

文章编号: 1000-582X(2012)01-052-07

# 降雨对棒-板(棒-棒)空气间隙交流放电特性的影响

蒋兴良<sup>1</sup>, 奚思建<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 袁耀<sup>1</sup>, 杜勇<sup>2</sup>, 肖丹华<sup>1</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 湖北省电力公司超高压输变电公司, 武汉 430050)

**摘要:** 针对近年来我国输电线路频繁出现风偏闪络事故, 分析认为暴雨是造成输电线路风偏闪络的原因之一。通过模拟降雨试验研究降雨强度、雨水电阻率、环境温度对棒-板(棒-棒)空气间隙交流放电特性的影响。试验结果表明: 降雨强度、雨水电阻率均使棒-板(棒-棒)空气间隙交流放电电压降低, 其中降雨强度对棒-板空气间隙交流放电电压的影响最明显; 降雨强度  $I=2\sim 14$  mm/min 时, 棒-板间隙距离  $d=0.4, 0.6, 0.7$  m 的交流放电电压最大降低幅度分别为 6.73%、6.54%、6.02%, 而棒-棒间隙的最大降低幅度分别为 2.66%、3.22%、3.07%; 降雨强度对棒-板交流放电电压影响大, 对棒-棒影响小; 暴雨情况下环境温度的升高使棒-板空气间隙交流放电电压升高, 其最大变化幅度为 7.03%。

**关键词:** 降雨强度; 雨水电阻率; 环境温度; 电极结构; 交流放电电压

**中图分类号:** TM621.7

**文献标志码:** A

## Influence of rain on AC discharge characteristic of rod-plane(rod-rod) air gap

JIANG Xing-liang<sup>1</sup>, XI Si-jian<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YUAN Yao<sup>1</sup>, DU Yong<sup>2</sup>, XIAO Dan-hua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Hubei EHV Transmission & Substation Company, Wuhan 430050, P. R. China)

**Abstract:** As flashover accidents because of strong wind and storm frequently appear in our country, storms are thought to be one cause of flashover between tower and conducting wires in transmission lines. The influence of rainfall intensity, rainwater resistivity and air temperature on AC discharge characteristic of rod-plane(rod-rod) air gap is mainly investigated. The experimental result shows that, rainfall intensity and rainwater resistivity can reduce AC discharge voltage of rod-plane(rod-rod) air gap, and rainfall intensity has the most obvious effect on AC discharge voltage of rod-plane air gap; when rainfall intensity ranges from 2 to 14 mm/min, AC discharge voltage maximum reduction of 0.4, 0.6, 0.7 m rod-plane gap is respectively 6.73%, 6.54%, 6.02%, and maximum reduction of rod-rod gap is respectively 2.66%, 3.22%, 3.07%; the influence of rainfall intensity on AC discharge voltage of rod-plane is bigger than rod-rod's; AC discharge voltage of rod-plane air gap increases with the increase of air temperature, and the maximum amplitude is 7.03%.

**Key words:** rainfall intensity; rainwater resistivity; air temperature; pole structure; AC discharge voltage

收稿日期: 2011-07-10

基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2009CB724503)

作者简介: 蒋兴良(1961-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事高电压绝缘技术、气体放电以及输电线路覆冰及防护工作, (E-mail) xljiang@cqu.edu.cn.

