

电弧放电紫外光辐射探测系统研制

梁坡 何宁 廖欣

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 电弧放电伴随着紫外光辐射,通过探测放电辐射强度可预测其对用电设备的危害程度。分析了电弧的产生机理及特征,依据电弧数学模型,探讨弧光辐射的检测方法,对针状物及金属物断裂处引起的放电脉冲特性进行研究及测试。采用通道型光电倍增管构建探测系统,对放电弧光进行捕获,测量不同距离处紫外光辐射的强度,作为判断电弧放电程度依据,说明导光、滤光对提高探测效果的作用。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 紫外探测;电弧;光电倍增;线性度;辐射强度

中图分类号 TM835 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.081202

Development of Arc Discharge Detection System Based on Ultraviolet Radiation

Liang Po He Ning Liao Xin

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

Abstract Arc discharges accompany with ultraviolet (UV) radiation. By detecting the radiation intensity of arc discharge the damage degree of arc to electrical equipments can be predicted. The mechanism and characteristics of arc are analyzed. According to the arc mathematical model, detection methods of arc radiation and characteristics of discharge pulse caused by spicule and metal fracture are studied. A detecting system based on channel photomultipliers is designed to capture arc. The UV radiation intensity at different distances is measured as a judgment basis of arc discharge degree. The improvement of detection effect by using light guide and light filtering modules is illustrated. The results show that the system can detect weak UV light with high sensitivity and linearity, and realize on-line monitoring of weak UV light.

Key words UV detection; arc; photoelectric multiple; linearity; radiation intensity

OCIS codes 120.0120; 280.4788; 260.7190; 260.5210

1 引言

随着我国国民经济的发展,生活和生产的用电量不断增大,传输设备和用电设备数量及种类也不断上升,电路故障引起的电气火灾也越来越多。电气设备由于接触不良或质量缺陷会产生电弧,以光的形式向空间辐射,通过检测辐射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电弧放电的在线检测,不影响系统的运行状态^[1,2]。本文采用高灵敏度的通道型光电倍增管构建了紫外弧光探测系统,通过测量紫外光辐射的强度来判断放电的发展程度,可对早期的微弱电实现预先监测。

2 紫外辐射特征

电弧放电产生的弧光光谱包含紫外、可见光和近红外3个区,为了进行电弧放电检测,减小日光的干扰,需采用相应的滤光技术,只检测280 nm以下部分的紫外光,来作为评估用电设备放电大小的依据^[3~5]。紫

收稿日期: 2011-02-25; **收到修改稿日期**: 2011-03-20; **上网日期**: 2011-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(60177036)资助课题。

作者简介: 梁坡(1985—),男,硕士研究生,主要从事紫外辐射光电探测方面的研究。E-mail: yingqianlou@163.com

导师简介: 何宁(1958—),男,研究员,硕士生导师,主要从事光通信与光学测量等方面的研究。

E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

外光光谱在 230~400 nm 间,而 230~280 nm 波长区域的紫外光称为日盲区,当用电设备由于老化或连接部分发生断裂等现象,在形成的间隙位置将产生较强的电场强度,间隙中的自由电子运动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,电子撞向负极,而正离子撞向正极,若正离子的能量能使正极游离出新的电子,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^[6]。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^[7,8]。

放电电弧可分为正常电弧和故障电弧两种。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。从故障电弧发生在电路的位置上区分还可以分为火线对零线电弧,串联电弧,火线对地电弧。当电缆的绝缘长期受热或发生偶然性电火花,造成电缆表面绝缘碳化形成的电弧通道极易发生电弧故障。当发生并联电弧时,因为此时电流较大,一般通过传统断路器的过电流保护就会动作。而当导体被断开很小间距时或发生虚接时,此时发生的电弧作为一个负载与原负载串联,电路中电流小于过流保护的电流^[9,10]。

3 电弧的数学模型

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。对于故障电弧而言,最常用的电弧模型是 Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型。

Cassie 电弧模型的方程式为

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

式中 u_c 为恒定电弧电压,它是国际电工委员会(IEC)电弧瞬态恢复电压(TRV)表示方法中的参考电压,取为 TRV 的峰值。 g 为电弧电导, u 为电弧电压, τ 为电弧时间常数。

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,其方程式为

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

式中 i 为电弧电流, p 为电弧散热功率。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,电导有增加的趋势。由于电弧有热惯性,也即有时间常数 τ ,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^[11,12]。

