

## 紫外成像法检测支柱绝缘子的破损缺陷

雷红才<sup>1</sup>, 臧春艳<sup>2</sup>, 蒋正龙<sup>1</sup>, 何爽<sup>2</sup>, 赵新杰<sup>2</sup>,  
叶会生<sup>1</sup>, 尹小根<sup>2</sup>, 何俊佳<sup>2</sup>

(1. 湖南省电力公司实验研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 绝缘子的破损是一种常见缺陷,会影响绝缘子的绝缘性能。特别是线路上运行的绝缘子破损时,可能会导致线路绝缘水平下降,严重时甚至引起电网事故。但传统线路巡检手段难以检测出这一缺陷。笔者采用新兴的紫外成像检测手段,对110kV线路悬式瓷绝缘子串、瓷支柱绝缘子和硅橡胶复合绝缘子含破损缺陷的情况进行人工模拟,观测了不同环境条件下不同破损程度的绝缘子在破损位置不同时的紫外图像。试验结果表明,紫外成像仪作为一种逐渐得到推广的新型线路巡检设备,能有效地检测到部分绝缘子的破损缺陷,从而达到对线路早期故障进行预防的效果。

**关键词:** 紫外成像; 绝缘子破损; 电晕放电

中图分类号: TM216

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)05-0087-05

### Detecting Breakage Defect of Post Insulator with Ultraviolet Imaging Method

LEI Hong-cai<sup>1</sup>, ZANG Chun-yan<sup>2</sup>, JIANG Zheng-long<sup>1</sup>, HE Shuang<sup>2</sup>, ZHAO Xin-jie<sup>2</sup>,  
YE Hui-sheng<sup>1</sup>, YIN Xiao-gen<sup>2</sup>, HE Jun-jia<sup>2</sup>

(1. Electric Experiment Research Institute of Hunan Power Grid Co., Changsha 410007, China;

2. College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Conventional tour inspection along transmission lines is insufficient to the detection of insulator breakage defect. This paper adopts new UV imaging method to simulate the breakages of suspension porcelain insulator string, porcelain insulator pole, and silicone rubber composite insulator on 110kV circuit, observes the UV images of the insulators with different breakage degrees and defect positions under different environment. The results show that UV imaging camera can detect some of the insulator breakage defects for preventing the circuits from early faults.

**Key words:** UV imaging; insulator; breakage; corona discharge

### 0 引言

绝缘子在生产、运输、安装和运行过程中都有可能破损而影响其绝缘性能,特别是安装在输电线路上的各类绝缘子,在运行过程中长期经受机电负荷、日晒雨淋、冷热变化等作用,有时会出现开裂、甚至部分脱落等故障,给电网可靠性带来潜在威胁。近年来,在大力发展的超高压、特高压交直流输电系统中,系统绝缘的可靠性更是直接决定了整个系统的安全水平。因此必须大力发展监测技术,在绝缘子破损缺陷导致故障之前把它及时检测出来,并加以更换。绝缘子的破损包括表面裂缝或部分缺损(脱落)

等,虽然这是一种比较常见的缺陷,但在破损程度不严重时,用传统线路巡检设备难以检测出来,以至发生电网事故,造成无可挽回的损失<sup>[1-3]</sup>。

紫外成像检测是近年来逐渐得到应用的一种新兴检测技术。它基于设备早期故障产生的电晕放电现象,通过检测电离气体发出的紫外光成分在成像仪上生成紫外图谱,分析紫外图谱并结合可见光视频图像可获得对设备相关故障的准确判断<sup>[4,5]</sup>。紫外检测技术具有很多优点<sup>[6-10]</sup>,如:检测过程中可以不与设备接触,不需要中断电网运行,故可用于在线监测;没有红外那样强的背景辐射,故可检测到较早期的故障;不需要像超声波检测那样另外加辅助电源,操作方便;响应速度快,可以大面积检测。另外,它可