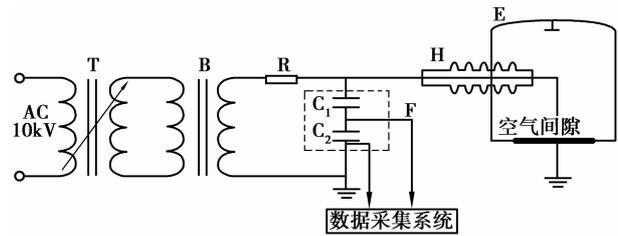
随着我国电网建设的迅速发展,电网规模的扩大,通过恶劣气候条件地区的输电线路日益增多,大风暴雨导致输电线路频繁跳闸,且输电线路重合闸成功率较低,严重影响供电的可靠性<sup>[1]</sup>。近年来风偏放电事故频繁发生,国内相关领域专家分析认为强风和暴雨天气是导致输电线路发生故障的重要因素,其中风使导线-杆塔的间隙距离减小,暴雨使导线-杆塔的交流放电电压降低,两者综合作用影响输电线路的安全运行<sup>[2-5]</sup>。目前国内外在输电线路设计中只考虑了纯空气间隙的电气绝缘强度作为技术依据,并没有考虑空气间隙中存有雨滴对间隙电气强度的影响。文献<sup>[6]</sup>首次研究了风雨对导线-杆塔空气间隙的交流放电,其结果表明空气间隙为 0.6~1.2 m 在强降雨与强风作用下,会使空气间隙的放电电压降低。目前关于强降雨条件下的空气间隙淋雨试验研究比较少,有必要进行不同降雨环境下不同电极结构空气间隙交流放电特性的试验研究,为暴雨(特大暴雨)气象环境下输电线路的设计提供依据。

笔者在多功能人工气候实验室模拟降雨,对棒-板(棒-棒)空气间隙交流放电特性进行了试验研究。

## 1 试验装置及方法

试验研究是在重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室完成的,其中棒-板空气间隙的交流淋雨试验是在直径 7.8 m、高 11.6 m 的多功能人工气候室进行的;棒-棒空气间隙的交流淋雨试验是在试验大厅里进行的。试验原理电气布置如图 1 所示。多功能人工气候室的温度、湿度和气压均可控制,其中环境温度由制冷系统控制,可模拟不同的环境温度(-45~50 ℃);大气参数的测量使用芬兰 Vaisala 公司生产的 PTU200 温、湿度和气压综合数字式测量仪,在环境温度为 20 ℃ 时温度误差为 ±0.2 ℃、相对湿度误差为 ±1%、气压测量的误差为 ±0.3 hPa;试验电压由 YDTW-500kV/2000kVA 交流试验变压器提供,其短路阻抗为 6.0%,最大短路电流为 75 A;交流电源满足 IEC 标准对试验电源的要求。

棒-板空气间隙为垂直布置,棒电极为直径 19.6 mm、长 618.3 mm 的金属避雷针,其尖端为直径 2 mm 的圆锥,板电极为直径 3 m 的圆形铁板。棒-棒空气间隙中,接地棒电极连接在一块边长为 230 mm 的铁板上,且试验在无金属地板的试验大厅里进行,以减少对棒-棒电极结构中电场分布的影响。试验时,分别对间隙距离  $d=0.2、0.4、0.6、0.7$  m 4 种空气间隙进行淋雨试验;每次试验记录



T—调压器;B—试验变压器;R—保护电阻; $C_1, C_2$ —电容;  
F—电容分压器;H—穿墙套管;E—人工气候室

图 1 试验原理示意图

雨水温度、环境温度、雨水电导率、降雨强度、交流放电电压。模拟降雨装置是由一组符合 IEC 规定的标准喷头,雨水运动路径与放电路径的夹角保持在 45°左右<sup>[7]</sup>;采用 JFZ-01 型数字式雨量计测量降雨强度;雨水电导率及雨水温度采用 DD-810E 精密型电导率仪测量;试验过程中的雨水电阻率<sup>[7]</sup>按式(1)校正到 20 ℃ 时的值:

$$\rho_{20} = \rho_t \alpha, \quad (1)$$

式中: $\rho_{20}$  和  $\rho_t$  为 20 ℃ 和  $t$  ℃ 的电阻率; $\alpha$  为温度校正系数。

每个试验点的有效试验次数至少 10 次,为了保证试验数据的有效性,每隔 3~5 min 进行降雨强度的测量,保证降雨强度在有效范围之内,再进行加压试验。为了减少试验结果的分散性,空气间隙的降雨分布要尽量分布均匀;由于空气间隙交流放电特性的分散性不大,因此采用均匀升压法进行试验<sup>[8]</sup>;在空气间隙淋雨试验中舍弃标准偏差大于 5% 的试验结果。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