为了减小日光对检测的干扰,电弧放电光辐射检测只在 200~300 nm 间选择一个合适的波长窗口,使用光电传感器进行检测。由于其具有响应速度快、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。

4 系统的组成

根据上面的数学分析,系统主要解决电弧放电规律及程度,检测弧光放电紫外部分发生的强度大小和持续放电时间,根据被监测放电位置距离及环境要求,实时设置采集信号判决门限和强辐射告警门限。系统选择通道型光电倍增管(CPM)作为电弧放电检测传感器,它具有极高的灵敏度、良好的线性度和超快的时间响应,相比传统光电倍增管(PMT),通道内表面有半导体二次发射涂层,弯管状的通道型结构,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。图 1 为检测系统硬件组成,它由放电装置、光电传感模块、A/D 转换模块、信号处理模块、显示告警模块组成。

检测系统以通道型光电倍增管为光电传感器,当电弧放电产生紫外光电弧,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,传感器的输出信号经过滤波放大、A/D 转换后,送入单片机进行处理和显示。若电弧放电幅度过大,并超过设定门限时,系统发出告警提示。

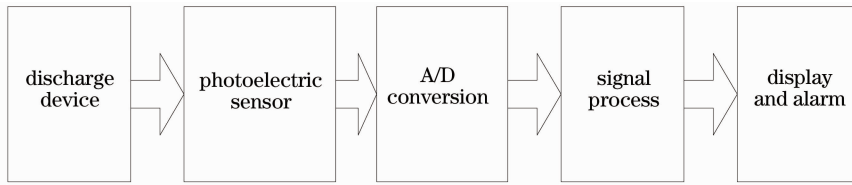


图1 检测系统的组成

Fig. 1 Composition of detection system

5 可行性实验测试

为了验证电弧放弧光强度与探测距离间的变化规律,系统主要对电弧放电辐射强度与线性度进行测试,通道型光电倍增管响应波长为 185~900 nm,有效光孔为 5 mm,紫外滤光片中心波长 280 nm,带宽为 10 nm,透光率大于 15%,通光口径为 20.5 mm。

5.1 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实验,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 1~60 m 不同距离下对电火花发生器的放电进行测量。

图 2 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 0.9991,方差仅为 46.06 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。考虑到实验的测量误差,符合紫外光强度与距离平方成反比的规律,说明通道型光电倍增管探测系统的线性度良好。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。

5.2 辐射强度检测

利用高灵敏度的 CPM 构成的电弧检测系统可检测很微弱电弧的光强,CPM 测试系统采用 5 V 直流电源供电,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,实验中光电倍增高压调整到 1500 V,并在紫外光到达光电倍增管受光面前安装口径 25.4 mm 的滤光片和导光暗室,构成前端滤光系统,保证系统能在一定环境光下进行测试,避免可见光直接照射对系统测试产生影响。系统由 TLC5510 将光电倍增管采集的模拟信号进行 A/D 转换,把连续变化的模拟信号进行定时采

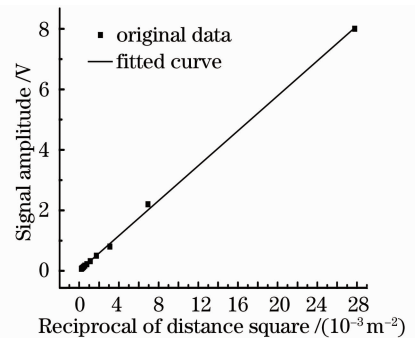


图2 信号幅值与距离的关系曲线

Fig. 2 Relational curve between signal amplitude and distance

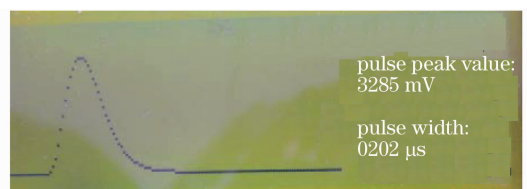


图3 LCD 显示的测量结果

Fig. 3 Measurement results on LCD

样处理,定时时间(即采样时间)由 $12/f \times (256 - V_{TH_0})$ 确定, f 为时钟频率, V_{TH_0} 为定时器计数初始值(小于 256),由于中断程序执行需要时间,因此不能将定时时间设得太短。每个采样值作为辐射强度的参考值,当这个值大于告警门限值时,系统将启动告警提示。由于电弧放电过程具有随机性,放电幅度从几毫伏到几伏变化,要求检测系统要有一定的动态范围,系统将检测的取样值保存在缓存,经单片机处理后由 LCD 显示放电波形、最大幅度和放电时间,图 3 为 LCD 显示的测量结果。