收稿日期:2009-04-23

作者简介:雷红才(1974),男,高级工程师,主要从事电网输变电设备的技术管理和研究工作。

以采用直升机巡检,不受地理条件限制,相对传统的人工手持检测设备而言,效率大为提高。所以这一技术在电力设备监测方面有很大的应用和发展潜力,值得深入研究。

## 1 破损瓷绝缘子的紫外成像

### 1.1 悬式绝缘子类

本试验采用 750 kV 工频电压发生器,对型号为 XP-70 的盘形悬式瓷绝缘子进行了破损实验,通过导电杆模拟架空线路,对绝缘子串下端进行加压,绝缘子串上端通过 10 kΩ 无感采样电阻接地。其试验回路见图 1。

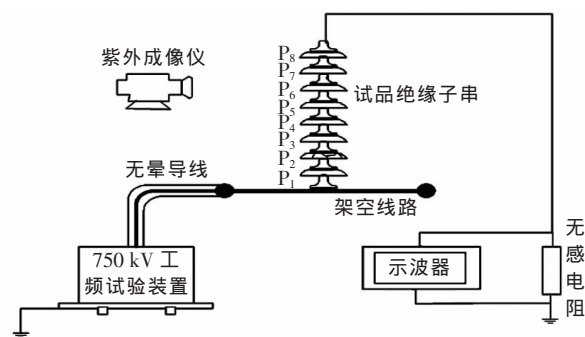
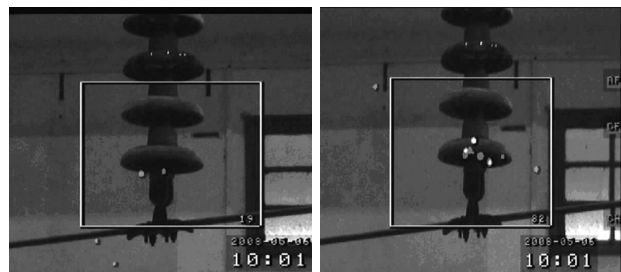


图 1 悬式绝缘子破损试验回路图

对单片绝缘子进行编号,从高压端起依次为  $P_1$  至  $P_8$ 。采用南非彼岸公司生产的 CoroCAM504 紫外成像仪对绝缘子串进行拍摄,拍摄距离为 5 m。紫外成像仪的参数设置如下:UV GAIN 60%;ATTACK 14%;DECAY 14%。环境湿度 78%。试验时匀速升高外施电压,并保证在拍摄的过程中绝缘子周围的环境湿度基本不变。

#### 1.1.1 绝缘子完好

在 8 片瓷绝缘子均完好且干燥的情况下,用紫外仪拍摄到的现象见图 2(a)。向绝缘子串均匀地喷少量水后,拍摄到的图像见图 2(b)。



(a)干燥条件下 (b)湿润条件下

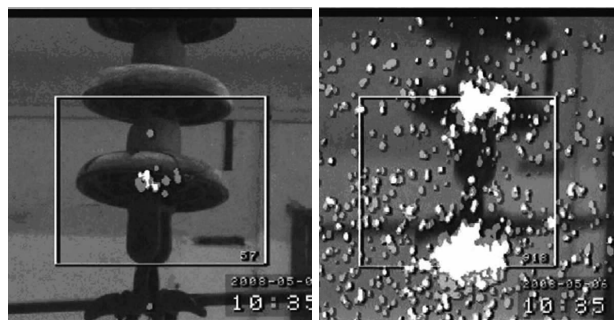
图 2 完好瓷绝缘子串的紫外图像

由图可看出,不管是在干燥还是湿润条件下,电晕放电主要集中在绝缘子高压侧。通过手动调焦可

清楚地观察到紫外光子主要集中在接线夹和第一片绝缘子底部,只是在湿润条件下电晕放电较强一点。

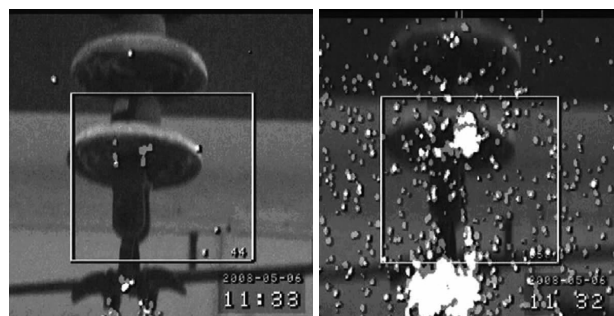
#### 1.1.2 绝缘子开裂

用紫外成像仪观察到高压侧第一片绝缘子  $P_1$  开裂的现象见图 3。然后将开裂绝缘子上移到  $P_2$ (高压侧第 2 片,以下同)的位置,观察到的紫外图像见图 4。



