电压;  $\tau$  为电弧时间常量.

Mayr 电弧模型是基于热平衡、热惯性、热游离三个基本原理推导而来的,其表达式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{p} - 1 \right) \quad (2)$$

式中,  $u$  为电弧电压,  $i$  为电弧电流,  $p$  为电弧散热功率. 其它量的含义与式(1)相同. Mayr 电弧模型的物理意义很明确,当电弧功率大于散热功率时,电弧温度将升高,热游离加强,电弧电导有增加的趋势. 由于电弧有热惯性,也即有时间常量  $\tau$ ,使得电弧升温或电弧电导  $g$  的增加趋于缓慢. Mayr 电弧模型比较适用于小电流,包括零区的电弧过程<sup>[7]</sup>.

## 2.2 基于电流电压波形的电弧检测

无论电流较大的配电柜或是电流较小的家庭供电系统,在故障电弧情况下,电网中的电压和电流波形都会出现明显变化. 因此,可利用电压电流的特性检测故障电弧. 图 1 为电阻负载电路中电弧故障的电压电流波形,由图可见,电流在过零点附近会出现平坦的肩部波形,这是由电弧点燃和熄灭过程引起的,电压波形除在电弧点燃和熄灭部分外近似矩形波.

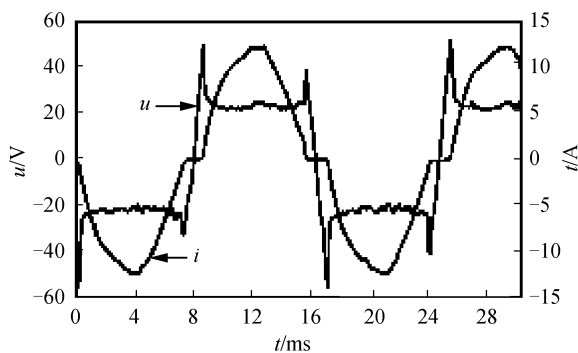


图 1 电弧的电压电流波形

Fig. 1 Current and voltage waveforms of arc

电弧故障有一些重要特征<sup>[8]</sup>: 1) 电压和电流波形中存在高频噪音分量; 2) 电弧产生后有一个瞬间压降; 3) 由于瞬间压降,电弧电流比非电弧电流要低,除非某些情况中设备补偿了这种差别; 4) 电弧电流上升速率一般比正常电流快; 5) 在每半个周期内,电弧在电流正常零点前熄灭,而后在正常零点后重燃,从而形成了一个接近平坦的零电流区域,也就是所谓的“肩部”; 6) 电压波形近似矩形波; 7) 在正常电

流中时而突发电弧现象.

电弧检测针对这几个特征来判断电弧的发生,如果有足够数量的特征存在,即认为故障电弧产生并马上切断电路. 利用电弧的电流电压检测故障电弧易于实现,且检测位置受限制较小,已成为目前的研究热点. 但一些正常的操作也可能产生电弧信号或类似电弧信号,例如: 插拔电器; 有些特殊负载也会产生类似电弧信号,例如: 调光灯、吸尘器、压缩机等. 因此,如何有效区分电流电压的波形畸变是否由故障电弧引起是一个重要的问题,而且该方法采用直接接触式,测量装置不能做到完全隔离,使用中外界干扰较大.

## 2.3 基于弧光的电弧检测方法

电弧是强功率的放电现象,在电弧燃烧时产生的温度为 6 000 K~20 000 K,在电弧熄灭时为 3 000 K~4 000 K,电弧燃烧时辐射的光波长约为 150~500 nm,大部分属于紫外光,因此可以利用电弧的光效应,使用光电传感器进行电弧检测. 光电传感器是以光电效应为基础,将光信号转换为电信号的传感器. 由于其响应速度快,可以实现非接触检测,结构简单等优点,在检测和控制系统中得到广泛的应用. 常用的紫外光电传感器有紫外光电二极管和光电倍增管.

紫外光电二极管是对紫外线具有较高灵敏度的传感器,可用来检测火焰及放电现象. 紫外光电二极管具有量子效率高、功耗低、工作频谱范围大、体积小、工作电压较低等优点,但是同时也有增益低、噪音大,外围控制电路及热电制冷电路较复杂等缺点.

图 2 表示的是传统光电倍增管 (Photo Multiplier Tube, PMT) 的结构.