通过人工气候室模拟降雨试验,进行 0.2~0.7 m 棒-板空气间隙在不同降雨强度、雨水电阻率以及环境温度下的交流放电电压试验数据及大气参数如表 1 所示。表 1 中: $d$  为间隙距离; $P$  为大气压强; $t_a$  为环境温度; $I$  为降雨强度; $\rho_{20}$  为校正到 20 ℃ 的雨水电阻率; $U_b$  为交流放电电压; $\sigma$  为标准偏差。

表 1 人工气候室模拟试验结果及试验环境

$d/m$	$P/kPa$	$t_a/^\circ C$	$I$ /( $mm \cdot min^{-1}$ )	$\rho_{20}$ /( $\Omega \cdot cm$ )	$U_b/kV$	$\sigma/\%$
0.7	98.6	21.9	0 (干燥环境)	—	253.52	1.62
0.7	98.4	20.4	0 (淋雨后)	—	264.21	0.16
0.7	98.6	23.2	2	2 604	257.33	2.13

续表

$d/m$	$P/kPa$	$t_a/^\circ C$	$I$ $/(mm \cdot min^{-1})/(\Omega \cdot cm)$	$\rho_{20}$ $/(mm \cdot min^{-1})/(\Omega \cdot cm)$	$U_b/kV$	$\sigma/\%$
0.7	98.6	19.7	4	2 604	252.63	2.45
0.7	98.6	20.6	8	2 604	247.45	3.29
0.7	98.6	21.1	9	2 604	246.11	3.31
0.7	98.6	21.5	14	2 604	241.83	3.21
0.7	98.6	20.8	9	500	235.03	0.91
0.6	98.6	21.7	0 (干燥环境)	—	219.98	2.17
0.6	98.6	22.4	0 (淋雨后)	—	226.02	0.32
0.6	98.6	23.3	2	2 604	221.09	2.46
0.6	98.6	21.5	4	2 604	217.08	1.83
0.6	98.6	21.2	6	2 604	213.98	0.77
0.6	98.6	22.4	8	2 604	211.48	2.75
0.6	98.6	21.5	9	2 604	209.53	3.76
0.6	98.6	22.8	12	2 604	207.93	2.61
0.6	98.6	22.6	14	2 604	206.63	1.71
0.6	98.6	22.1	9	500	194.83	1.06
0.4	98.6	22.4	0 (干燥环境)	—	161.44	3.05
0.4	98.6	20.5	0 (淋雨后)	—	166.24	0.93
0.4	98.6	22.2	2	2 604	163.28	3.56
0.4	98.6	20.0	4	2 604	161.13	1.53
0.4	98.6	17.4	6	2 604	158.55	1.28
0.4	98.6	18.6	8	2 604	157.53	1.45
0.4	98.6	20.7	9	2 604	156.83	1.24
0.4	98.6	20.7	12	2 604	154.33	1.25
0.4	98.6	22.5	14	2 604	152.92	1.15
0.4	98.6	19.2	4	1 000	159.51	0.99
0.4	98.6	18.3	6	1 000	157.93	1.05
0.4	98.6	20.0	9	1 000	155.37	0.53
0.4	98.6	19.7	4	666.67	158.55	0.95
0.4	98.6	19.7	9	666.67	153.03	2.37
0.4	98.6	20.5	4	500	157.21	0.73
0.4	98.6	20.5	6	500	155.58	0.95
0.4	98.6	20.5	9	500	149.43	0.16
0.4	98.6	8.1	9	2 604	151.85	0.45
0.4	98.6	10.2	9	2 604	152.24	0.46
0.4	98.6	11.8	9	2 604	153.15	0.22
0.4	98.6	14.3	9	2 604	154.21	0.37
0.4	98.6	15.9	9	2 604	155.82	0.57
0.4	98.6	18.0	9	2 604	158.06	1.34
0.4	98.6	19.2	9	2 604	159.17	0.33
0.4	98.6	21.5	9	2 604	160.83	0.07
0.4	98.6	25.2	9	2 604	162.52	0.48
0.2	98.6	23.2	0 (干燥环境)	—	79.13	4.23
0.2	98.6	22.1	0 (淋雨后)	—	82.47	1.12
0.2	98.6	20.5	9	500	72.08	1.24