(a)普通模式 (b)夜景模式

图 3  $P_1$  裂缝的紫外图像



(a)普通模式 (b)夜景模式

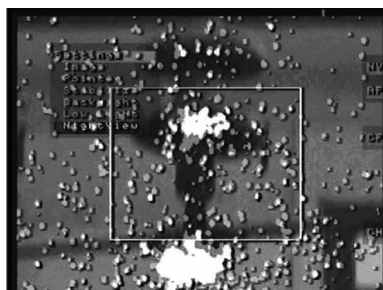
图 4  $P_2$  裂缝的紫外图像

由图可以看出,放电仍然集中在  $P_1$  下部和接线夹处。这说明在高压侧第 1 片绝缘子处拍摄到紫外光子,并不能判定第 1 片绝缘子存在缺陷。紫外光子的聚集可能是由于导线与绝缘子连接的金具部分存在缺陷,或者是设计上的不合理导致高压侧电场集中发生电晕放电。手动聚焦到  $P_2$  裂缝处时有零星的光子,但无法判断这些光子到底是来自裂缝还是由  $P_1$  底部放电漂移上去的。使用紫外仪自带的 Nightview(夜景)模式可以清楚地看到裂缝处几乎没有发生电晕放电,也就是说用紫外成像仪不能辨识高压侧第 2 片绝缘子开裂。根据绝缘子串上的电压分布特征可知,对其他绝缘子片上的裂缝紫外成像仪也不能够检测。

#### 1.1.3 单片绝缘子缺损

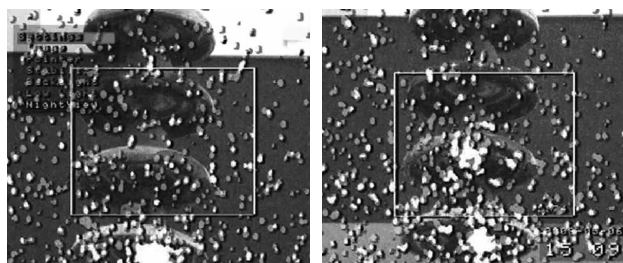
在干燥状态下,将电压加至 170 kV,用紫外成像仪观察  $P_1$  缺损的现象见图 5。

由图 5 可以看出, $P_1$  上存在明显的电晕放电,

图5 P<sub>1</sub> 缺损的紫外图像

但是完好绝缘子串的 P<sub>1</sub> 也能观察到紫外光子,也就是说此处观察到紫外光子并不能断定该绝缘子存在缺陷,所以在实际应用中,使用紫外成像仪不能检测高压侧第一片绝缘子的缺陷。

将缺损的绝缘子片上移至 P<sub>2</sub> 的位置,在干燥状态下,将电压升到 170 kV,用紫外成像仪观察到 Nightview 图,见图 6(a)。



(a)干燥条件下

(b)湿润条件下

图6 P<sub>2</sub> 缺损的紫外成像图

由图可以看出,在缺陷处没有明显的紫外光子。通过测泄漏电流并和完好绝缘子串相比较可知,二者基本相同(1 mA 左右)。可能因为破损绝缘子的绝缘电阻在干燥状态下不会降低很多,其承受的电压不会有很大变化,不足以导致明显的电场畸变,所以没有产生较明显的电晕放电。