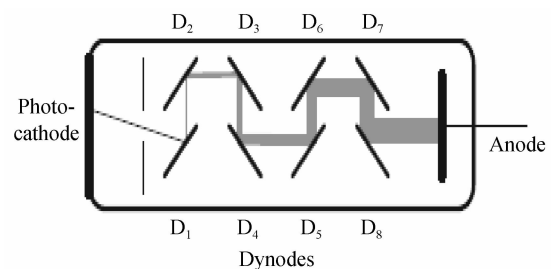


图 2 传统的 PMT 的结构

Fig. 2 Structure of traditional PMT

图 3 表示的是通道型光电倍增管 (Channel Photomultipliers, CPM) 的结构. CPM 是一种新型超高灵敏的光电探测器,它与 PMT 的主要区别在其光电子倍增的通道结构上的差别. CPM 用弯曲的通道代替传统 PMT 的打拿倍增极,通道内表面有半导体二次发射涂层. 当在通道两端施加电压时,沿管子轴向产生一个均匀电场. 光电阴极把接收到的人射光转换成光电子,然后从阴极注入半导体通道,

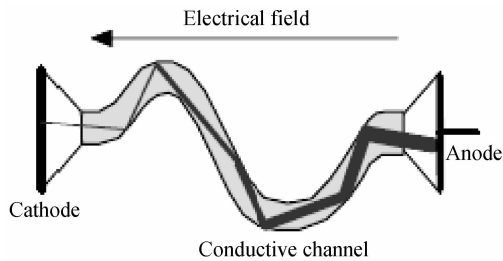


图 3 CPM 的结构  
Fig. 3 Structure of CPM

光电子沿轴向受到加速,由于电子横向能量成分不受径向电场影响,因此一部分电子跟管壁碰撞。在适当的工作条件下,每次撞击同时都产生类似于光电倍增管的倍增效应,发射二次电子,二次发射电子依次受到同样的加速,这个效应沿着整个倍增通道会发生许多次,导致雪崩效应,增益达到  $10^8$ ,增益高的通道型光电倍增管通常是弯管状或螺旋状,以防止电子与残余气体分子碰撞而可能产生的任何离子,在电子打在管壁上之前吸收更大的能量。这样就能抑制由于离子反馈而产生的二次电子,有助于提高倍增管的增益。由于 CPM 具备高增益和极高的动态范围,极低的暗电流,快速的响应以及紧凑的结构设计等优势特点,因此能够替代传统的光电倍增管,用于需要高性能的场合,是理想的用于电弧检测的光电传感器。

### 3 系统设计

由于电网中存在与故障电弧的电流电压波形相似的波形,故障电弧的电流不能使继电器保护设备动作,因此当电器设备发生故障电弧时往往不易被发现和切除,从而引发电气火灾。针对这种情况,设计了基于光电倍增管的电弧检测系统,通过对弧光进行检测实现对电器设备的保护和控制。

根据上面检测方案分析,本系统主要解决被测用电器的电弧放电规律及程度,当放电超出额定容限,并对用电系统产生危害时,检测控制系统能及时发出告警提示,迅速切断用电设备,保证用电系统的安全,因此,本系统采用光电倍增管检测电弧放电,实现对用电器的控制。图 4 为系统组成,它由用

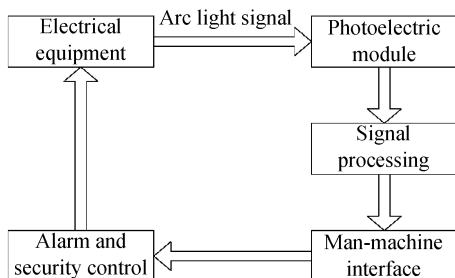


图 4 检测系统的组成  
Fig. 4 Composition of detection system

电器、光电传感模块、信号处理模块、人机接口模块、告警与安全控制模块组成。

检测系统中,以 CPM 为光电传感器,传感器的输出信号经过滤波放大、AD 转换后,由人机接口模块送入计算机进行处理和显示。

当用电器不正常工作或电火花发生器产生紫外光电弧,经一定距离的空间传输后,由光电传感模块把接收到的微弱紫外弧光信号转换成电流信号,经内部的 I/U 转换电路转换为模拟电压信号,进行 A/D 转换送计算机处理和显示,若电弧放电幅度过大,并超过设定门限时,告警装置将发出声音提示,同时切断被监测用电器的供电,从而保护用电设备的安全。