5.3 导光与滤光

通道型光电倍增管具有极高的增益,可实现低照度下的紫外光探测,若在白天阳光充足环境下测试,将对测试系统造成强烈干扰,影响测量效果,长时间暴露在可见光下,产生的光电流可导致器件损坏。为减小背景光干扰,保护光电倍增管,应加入导光区和窄带紫外滤光片,导光区设定为 3~6 cm,过长的导光区将减小紫外光接收角度。当光电倍增管倍增电压设定在 1500 V 时,在没有加入导光区和滤光片情况下,光照在 5 lx 时测试系统将出现强光干扰。同样倍增电压下,在加入导光区和滤光片后,背景光照达到 200 lx 时测试系统仍能正常测试。

由于干涉滤光片的特性和光的入射角度有关,当光以一个非零角度入射时,其中心波长将向短波方向移动,其透射率也会下降,因此实验中要求光电倍增管测试系统必须正对着被测光源,使入射紫外光尽可能平行进入导光区,尽量避免由于对准问题引起的实验测量误差^[13,14]。

当辐射源与系统存在一定距离时,测试光路的对准及测试精度将带来误差,无论是白天还是晚上,单靠目测很难保证测试系统与光源处于同一光轴上,给实验的准确测量带来很大的麻烦。为解决对准问题,系统安装一个激光对准装置,在每次测量开始前,先打开对准装置,手动调整测试系统的方向,使测试系统与光源处于同一光轴上,然后关闭对准装置,开始进行测量。

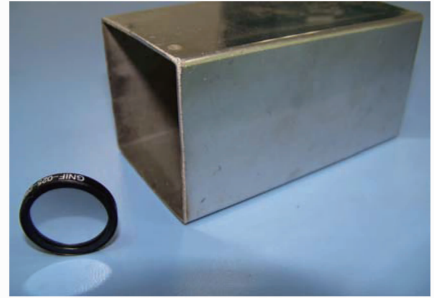


图 4 导光通道与滤光片

Fig. 4 Light guide channel and filter

6 结 论

针对电力设备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强弱的依据。导光与紫外滤光的引入增加了系统测试的可靠性,使环境适应能力更强。以通道型光电倍增管作为传感器的检测系统,能对放电的紫外辐射进行实时监测,可以应用于变压器局部放电的检测及输电线路的监测等领域,在电力设备的放电检测上具有实用意义和应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yang Yi, Dong Aihua. Overview of low voltage fault arc detection[J]. *Low Voltage Apparatus*, 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
- 2 Song Zhengxiang, Li Dongwei, Chen Huilin. Research and analysis on low voltage arc fault[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2009, (17): 1~4
宋政湘, 李东玮, 陈会林. 低压电弧故障的研究与分析[J]. *低压电器*, 2009, (17): 1~4
- 3 Jin Guiping, Pang Qichang. 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
- 4 Wang Shenghui, Lü Fangcheng, Li Yanqing *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
- 5 Wang Shenghui, Lü Fangcheng, Li Heming. 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
- 6 L. H. Germer. Physical processes in contact erosion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1958, **29**(7): 1067~1082
- 7 Zhang Haifeng, Pang Qichang, 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
- 8 Feng Zhiguo, Zhang Shuang, Yang Jiaxiang *et al.*. Corona discharge analysis on transmission line with raindrop in rain and fog[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2010, **32**(2): 145~148
- 冯治国, 张爽, 杨嘉祥等. 雨雾天气对导线电晕放电的影响分析[J]. *黑龙江电力*, 2010, **32**(2): 145~148
- 9 Wang Liping. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1770~1774
- 王丽萍. 双谱段全景电晕探测光学系统[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1770~1774
- 10 G. D. Gregory, G. W. Scott, D. Co. Square *et al.*. The arc-fault circuit interrupter: an emerging product[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, **34**(5): 928~933
- 11 G. D. Gregory, W. Kon, R. F. Dvorak. More about arc-fault circuit interrupters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, **40**(4): 1006~1011
- 12 Huang Shaoping, 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
- 13 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Optimal design and arithmetic on stack of angle-tuned filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1287~1291
- 俞侃, 刘文, 黄德修等. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1287~1291
- 14 Yu Kan, Huang Dexiu, Fan Ling *et al.*. Research on bandwidth depolarization of the angel-tuning filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 214~217
- 俞侃, 黄德修, 樊玲等. 角度调谐滤光片带宽消偏振研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 214~217