

两种紫外成像仪检测电晕放电的对比研究

贺振华¹, 王 玮¹, 黄文武¹, 邓 慰², 李炼炼², 张 瑞², 白 波²

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518020; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 文中通过提取紫外成像放电区域的面积, 分别用 CoroCAM504 型的紫外成像仪和 OFIL 系列的紫外成像仪进行了棒—板间隙放电紫外成像特征的定量研究, 对比分析目前两种主流紫外成像仪在检测电晕放电时的区别。试验表明: ①在物距相同的条件下, 两种紫外成像仪图像清晰度以及视场角不一致, OFIL 系列更适合于细节拍摄; ②在相同的情况下, 随着增益的增加, 两种紫外成像仪的光斑面积也相应增加, 两者之间近似满足指数关系; ③在相同的情况下, 两种紫外成像仪的光斑面积都随距离的增加而减小, 近似满足指数的变化特性; ④在相同的试验条件下, 相同电压等级下 OFIL 系列的紫外成像仪的紫外成像光斑面积大约为 CoroCAM504 型的紫外成像仪的 0.5 倍, 增益值大约为 CoroCAM504 型的紫外成像仪的 2 倍。

关键词: 视场角; 光斑面积; 紫外成像仪; 增益; 电晕

中图分类号: TM851 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)08-0080-07

Comparative Study on Corona Discharge Detection with Two Ultraviolet Imagers

HE Zhenhua¹, WANG Wei¹, HUANG Wenwu¹, DENG Wei²,
LI Lianlian², ZHANG Rui², BAI Bo²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518020, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on calculating the area of ultraviolet image discharge, the UV image quantitative research for rod-plate air gaps discharge was carried on by using the type of CoroCAM504 and OFIL series ultraviolet(UV) imagers respectively. The purpose of this study was to carry out comparative analysis to the difference about detecting corona discharge between the two main UV imagers at the moment. The study shows that: ①At the same condition of object distance, the image definition and field angle of two UV imagers are different; In contrast, the OFIL series is more suitable for shooting in details; ②At the same condition, the discharge facular areas of two UV imagers both increase, with the increase of the gain. The gain and discharge facular area approximately satisfies exponential function; ③At the same condition, the discharge facular area of two UV imagers both decrease when increasing the distance. The distance and discharge facular area is approximately exponential; ④Under the same test conditions and the same voltage level, the discharge facular area of OFIL series ultraviolet image detecting instrument is about 0.5 times of CoroCAM504's, and the gain value of OFIL's is about 2 times of CoroCAM504's.

Key words: field angle; the discharge facular area; ultraviolet imager; gain; corona

0 引言

随着中国经济的高速增长, 工厂企业用电负荷日益增加, 大规模用电的需求日益突出^[1-2]。超高压

输电线路和变电站电气设备在长期的电、热、机械应力的作用下不可避免的会出现绝缘劣化、老化甚至损坏的问题, 在一定的条件下, 设备的表面会出现电晕放电现象, 但这种放电一般表现为弱放电, 其辐射的光波波长主要分布于紫外波段 (200~400 nm), 人

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-03-11

基金项目: 深圳供电局有限公司科技项目(03BEHK1300153)。

Project Supported by Shenzhen Power Supply Bureau Ltd. Technology Project(03BEHK1300153).

眼很难直接观察到, 需要通过相应设备进行检测^[3]。电晕放电的检测方法很多, 其自身高电压强电磁环境会带来干扰, 影响现场测量准确性。传统的检测方法如声波检测法和超高频法由于环境干扰而难以进行精确的故障定位; 红外成像仪只能在设备因较高温度散发热量的时候检测到, 而且很容易受到外界环境的影响。相对于红外辐射, 紫外辐射在传播过程中不易衰减, 而日盲区紫外辐射不易受太阳光干扰, 较为稳定。由于紫外成像仪采用双通道图像融合技术, 将紫外光与可见光叠加, 即可精确定位电晕的故障区域以及放电强度。同时, 紫外成像仪具有远距离、非接触、抗干扰、实时性等优点, 适合于高压设备外绝缘特性的在线监测和故障诊断中^[4-6]。