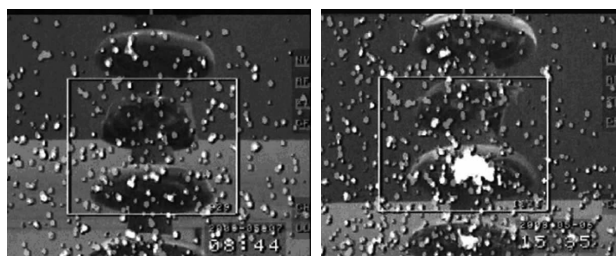
此时在绝缘子串上均匀地喷少量的水,使之处于湿润状态,同样将电压升到 170 kV,用紫外成像仪观察其电晕放电,见图 6(b)。由夜视图可以确定,在湿润状态下,破损的第二片绝缘子发生了电晕放电。说明此时紫外仪可测到第二片绝缘子的缺损状况。

依次将缺损的绝缘子往上移,在同样电压和湿润状态下,用紫外成像仪却观察不到明显的电晕放电(紫外光子聚集)的现象。这可能是由于缺损绝缘子越远离高压侧,对整个绝缘子串的电场分布的影响就越小。

#### 1.1.4 相邻两片绝缘子缺损

另敲破一片绝缘子,和前述缺损绝缘子一起组

成缺损绝缘子组。为避免 P<sub>1</sub> 下部金具放电的影响,在干燥情况下,缺损绝缘子在 P<sub>2</sub> 和 P<sub>3</sub> 的位置加压升到 170 kV,紫外成像见图 7(a)。



(a)干燥条件下

(b)湿润条件下

图7 P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub> 缺损的紫外成像图

由图可以看出,干燥状态下,绝缘子串存在连续两片缺损,用紫外成像仪不能很好地辨识。考虑到绝缘子的电压分布情况,靠近高压侧的绝缘子上承受的电压是最高的,可以推断干燥状态下,任何两片连续缺损,紫外成像仪都不容易检测到,所以干燥情况下的试验不再重复。

在绝缘子串上均匀地喷洒少量的水,将电压升到 100 kV 时,观察到较明显的电晕放电。继续升高电压,可以看到 P<sub>2</sub> 的电晕放电逐渐加剧,当电压升到 170 kV 时,紫外图像见图 7(b)。

由图可以看出,P<sub>2</sub> 上发生了较强的电晕放电,相比图 6(b)中的放电要更强烈一些。这可能是由于 P<sub>3</sub> 的破损程度比较严重,对绝缘子串的电场分布影响较大,使得其放电比较严重。

将缺损绝缘子组往上移,在同样电压和湿润状态下,用紫外成像仪观察不到明显的电晕放电(紫外光子聚集)的现象。分析可能是由于绝缘子串中部所承受的电压最低,所以不易发生电晕放电。

#### 1.1.5 非连续两片绝缘子缺损

将缺损的绝缘子分别放在 P<sub>2</sub> 和 P<sub>4</sub>,均匀地喷洒少量的水,使之呈湿润状态,将电压加到 150 kV 时,P<sub>4</sub> 上面已经出现了紫外光子。由于放电较弱,紫外光子聚集不是很明显。继续升高电压到 170 kV,紫外图像见图 8。

由图 8 可以看出,P<sub>2</sub> 和 P<sub>4</sub> 上有明显光子聚集,同时 P<sub>3</sub> 上也有一些光子聚集。究其原因,可能是绝缘子缺损时,自身绝缘电阻下降,承受电压降低,从而导致相邻的绝缘子电压分布发生畸变,产生电晕放电。这就是说,绝缘子缺损的故障特征有可能会反映在相邻的绝缘子上面。