### 4 实验分析

为了验证电弧放电弧光强度与探测距离间的变化规律,系统主要对电弧放电强度与线性度进行测试,倍增管阴极材料为高灵敏度的多碱光阴极,响应波长为 185~900 nm,通光口径为 10 mm,为避免其它非弧光信号对实验的影响,在倍增管的受光面增加了紫外滤光片,滤光片中心波长 280 nm,带宽为 10 nm,透光率 >15%。

#### 4.1 线性度实验

电弧放电产生紫外光具有一定的功率强度,依据发光源与探测器之间的距离不同,探测到的光强度与转换后的电信号幅度也不同。一般情况下,随着两者距离增加,探测信号的幅度将减小。在对电弧放电的紫外光探测时要求探测系统具有良好的线性,只有放大器在线性区域工作,才能准确测量被测目标的辐射特性,因此线性度是评价紫外探测系统性能的重要指标。

根据光电效应第一定律,当光源频率一定或光源频谱分布一定时,若光电传感器的光阴极面积是固定的,那么饱和光电流与距离的平方成反比例关系,因此 CPM 输出的电压幅度与距离的平方成反比例关系。实验中采用的电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,来检验检测系统的线性度。在两者间的光轴上,固定 CPM 光电倍增探测系统位置,改变电弧放电光源位置,用示波器直接观察经光电倍增放大系统输出的电信号幅度变化波形,通过不同光强度来测算探测系统的线性度,实验在 1~10 m 间测得数据曲线如图 5。

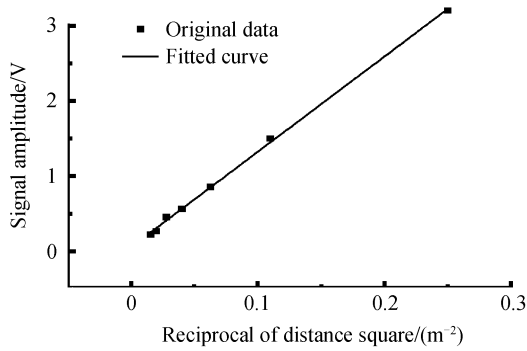


图 5 信号幅值与距离的关系曲线

Fig. 5 Relational curve between signal amplitude and distance

图 5 中显示的是接收的弧光信号幅值随电火花发生器与 CPM 间的距离变化而变的对应关系. 对数据进行直线拟合发现, 该直线的拟合相关系数可达到 0.997 8, 方差仅为 12.09 mV, 可见拟合线性度很高, CPM 接收弧光信号幅值随距离的变化趋势也较理想, 符合紫外光强度与距离平方成反比的规律. 因此, 对不同的检测距离, 弧光强度都可统一量化, 即可在短距离范围内的不同测量距离对弧光强度进行精确测量, 提高了检测系统的实用性.

#### 4.2 灵敏度实验

采用 CPM 构成的电弧检测系统可检测很微弱电弧的光强. CPM 测试系统为直流 5 V 供电, 通过内部升压电路可控制接收灵敏度, 系统输出为电压型模拟信号, 实验中光电倍增管高压调整到 1 000 V 来检验系统的灵敏度. CPM 作为检测微弱光信号的器件, 灵敏度很高, 在长时间暴露在可见光下时, 可能使阴极反应产生强烈的光电流, 烧坏器件. 为避免强光对 CPM 的影响, 在紫外光到达光电倍增管受光面前安装 25.4 mm 的滤光片和导光暗室, 构成前端滤光系统, 避免可见光进入影响系统测试. 加入紫外滤光片提高了光电倍增管抗背景强光干扰的能力, 使白天的应用更灵活, 但对紫外入射光有一定的衰减作用, 这可通过增加倍增电压来加以补偿, 保证一定的探测灵敏度. 实验中要求光电倍增管测试系统应正对被测光源, 使入射紫外光尽可能平行进入导光区, 当电弧放电光源距离光电倍增管探测系统为 10 m 时, 探测系统输出波形为图 6, 电弧断续放电时表现为一串脉冲. 图 7 为极限探测下 CPM 的最小输出单脉冲幅度 (5 mV), 经测试得到达滤光系统前的紫外光功率小于 1 pW.