20 世纪 90 年代末, 美国、南非和以色列等国将紫外成像仪应用于高压输电线路和设备绝缘状态检测领域, 为其绝缘特性的研究提供了一种比较成熟的技术手段。目前, 国内电力系统使用的紫外成像仪基本都是从以色列和南非进口, 也有少数几家供电公司购买了俄罗斯的紫外电子光学探伤仪。自 2002 年 8 月以来, 国内几个大城市的电力高压实验室也开始进行紫外成像仪的应用试验, 并取得初步效果。但在相同的试验条件下, 不同的紫外成像仪测量结果有一定的区别, 譬如光子数、背景噪声、灵敏度。目前在中国电力系统中使用的紫外成像仪主要有两种, 一种是南非生产的 CoroCAM504 型的紫外成像仪, 一种是以色列生产的 OFIL 系列的紫外成像仪, 这两类紫外成像仪的成像原理是相同的, 但在仪器的具体设计上存在差异, 导致检测到的结果存在较大的差异^[7-14]。鉴于以上测量结果的不一致性, 笔者在国网电力科学研究院进行了相关的研究, 主要通过表征电晕放电的相关参数来说明目前国内两种主流紫外成像仪之间的差异, 为制定统一的输变电紫外检修导则提供参考。

1 紫外成像仪测量原理

整个成像系统由可见光通道和紫外光通道两部分组成, 高压设备实物反射出的光信号为可见光, 放点区域辐射出的光信号对应着紫外光, 两者同时进入紫外成像仪, 被分光镜分成两路信号, 一路进入可见光通道, 另一路进入紫外光通道, 见图 1。

可见光信号经过 CCD(光电耦合器)^[15-16]实现光电转换, 最终输出数字图像信号, 即显示设备本体的影像; 放电辐射出的紫外光信号首先经过紫外太阳盲滤镜后, 只保留其中紫外部分。由于信号较微弱, 放大器对信号进一步放大, 最终经过 ICCD(intensi-

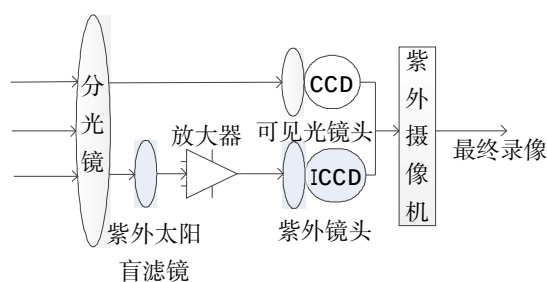


图 1 紫外线的波谱分布

Fig. 1 Spectrum distribution of UV

fied charge coupled device)形成紫外图像。两者图像相互叠加, 即可实现高压设备放电区域的精确定位。

ICCD 实际上是一种增强型 CCD, 在入射光子与 CCD 之间加装了像增强器。像增强器主要由光阴极、微通道板以及荧光屏组成, 光阴极在紫外光子的作用下, 释放出电子, 然后经过微通道板中加速电磁场的作用后以及电子倍增器的作用, 与荧光屏发生强烈的碰撞, 从而产生更多的光子, 增强光子的亮度, 最终实现微弱紫外信号的放大, 见图 2。

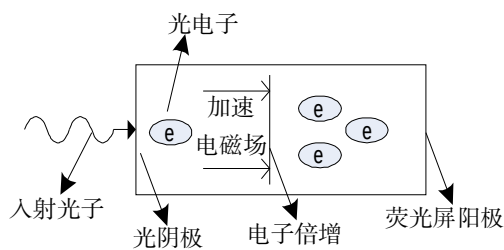


图 2 像增强器信息过程示意图

Fig. 2 Information process diagram of image intensifier

2 成像效果对比研究

为了研究南非 CoroCAM504 和以色列 OFIL 的紫外成像仪的画面清晰度, 分别在远景和近景模式对同一输变电设备进行了对比研究, 其中环境条件以及测试距离均相同。图 3 为远距离测试对比图, 图 4 为近距离测试对比图。