将两片缺损的绝缘子分别上移到 P<sub>3</sub> 和 P<sub>5</sub>,洒水加压后用紫外成像仪也可观察到和上图类似的图

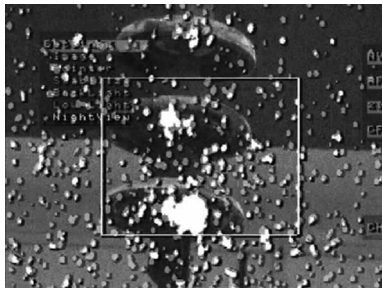


图8 P<sub>2</sub>~P<sub>4</sub> 缺损的紫外图像

像。这说明紫外成像仪对非连续两片绝缘子缺损的情况有较好的检测效果。

### 1.1.6 破损情况分析

将紫外图像进行数字图像处理, 统计上面各试验的结果, 得到表 1。

表 1 紫外成像检测各类绝缘子破损情况统计

缺陷类型	紫外光子数范围	仪器应用效果
全串完好	0~19	可辨识
P <sub>1</sub> 裂缝	57~86	和金具难以区分, 不可辨识
P <sub>n</sub> 裂缝	0~5	不可辨识
P <sub>1</sub> 缺损	51~92	和金具难以区分, 不可辨识
P <sub>2</sub> 缺损	5~27	湿润条件下可辨识
P <sub>m</sub> 缺损	1~7	不可辨识
P <sub>2</sub> 、P <sub>3</sub> 缺损	6~34	湿润条件下可辨识
P <sub>m+1</sub> ~P <sub>m</sub> 缺损	6~8	基本不可辨识
P <sub>2</sub> ~P <sub>4</sub> 缺损	18~51	湿润条件下可辨识
P <sub>3</sub> ~P <sub>5</sub> 缺损	7~20	湿润条件下可辨识

注: n=2, …, 8; m=3, 4, …, 8。

进一步分析可知:

(1) 紫外光子数只是紫外成像仪的一个测量参数。光子数多, 说明电晕放电强烈。但不是光子数多就一定就是紫外仪可确定的故障, 还需要结合紫外图像才能判定是否是对应设备发生了故障。

(2) 只有在湿度较大时, 高压侧第 2、3 片绝缘子缺损, 用紫外成像仪可以比较清楚的反映出来。其他破损类型的检测结果也表明, 湿润条件下电晕放电较容易发生, 使原本不太明显的缺陷会凸显出来。因此建议将紫外成像仪的巡检时间选择在雨后或其他环境湿度较大时。

(3) 湿度较大时, 非连续的两片绝缘子缺损, 用紫外成像仪可以观察到较明显的电晕放电, 但是放电点不一定就是缺陷处。也就是说缺损绝缘子可引起绝缘子串电压分布发生明显畸变, 但电晕放电也有可能发生在其他绝缘子上。

为解释上述现象, 可分析一下电晕放电的发展过程。以直流负极性电晕为例, 当电子引起碰撞电

离后, 电子被驱往远离尖端电极的空间并形成负离子, 在靠近电极表面则聚集起正离子。电场继续加强时, 正离子被吸进电极, 此时出现一脉冲电晕电流, 负离子则扩散到间隙空间。此后又重复开始下一个电离及带电粒子运动过程。

对于绝缘强度一定的气体(空气), 电晕的起始场强是相同的。干燥状态下和湿润状态下, 电晕的起始场强有所不同, 这主要是负离子的作用。因空气中水分子含量增多, 使得空气电离路径上电子被吸附的几率增加, 导致湿润状态下的起始场强高。因此干燥条件下起晕强度低, 发生电晕放电时紫外光子数不高, 紫外仪不易捕捉; 而湿润条件下一旦起晕, 意味着电晕放电强度较高, 紫外光子数值较大, 容易为紫外仪捕获。

另外, 设备表面状况如损伤、雨滴、附着物等, 都会使电晕放电易于发生, 因为它们都会使原有的电场产生畸变。在试验中, 采用喷水的方法增加空气湿润度, 故绝缘子表面有一些水滴附着, 也使得湿润条件下的电晕放电程度加剧。在现场检测中, 雨雾天气也会在绝缘子表面附着水滴, 使绝缘缺陷以电晕放电的形式更明显地在紫外仪中暴露出来。

### 1.2 支柱绝缘子类

本试验采用型号为 ZS2-126/8K 的支柱绝缘子。试品绝缘子在第五片伞群处有严重缺损, 第一片伞群和第二片伞群轻微破损, 并且两片之间存在由于釉层脱落形成的通道。通过均压环对支柱绝缘子上端进行加压, 绝缘子下端通过 10 kΩ 无感采样电阻接地。试验回路见图 9。