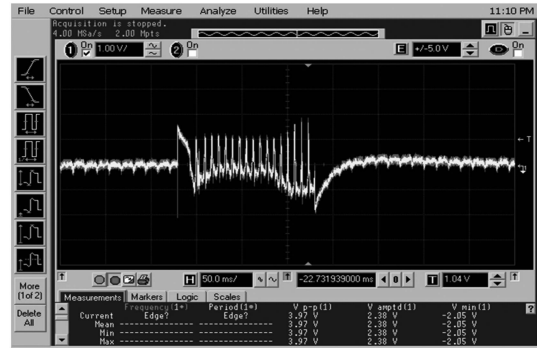


图 6 探测系统输出波形

Fig. 6 Output waveform of detection system

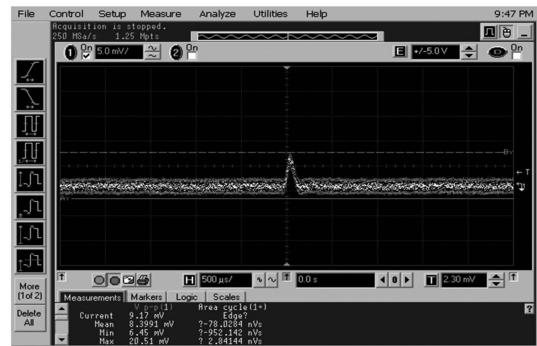


图 7 极限探测下 CPM 输出最小单脉冲幅度

Fig. 7 Minimum single pulse amplitude of CPM under limit detection

#### 4.3 告警与控制

根据光电倍增系统输出信号幅度, 由告警与控制模块进行判别比较, 设定合适电平门限, 当电弧放电幅度超过设定门限时, 告警装置将发出声音提示, 同时切断对被监测用电器的供电, 从而保护用电设备的安全. 实验中告警门限设为 100 mV, 被监测放电光源与探测系统距离为 10 m.

## 5 结论

针对电力设备接触不良或质量缺陷引起的电弧现象, 设计了基于通道型光电倍增管的电弧放电检测系统. 实验表明, 采用通道型光电倍增管作为传感器, 灵敏度高, 线性度好, 可以有效地检测到电弧放电中产生的微弱紫外光信号, 能够线性地反映电弧紫外辐射功率的大小, 作为进一步判定放电地强弱的依据. 以通道型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] JIN Gui-ping, PANG Qi-chang. The key points of UV imaging and detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 294-297.  
靳贵平,庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, **32**(3):294-297.
- [2] WANG Sheng-hui, LÜ Fang-cheng, LI Yan-qing, *et al.* Application of UV imaging to corona discharge detection in substation [J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, **46**(2): 15-19.  
王胜辉,律方成,李燕青,等. 紫外成像法在变电站电晕放电检测中的应用研究[J]. 高压电器, 2010, **46**(2):15-19.
- [3] WANG Sheng-hui, LÜ Fang-cheng, LI He-ming. Study on image enhancement method of high voltage equipment corona UV imaging detection[J]. *High Voltage Apparatus*, 2009, **45**(6): 15-19.  
王胜辉,律方成,李和明. 高压设备电晕紫外成像检测图像增强方法的研究[J]. 高压电器, 2009, **45**(6):15-19.
- [4] ZHANG Hai-feng, PANG Qi-chang, LI Hong, *et al.* Detection of high-voltage corona based on UV spectrum technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1162-1166.  
张海峰,庞其昌,李洪,等. 基于 UV 光谱技术的高压电晕放电检测[J]. 光子学报, 2006, **35**(8):1162-1166.
- [5] PINNANGUDI B, GORUR R S. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, **12**(3): 513-523.
- [6] YANG Yi, DONG Ai-hua. Overview of low voltage fault arc detection[J]. *Low Voltage Electric Equipment*, 2009, (5): 1-4.  
杨艺,董爱华. 低压故障电弧检测概述[J]. 低压电器, 2009, (5):1-4.
- [7] HUANG Shao-ping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2005, **17**(5): 64-66.  
黄绍平,杨青,李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, **17**(5):64-66.
- [8] GREGORY G D, KON W, DVORAK R F. More about arc-fault circuit interrupters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, **40**(4): 1006-1011.

## Arc Discharge Detection Based on Channel Photomultipliers

HE Ning, LIANG Po, YU Sheng-yun

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** According to the influence of arc discharge on safe operation of electrical equipment caused by quality defects or poor contact, the mechanism and detection methods of arc were analyzed. According to the characteristics of UV intensity radiation, an arc detecting system based on channel photomultipliers was designed. The captured arc discharge intensity was monitored, as a judgment basis of arc discharge degree, to realize the protection and control of electrical equipments effectively. The results show that the system can detect weak UV light with high sensitivity and linearity, and achieve the on-line monitoring of weak UV light detection.

**Key words:** Arc; Photoelectric multiple; UV detection; Radiation intensity; Linearity