由测试对比图 3、4 可知, 在成像清晰度方面, 以色列 OFIL 紫外成像仪优于南非 CoroCAM504, 这是由分辨率决定的, 分辨率越高, 屏幕水平方向或者屏幕垂直方向显示的点数就越大。同时 OFIL 能够简易快速的定位, 这是因为其窄角度光学 5Hx3.75V 度, 不用影像处理, 图像更清晰, 无模糊现象。CoroCAM504 相对较难定位, 这是因为宽角度光学 8Hx6V 度, 需要录像仪作影像处理, 摄像可能会模糊不清。在实际应用中, 假设 CCD 尺寸为 $h \times v$, 实物尺寸为 $H \times V$, 对于镜头的选取, 可参照如下焦距 f 与物距 D 之间的简单关系式:

$$f = v \times \frac{D}{V}; \quad (1)$$



(a)CoroCAM504 远距离成像



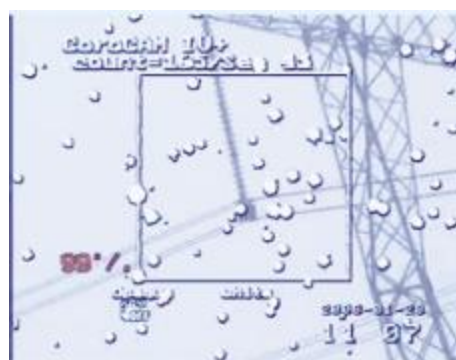
(b)OFIL 远距离成像

图 3 远距离成像图

Fig. 3 Remote imaging



(a)CoroCAM504 近距离成像



(b)OFIL 近距离成像

图 4 近距离成像图

Fig. 4 Near-distance imaging

$$f = h \times \frac{D}{H} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,镜头的放大倍数可以粗略地表示为焦距与物距的比值。在物距一定的情况下,焦距 f 越大,放大倍数也就越大,所成的像也就越大,拍摄的目标也就越清晰,这种情况下适合近距离拍摄;焦距越小,放大倍数相应越小,所成的像也就越小,拍摄的目标细节不够清晰,但可以大大增加拍摄的范围。

由测试图视场区域可知,以色列 OFIL 的紫外成像仪视场角要小于南非 CoroCAM504,这是由焦距决定的。一般来说,视场角与焦距反相关,焦距越大,视场角越小;焦距越小,视场角越大^[17]。所以,在同一距离下拍摄,以色列 OFIL 的紫外成像仪的焦距要大于南非 CoroCAM504。图 5 为焦距与视场的关系图。

由对比测试图知,OFIL 紫外探测器滤镜灵敏度高,捕捉到的放电光斑更多这是因为其灵敏度高达 $3 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$,光收集区域大,能够在距离目标物 8 m 外检测到 1.5 pC 的微弱放电,能够对移动目标进行检测,且输出图像没有任何拖尾。OFIL 的灵敏度比 CoroCAM504 高 3 倍,可观测更远的距离。为了进一步研究两种紫外成像仪在电晕放电检测的差异