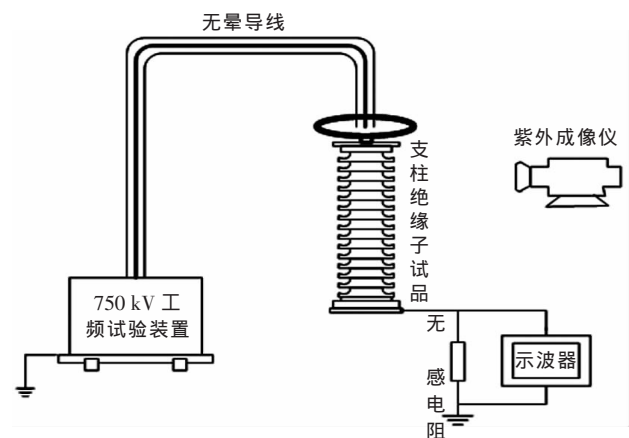


图 9 支柱绝缘子试验回路图

#### 1.2.1 支柱绝缘子正立

在干燥条件和较高电压下, 在没有均压环时, 用紫外成像仪能够观察到绝缘子端部法兰处会有较强的电晕放电, 而缺陷部位无明显的电晕放电; 有均压

环时,无论是在端部法兰,还是在缺陷处,用紫外成像仪均观察不到任何异常电晕现象,见图10(a)。湿润情况下,缺陷处的电晕放电比干燥时的稍微明显一些,见图10(b)。由此可知,在电晕放电不强烈时,电压升高对光子数的影响不大。

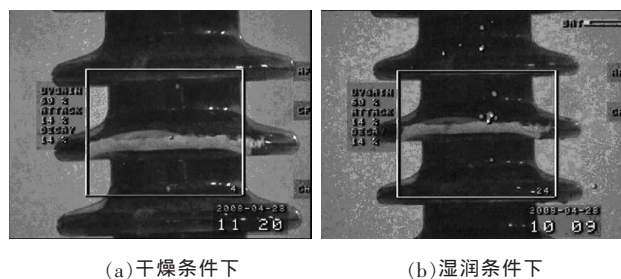


图10 缺陷支柱绝缘子正立的紫外图像

### 1.2.2 支柱绝缘子倒立

考虑到加压后绝缘子的电场分布近似为“U”形曲线,即:高压侧端部场强最大,低压侧电场强度其次,中间场强最小。所以将支柱绝缘子倒立重复了上述试验,看电场重新分布是否会改变缺陷处电晕放电程度,结果见图11。

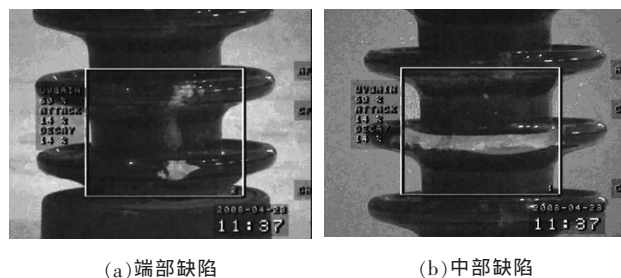


图11 缺陷支柱绝缘子倒立的紫外图像

由图可知,支柱绝缘子倒立后,缺陷处几乎没有产生电晕放电,可能是由于支柱绝缘子加压端的法兰部位电场最集中,倒立后缺陷离加压端较远,缺陷处的电场没有达到起晕场强。

## 2 破损复合绝缘子的紫外成像

本试验采用的硅橡胶复合绝缘子型号为FXBW-110/70。试验回路见图1,只是把瓷绝缘子替换成了单只复合绝缘子。依次在复合绝缘子上人为制造了纵向缺陷和横向缺陷,如伞群缺损、伞群纵向裂缝、芯棒护套裂缝等。

没有均压环的复合绝缘子不管是完好,还是存在前述缺陷,无论是在干燥还是湿润状态下,将电压加到160kV,用紫外成像仪都不能在缺陷位置附近观察到紫外光子,见图12(a)。紫外光子全部集中在绝缘子靠近高压侧端部的金具上,见图12(b)。