## 2.2 棒-板空气间隙的淋雨试验结果分析

### 2.2.1 不同环境对空气间隙交流放电电压的影响

由表 1(不同空气间隙距离  $d=0.2、0.4、0.6、$

$0.7$  m 淋雨后,雨水电阻率  $\rho_{20}=500\Omega \cdot cm$ 、降雨强度  $I=9$  mm/min 以及干燥环境)中的试验数据绘制出空气间隙距离  $d$  与交流放电电压  $U_b$  的关系如图 2 所示。由图 2 可知,淋雨后棒-板空气间隙交流放电电压升高,其主要是由于淋雨后棒-板空间间隙存在大量水气分子,会吸附放电产生的电子,阻碍放电的发展;大暴雨情况下,不同空气间隙距离的交流放电电压  $U_b$  有不同程度的降低,其主要受到空气间隙中雨滴数量和雨滴电阻率对空间电场分布的影响,则强降雨情况下输电线路中就有可能发生放电现象,进而影响线路的正常运行。

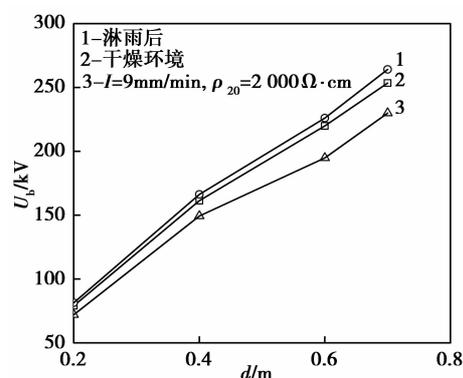


图 2 不同环境下的交流放电电压

由此可知,雨滴对棒-板空气间隙放电的影响主要有 3 个方面:一是雨滴对放电过程产生的电子或离子的吸附作用,阻碍空气间隙放电的发展;二是雨滴的存在使得空气间隙存在大量水分子,从而使空气间隙的绝对湿度增加,提高空气间隙的交流放电电压  $U_b$ ;三是雨滴在空气间隙中对电场的畸变作用,有利于整个空气间隙放电的发展,降低空气间隙的交流放电电压。由于普通雨滴直径比较大,暴雨时一般为  $3\sim 4$  mm<sup>[9]</sup>;整个降雨的过程中,雨滴对空气间隙的电场畸变作用比较大,有利于放电的发展,使交流放电电压降低;同时雨水电阻率会改变雨滴的介电常数,从而对空气间隙放电有一定影响。

### 2.2.2 降雨强度对空气间隙交流放电电压的影响

雨水电阻率  $\rho_{20}=2 604\Omega \cdot cm$ 、不同空气间隙距离 ( $d=0.4、0.6、0.7$  m)、不同降雨强度的情况下,棒-板空气间隙交流放电电压的试验结果如图 3 所示,其试验数据如表 1 所示。图 3 中降雨强度  $I=0$  时的空气间隙放电电压  $U_b$  为淋雨后测得的。由图 3 可知,不同间隙距离的放电电压均随着降雨强度的增加而逐渐降低,其中间隙距离  $d=0.7$  m 的交流放电电压最大降低了 8.47%。相同环境温度条件