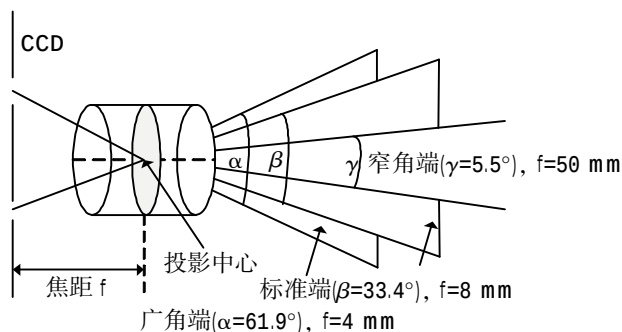


图 5 焦距与视场角的关系

Fig. 5 Relation of focus and field angle

性,笔者在国网电力科学研究院进行了相关的定量研究。

3 电晕放电对比研究

3.1 试验方案

通常在高电压和强电场的工作条件下,电晕放电连续性较差,不够稳定,亦容易产生局部的电弧放电。为了增强放电的持续性,在试验场进行模拟试验时会采用典型的极不均匀电极—棒—板间隙来获得稳定的电晕放电信号。电极在产生电晕放电的同时,周围空气中的电子不断进行能量的交换,当电子释放能量时,便会释放紫外线^[10-13]。文中运用仪器检测在不同的电压和距离下情况下研究棒—板间隙

放电的紫外成像特征来说明两种紫外成像仪之间的差异。

图 6 为试验系统的接线原理图。HY-AC20 工频高压试验控制台为极不均匀放电模型提供工频高压;文中试验采用棒—板放电模型,其中棒电极直径为 3.2 cm,其头部为圆锥形,顶端半径约 1.5 mm,板电极尺寸为 1.5 m×1.5 m;电晕放电的图像由紫外成像仪探测,为了便于分析放电的动态过程,输出的视频信号由外接的视频录制设备进行存储。

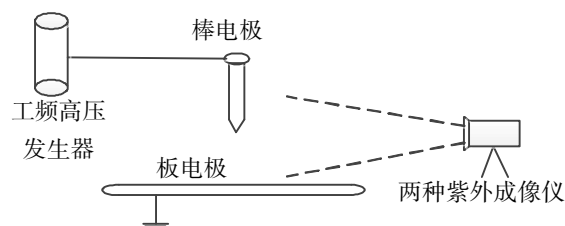


图 6 试验系统的接线原理图

Fig. 6 Wiring principle diagram of test system

紫外成像属于一种带电检测方法,在工程实际检测中,其检测的距离并不是固定的;同时紫外成像仪对检测光子数信号衰减或放大的比例即增益也要根据放电的强弱来进行调节,而距离和增益对紫外成像的检测结果有着明显的影响。因此对比研究南非 CoroCAM504 和以色列 OFIL 的紫外成像仪的差异时,需要保持在相同的试验环境(如温度、湿度、气压等)。

具体试验步骤如下:

1)在某一间隙距离下,根据棒—板间隙的击穿特性估计其击穿电压 U_0 ,试验时给棒—板间隙逐渐增加电压,但电压的最大值不大于 $0.8U_0$ 。

2)在某一放电强度下保持电压不变,然后在不同的距离下分别改变仪器增益,并记录紫外成像输出的视频信号。试验中除了改变成像仪的增益外,其他参数采用默认设置。试验中距离的变化范围为 4、8、16、30 m(32 m)。

3.2 试验结果及分析

紫外图像中的光斑(放电发光区域所成的像,文中将其简称为“光斑”)大小随放电强弱而动态变化,基于此特点,笔者从紫外视频中连续截取连续的 100 帧大小为 720×576 像素的紫外图像,然后对各帧紫外图像进行数字图像处理分割出光斑区域,统计区域中像素点的个数,其定义为“光斑面积” s ,分别统计每一帧的图像中的光子面积,然后取平均值。

3.2.1 光斑面积与仪器增益的关系

为了满足不同电晕放电强度监测的需要,监测前需调节紫外成像仪的增益,文中研究了在不同的

电晕放电强度下光斑面积与增益之间的关系,其中电压等级为 100 kV,观测距离为 16 m,曲线见图 7。

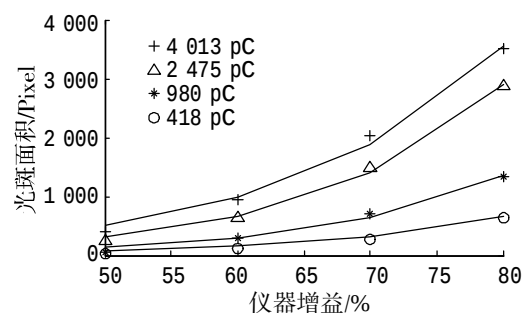


图 7 光斑面积与增益关系曲线

Fig. 7 Relation curve graph of discharge facular area and gain

由图 7 可知,在同一观测距离和仪器增益的情况下,随着电晕放电强度的增加,紫外成像的光斑面积也会相应增加。在同一观测距离和相同的放电强度下,随着紫外成像仪的增益增加,其光斑面积也显著增加。