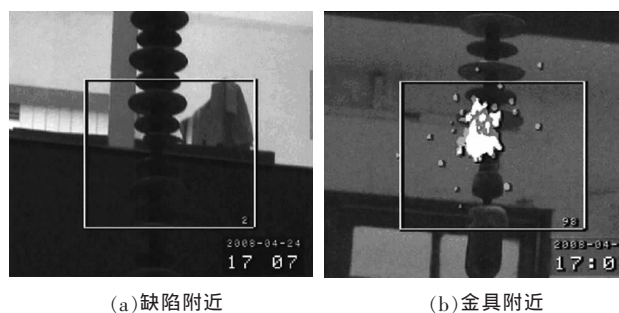


图12 破损的复合绝缘子紫外图像

由图可知,紫外光子总是集中在复合绝缘子靠近加压端部的金具上,这是由于复合绝缘子的分布电容使得该处电场集中产生电晕放电,而缺陷处的场强还不致起晕。所以在其端部加上均压环,改善其电场分布。

## 3 结语

绝缘子开裂、部分脱落等情况会影响绝缘子的绝缘性能,为电力系统的安全运行埋下隐患。但由于该故障早期征兆不明显,用红外等传统线路巡检方式难于检测出。应用紫外成像检测手段对此展开研究,得到如下结论:

(1)紫外成像仪对于绝缘子表面裂缝不能检测,但可以检测靠近高压侧除第1片外的部分单片绝缘子缺损,连续两片或不连续两片绝缘子缺损的情况。据此也可推测多片绝缘子缺损的情况。对于靠近支柱绝缘子加压端的缺陷,紫外成像仪比较容易检测。同时,紫外成像仪对于复合绝缘子伞裙严重缺损、纵向或横向裂缝甚至芯棒护套裂缝等缺陷基本不能检测,但对金具如均压环、接线夹类故障敏感。

(2)使用紫外成像仪的普通拍摄模式可以大致确定放电区域,后改用Nightview模式可以较容易地发现放电点并较精确地定位放电点,所以如果用普通的模式拍摄存在零星的光子导致判断困难时,建议使用夜景模式以帮助判断。

(3)对于各类绝缘子的线路巡检,建议选择在雨、雾等空气湿度较大的天气条件下进行。

## 参考文献:

- [1] 鄂雄,陈勇,丁一正.实现特高压输电线路巡检现代化的新技术系统[C]//输电线路紫外检测技术交流会,武汉,2007(9):1-11.
- [2] 迟殿林,曾庆立,孙立时.用紫外成像检测绝缘子[J].高电压技术,2006,32(2):115-116.
- [3] 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):50-52.
- [4] 李尔宁.电晕放电若干特性的探讨[J].高压电器,1998,(6):16-21.

(下转第95页)

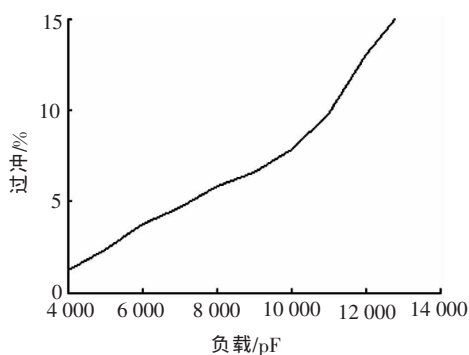


图8 改进电路后过冲随负载的变化

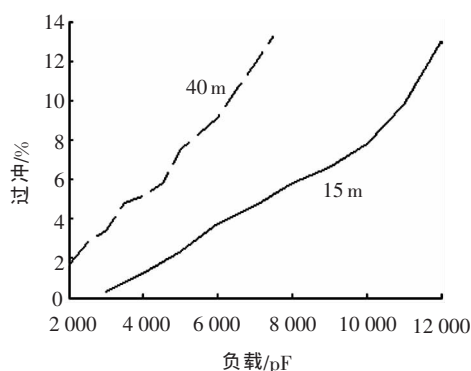


图10 引线长度一定时过冲随负载电容的变化

(2) 计算发现,改进电路后,冲击电压发生器的输出效率随负载电容增大而降低。在 11 000 pF 时效率已经接近 80%(见表 1)。

(3)  $L_{11}$  为发生器接至试品和分压器之间的高压引线电感,引线较长时,其电感不可忽略。其值按照实际经验约取  $1 \mu\text{H}/\text{m}^{[9]}$ 。以 15 m 引线为例,考虑到来回引线,  $L_{11}=30 \mu\text{H}$ 。当引线长度增加时,过冲也会更加明显。负载一定时,过冲随引线长度的变化见图 9。