下,空气间隙淋雨时产生的大量水气分子数量基本相同,空气间隙放电过程中附着系数相同,则空气间隙放电过程中主要是雨滴对棒板空气间隙电场分布的影响。同一间隙距离下,随着降雨强度的逐渐增加,空气间隙中的雨滴数量逐渐增加,雨滴与雨滴之间的距离( $L$ )逐渐减小,试验中喷头喷出来的雨滴半径( $R$ )基本相同,在相同的两相(空气、雨滴)介电常数差异时,使得体积分数越大( $L/R$  越小);雨滴的表面电场畸变程度逐渐变强,使得空气间隙中电场强度大的点增多<sup>[10]</sup>,有利于空气间隙放电过程中初始电子崩的产生,降低了棒-板空气间隙的交流放电电压。

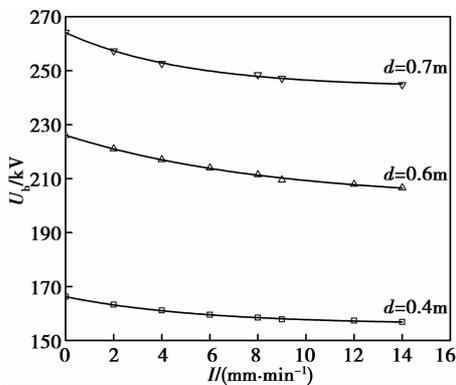


图 3 降雨强度对交流放电电压的影响

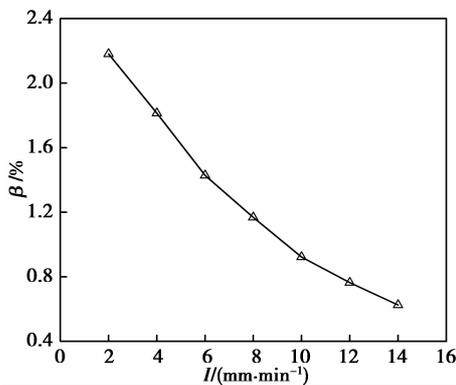


图 4 降雨强度对交流放电电压降低百分比的影响

棒-板空气间隙距离  $d=0.6$  m,降雨强度  $I$  每增加  $2$  mm/min 时,放电电压降低百分数采用公式(2)进行计算:

$$\beta(\%) = 100\% \times [U_b(I) - U_b(I+2)]/U_b(I). \quad (2)$$

由此可以得出曲线,如图 4 所示。由图 3、4 可知,随着降雨强度  $I$  的逐渐增加,交流放电电压的降低百分数  $\beta$  逐渐降低,其中  $\beta$  值在  $0.409\% \sim 1.261\%$  之间。特别是在降雨强度大于  $8$  mm/min,

交流放电电压降低百分数的发展趋势减弱,其主要原因是间隙空间分布的水滴数量趋于饱和,降雨强度的增加主要是雨水运动速度的增加,在空气间隙击穿的瞬间,雨滴的运动速度相对于空气间隙放电的发展速度很小,相当于静止,因此空气间隙中的雨滴数量并没有增加很多,这样雨滴对空间电场的畸变程度趋于平稳,从而使交流放电电压降低百分数降低,同时随着降雨强度的增加,棒-板空气间隙的交流放电电压下降趋于平缓。

### 2.2.3 雨水电阻率对空气间隙交流放电电压的影响

空气间隙距离  $d=0.4$  m、降雨强度  $I=4、6、9$  mm/min 下,分别配置不同的雨水电阻率,其棒-板空气间隙的交流放电电压试验结果如图 5 所示。随着雨水电阻率的增加,放电电压逐渐升高,但是在电阻率很小(电导率很大)时,交流放电电压相对变化比较明显。当雨水电阻率很小时,即  $\rho_{20}=500\Omega \cdot \text{cm}$ ,随着降雨强度的逐渐增大,0.4 m 棒-板空气间隙的交流放电电压下降趋势变得比较明显。当雨水电阻率  $\rho_{20} < 1000\Omega \cdot \text{cm}$  时,棒-板空气间隙的交流放电电压随着雨水电阻率减小而逐渐减小,且下降趋势变强。其可能有以下原因:自来水中加入氯化钠试剂之后,即雨水电导率增加,表明雨水中带电离子浓度的增加,雨水电阻率降低,则 0.4 m 棒-板空气间隙的交流放电电压会降低。而试验范围内雨滴电阻率的变化对雨滴介电常数的影响微小<sup>[11]</sup>,电场强度畸变程度很小,故整个间隙的交流放电电压变化不是很明显,其降雨强度为  $9$  mm/min 时,交流放电电压最大降低了  $5.32\%$ 。