根据放电光辐射的机理可知,光辐射强度与单位体积内的正离子、电子的密度及电子的温度有关,因此放电区域中心的发光强度高,而越靠近边缘则亮度越底。调节紫外成像仪的增益实际上是调节其 MCP(微通道板)两端的工作电压,增益越大,两端工作电压越高,则 MCP 内的电场强度越大,光电子在 MCP 内的碰撞电离越强烈,MCP 输出侧输出的电子密度增加,因而可探测到更大的放电区域,紫外成像仪输出的放电光斑面积越大。观测其数据点的变化趋势可知其近似按指数规律变化,为此采用指数拟合曲线方式,得出如下拟合公式,见表 1。由表 1 可知,各拟合函数的 R 值接近于 1,表明回归曲线对观测值的拟合程度较好,这说明其拟合公式与实际数据有着较高的拟合度。

表 1 光斑面积与增益拟合函数表达式

Tab. 1 The expression of fitting function between discharge facular area and gain

放电量/pC	拟合函数表达式	拟合优度 R
418	$s(g)=1.632e^{0.07466g}$	0.986 6
980	$s(g)=3.656e^{0.07391g}$	0.978 0
2 475	$s(g)=8.879e^{0.07241g}$	0.993 8
4 013	$s(g)=21.770e^{0.06369g}$	0.988 9

3.2.2 光斑面积与观测距离的关系

为了满足实际不同距离监测的需要,文中研究了在不同的电晕放电强度下光斑面积与距离之间的关系,其中电压等级为 100 kV,增益值固定,曲线见图 8。

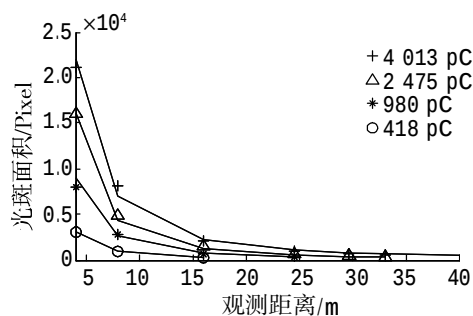


图 8 光斑面积与距离关系曲线

Fig. 8 Relation curve graph of discharge facular area and distance

在放电强度近似不变时,随观测距离的增加,放电光斑面积呈现减少的趋势。这种现象可以通过紫外光学成像的原理解释,电晕放电点经过紫外透镜后在光电阴极上成像的基本原理见图 9^[14]。

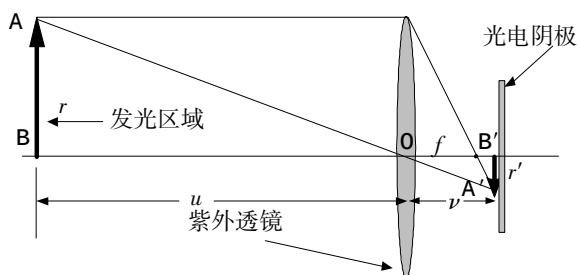


图 9 紫外成像仪紫外通道的工作原理

Fig. 9 Working principle of UV imaging

在图 9 中,假设设备表面放电时发光区域为圆形,可被紫外成像仪检测到的发光区域的半径为 r ,该区域面积记为 s ,光电阴极上像的半径为 r' ,而薄透镜成像满足高斯成像公式