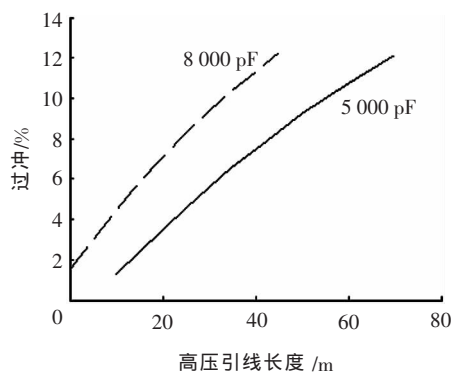


图9 负载一定时过冲随引线长度的变化

引线长度一定时,过冲随负载电容的变化见图 10。由此可见,引线长度增加引起的电感值增大对于输出波形的过冲有着较大的影响。在考虑冲击电压发生器的输出能力时,必须将引线长度考虑在内。

## 4 结论

笔者按新试验标准的波形要求,通过仿真计算,

分析负载对冲击电压发生器输出能力的影响。采取改进回路方法后,对现有的按未考虑大电容试品设计的冲击电压发生器,可将其负载能力从约 4 000 pF 提高到 11 000 pF。但发生器的输出效率会随着负载电容的增大而降低。高压引线的加长会增加相对过冲幅值,在考虑负载能力时,应注意对高压引线长度的限制。

## 参考文献:

- [1] GB/T 16927.1-1997.高电压试验技术 第一部分:一般定义及试验要求[S].
- [2] IEC 60060-1 Ed. 3.0.High-voltage Test Techniques.Part 1: General Definitions and Test Requirements[S].
- [3] 赵有斌,晁学贤.提高冲击电压发生器负荷能力的措施[J].高压电器,1997(1):17-19.
- [4] 赵有斌,李政,王建生,等.冲击电压发生器雷电波的负载特性及其波形分析和改善[J].高压电器,1999(1):19-23.
- [5] 臧绪运,赵刚,孙伟,等.3 600 kV 冲击电压发生器大负载输出特性[J].高电压技术,2002(8):14-16.
- [6] 华中工学院,上海交通大学.高电压试验技术[M].北京:水利电力出版社,1982.
- [7] 张仁豫,陈昌渔,王昌长.高电压试验技术[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [8] 朱士全.大型冲击电压发生器及其试验回路电感的估算与实例[J].变压器,1994(3):27-29.
- [9] 朱士全.冲击试验回路杂散电容的估算与实测[J].变压器,1994(10):21-24.

(上接第 91 页)

- [5] 张海峰,庞其昌,李洪,等.基于 DSP 的紫外可见双光谱图像融合系统[J].哈尔滨工业大学学报,2006(12):2 206-2 207.
- [6] ARBUSOV R S,OVSYANNIKOV A G.UV-Instpection of HV Equipment [C]//Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering,Beijing,Tsinghua University,2005:25-29.
- [7] 程养春,李成榕,沈小军,等.几种合成绝缘子带电检测方法的比较[J].高电压技术,2004,30(6):35-37.
- [8] 寇晓适,陈守聚,夏中原.紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用[C]//输电线路紫外检测技术交流会,武汉,2007(9):58-65.
- [9] 刘云鹏,马国明,律方成.基于紫外成像技术的电气设备放电故障定位[J].高电压技术,2007,33(5):79-82.
- [10] 江华.俄罗斯紫外探伤仪分析及在我国的应用[C]//输电线路紫外检测技术交流会,武汉,2007(9):175-202.