$$\frac{f}{u} + \frac{f}{v} = 1. \quad (3)$$

式(3)中: u 为物距,也即观测距离 d ; v 为像距,光电阴极与紫外透镜距离; f 为透镜焦距。

由 $\triangle ABO$ 和 $\triangle A'B'O$ 的相似关系可得:

$$\frac{r'}{r} = \frac{v}{u} = \frac{v}{d}; \quad (4)$$

$$r' = \nu r d^{-1}. \quad (5)$$

由于紫外成像仪的观测距离较远,可近似认为随观测距离增加相距 ν 不变,由式(5)可知,光电阴极表面像的半径与观测距离成反比例函数关系,相应光电阴极上像的面积 s' 为:

$$s' = \pi r'^2 = \pi \nu^2 r^2 d^{-2}; \quad (6)$$

$$s' = \nu^2 s d^{-2}. \quad (7)$$

由紫外成像仪的工作原理可知,在增益不变的情况下,紫外图像中的光斑面积 s 与光电阴极表面所成像的面积 s' 可认为是一种线性变换关系,设其变换系数为 k ,因而有

$$s = k s' = k \nu^2 s d^{-2}. \quad (8)$$

从式(8)中可知,其紫外图像中的光斑区域的面积与观测距离为平方反比变化关系。在工程应用中,由于紫外通道存在一定的非线性、CCD 尺寸以及 MCP 的饱和特性,其光斑面积随着距离的变化与理论上有所差异。观测其数据点的变化趋势可知其近似按指数规律变化,为此采用指数拟合曲线方式,得出拟合公式见表 2。由表 2 可知,各拟合函数的 R 值接近于 1,表明回归曲线对观测值的拟合程度较好,这说明其拟合公式与实际数据有着较高的拟合度。

表 2 光斑面积与距离拟合函数表达式

Tab. 2 The expression of fitting function between discharge facular area and distance

放电量/pC	拟合函数表达式	拟合优度 R
418	$s(d) = 43\ 020 d^{-1.859}$	0.989 4
980	$s(d) = 104\ 941 d^{-1.826}$	0.995 8
2 475	$s(d) = 197\ 531 d^{-1.838}$	0.991 0
4 013	$s(d) = 271\ 605 d^{-1.813}$	0.970 7

3.2.3 两种紫外成像仪的光斑面积对比研究

为了测试南非 CoroCAM504 和以色列 OFIL 的紫外成像仪在电晕放电检测的性能优劣性,以光斑面积作为对比参量,试验所获得的相关数据见表 3、4。

表 3 CoroCAM504 紫外成像仪测得的光斑面积

Tab. 3 CoroCAM504's discharge facular area

距离/m	增益					
	50	60	70	80	90	100
4	38	336	738	1 573	4 398	5 505
8	—	72	192	518	908	2 053
16	—	67	132	369	629	1 050

表 4 OFIL 紫外成像仪测得的光斑面积

Tab. 4 OFIL's discharge facular area

距离/m	增益							
	80	100	120	140	160	180	200	220
4	30	40	70	100	337	1 348	1 943	2 262
8	—	47	45	70	280	438	694	2 030
16	—	—	—	—	—	120	254	328

基于以上的数据可以得到两种紫外成像仪的光斑面积在不同的距离和增益的变化曲线,分别见图 10、11。

CoroCAM504 和 OFIL 紫外成像仪的光斑面积都随增益的增加而增加,近似满足指数的变化特性,CoroCAM504 的增益值约为以色列增益值的 0.5 倍,这可能是由于 CoroCAM504 采用宽角度光学设计,其拍摄到的图像清晰度不够,从而通过增大其 MCP 增益来提高图像的清晰度。

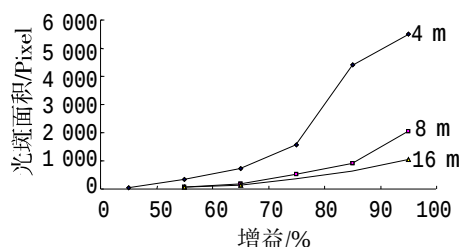


图 10 CoroCAM504 紫外成像仪的光斑面积变化曲线

Fig. 10 Relation curve graph of CoroCAM504's discharge facular area

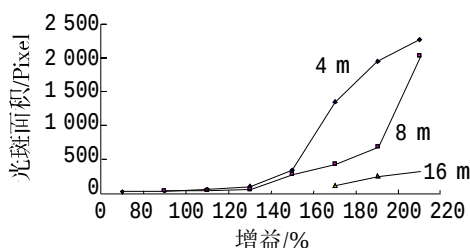


图 11 OFIL 紫外成像仪光斑面积变化曲线

Fig. 11 Relation curve graph of OFIL's discharge facular area

相同情况下, CoroCAM504 的光斑面积近似为 OFIL 的 2 倍, 可能有两方面原因:

1) 两种紫外成像仪的光子数统计算法不一致, 由于光子数的一致从而导致光斑面积的计算结果不相同;

2) 相对于 OFIL 紫外成像仪的窄视角设计, 采用宽视角设计的 CoroCAM504 紫外成像仪捕捉到的放电区域更广, 尽管远离放电中心区域的单个电晕点放电强度较弱, 但从宏观累积的角度讲, 这些放电点形成的区域面积不可忽略。

4 结论

笔者利用紫外成像法以棒—板间隙模型研究了极不均匀电场中的电晕放电, 得到的相关结论如下:

1) 在远景和近景模式下, 两种紫外成像仪拍摄同一输变电设备所得到的紫外图像清晰度以及图像放大倍数不一致。

2) 在物距相同的条件下, 两种紫外成像仪的视场角不一致, OFIL 系列更适合于细节拍摄。

3) 在相同的情况下, 随着增益的增加, 两种紫外成像仪的光斑面积也相应增加, 两者之间近似满足指数关系。

4) 在相同的情况下, 两种紫外成像仪的光斑面积都随距离的增加而增加, 近似满足指数的变化特性。

5) 在相同的试验条件下, 相同电压等级下 OFIL 系列的紫外成像仪的紫外成像光斑面积大约为 CoroCAM504 型的紫外成像仪的 0.5 倍, 增益值大约为 CoroCAM504 型的紫外成像仪的 2 倍。

参考文献:

- [1] 舒印彪. 1 000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19):2-4.
SHU Yinbiao. Research and application of 1 000 kV AC UHV transmission technology[J]. Power System Technology, 2005, 29(19):2-4.
- [2] 尚 春. 特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(1):35-36.
SHANG Chun. Development of ultra-high voltage transmission technology in china southern power grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):35-36.
- [3] 张广洲, 万宝权, 路 遥, 等. 特高压交流试验基地电晕噪声抑制[J]. 高电压技术, 2008, 34(11):2300-2304.
ZHANG Guangzhou, WAN Baoquan, LU Yao, et al. Restraint of corona noise in UHV AC test base[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2300-2304.
- [4] 任成燕, 王 珏, 严 萍, 等. 直流电压下尖板电晕放电及其声特性试验分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(1):226-228.
REN Chengyan, WANG Yu, YAN Ping, et al. Experimental analysis of corona discharges and sound characteristics of needle-plane electrodes under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1):226-228.
- [5] 隋晓杰, 宋守信. 高压输电线路电晕放电分析[J]. 电力建设, 2006, 27(3):37-38.
SUI Xiaojie, SONG Shouxin. Analysis on corona discharged of HV transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(3):37-38.
- [6] DEAN F K, CHAVE Z. Practical PCA-DA system for measurements of leakage current pulses on polymer insulators under wet contaminated conditions[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(2):5-13.
- [7] 律方成, 戴日俊, 王胜辉, 等. 基于紫外成像图像信息的绝缘子表面放电电量化方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2):262-263.
LYU Fangcheng, DAI Rijun, WANG Shenghui, et al. Study of insulator surface discharge quantification method based on ultraviolet imaging image information[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2012, 27(2):262-263.
- [8] 王传莹. 基于紫外成像的高压线路缺陷智能检测的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
WANG Chuanying. Research on high-voltage lines ultra-violet imaging defect detection based on smart[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2011.
- [9] 王少华, 梅冰笑, 叶自强, 等. 紫外成像检测技术及其在电气设备电晕放电检测中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(11):92-97.

- WANG Shaohua, MEI Bingxiao, YE Ziqiang, et al. Ultraviolet imaging detection technology and application in corona discharge detection of electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 92-97.
- [10] 马 斌, 周文俊, 汪 涛, 等. 棒—板模型交流电晕放电紫外数字图像处理及其应用判[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 74-79.
- MA Bin, ZHOU Wenjun, WANG Tao, et al. Rod-plate model AC corona discharge UV digital image processing and its application sentenced[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 74-79.
- [11] 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): 15-20.
- WANG Shenghui, LYU Fangcheng, LI Heming. Study on image enhancement method of high voltage equipment corona UV imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 15-20.
- [12] 李和明, 王胜辉, 律方成, 等. 基于放电紫外成像参量的绝缘子污秽状态评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 22-30.
- LI Heming, WANG Shenghui, LYU Fangcheng, et al. Assessment is based on discharge ultraviolet imaging parameters insulator contamination status[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 22-30.
- [13] 律方成, 戴日俊, 王胜辉, 等. 极不均匀电场中电晕放电紫外成像图像参量变化特性研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(2): 1-7.
- LYU Fangcheng, DAI Richeng, WANG Shenghui, et al. UV imaging study of corona discharge characteristics of image parameters change very uneven electric field[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(2): 1-7.
- [14] 王旭光, 苏 杰. 高压输电线路电晕检测中紫外成像仪示数与检测距离的关系[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(4): 78-83.
- WANG Xuguang, SU Jie. The relationship between readings of ultraviolet imager and observed distances in high-voltage transmission line corona detection [J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(4): 78-83.
- [15] 胡 渝, 荣 建. CCD 的发展现状及展望[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 718-720.
- HU Yu, RONG Jian. The development and expectation of CCD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 718-720.
- [16] 王 义. 基于 CCD 器件信号调理电路的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1554-1555.
- WANG Yi. Signals transform circuit based on CCD devices [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1554-1555.
- [17] 林家明. 面阵 CCD 摄像机光学镜头参数及其相互关系[J]. 光学技术, 2000, 2(2): 183-184.
- LIN Jiaming. Specification data of CCD camera lens and their relations[J]. Optical Technique, 2000, 2(2): 183-184.
- 贺振华(1982—), 男, 硕士, 从事高压试验工作。

(上接第 79 页)

- [17] 朱恒宣. 油浸式变压器绕组热点预测及光纤测温[D]. 河北: 河北工业大学, 2010.
- ZHU Hengxuan. Prediction of hottest spot temperature and temperature measurement with optical fiber in oil-immersed transformer windings[D]. Heibei: Hebei University of Technology, 2010.
- [18] 陈伟根, 苏小平, 周 渠, 等. 基于顶层油温的变压器绕组热点温度计算改进模型[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5): 69-75.
- CHEN Weigen, SU Xiaoping, ZHOU Qu, et al. An improved dynamic model of transformer hot spot temperature based on top oil temperature[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(5): 69-75.
- [19] TANG W H, WU Q H. Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence[M]. New York, USA: Springer, 2011.
- [20] AL-HAMADI H M, SOLIMAN S A. Short term electric load forecasting based on Kalman filtering algorithm with moving window weather and load model[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 68(1): 47-58.
- [21] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling—Part I: theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- 王永强(1975—), 男, 硕士生导师, 副教授, 从事电气设备在线监测及变电站自动化系统等方面研究。
- 岳国良(1971—), 男, 博士, 从事输变电设备状态检修、运维管理以及高电压与绝缘技术研究、变压器类设备状态诊断技术方面研究。
- 何 杰(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。