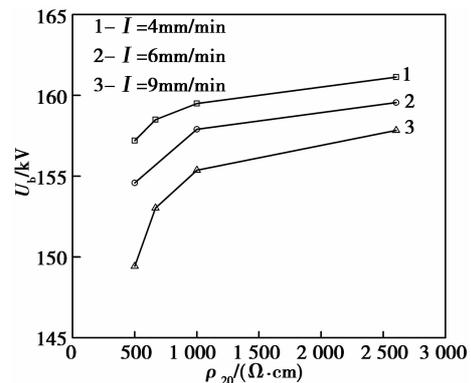


图 5 雨水电阻率对交流放电电压的影响

### 2.2.4 环境温度对空气间隙交流放电的影响

棒-板空气间隙距离  $d=0.4$  m、降雨强度  $I=9$  mm/min、雨水电阻率  $\rho_{20}=2604\Omega \cdot \text{cm}$  下,通过调节制冷系统控制环境温度,其交流放电电压与环

境温度的试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,暴雨情况下随着环境温度的增加,空气间隙交流放电电压逐渐增加。在环境温度  $8\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,交流放电电压最大变化幅度为  $7.03\%$ 。其主要原因是淋雨状态下整个空气间隙中充满了相对半径比较大的雨滴和由于挥发作用产生的大量水分子,即湿度的增加。其中在相同降雨强度条件下,整个空气间隙的雨滴数量基本保持不变,对整个空气间隙的电场畸变程度大致相同,而空气间隙中产生的大量水分子数量与环境温度成正比关系。空气中水分子数量决定空气间隙中绝对湿度的大小。空气间隙绝对湿度的增加只能使碰撞电离系数( $\alpha$ )有很少的增加<sup>[12]</sup>;绝对湿度的增大使得电子碰撞水分子的次数增多,被水分子吸附的概率增大,则电子附着系数随绝对湿度的增加而增大<sup>[13]</sup>。当环境温度升高时,空气间隙中将产生大量的水分子(绝对湿度增加),会吸附放电过程中产生的电子,从而阻碍了空气间隙放电的发展,使得棒-板空气间隙交流放电电压升高。

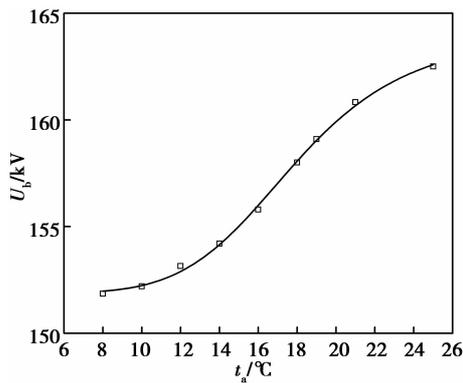


图 6 环境温度对棒-板交流放电电压的影响

### 2.2.5 不同电极结构空气间隙交流淋雨试验对比分析

1) 降雨强度对不同电极结构交流放电电压的影响。

棒-棒空气间隙距离  $d=0.4, 0.6, 0.7\text{ m}$ , 雨水电阻率  $\rho_{20}=2\ 604\ \Omega\cdot\text{cm}$ , 降雨强度  $I=2, 4, 9, 14\text{ mm/min}$  环境下的交流放电电压试验数据及最大变化幅度  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{\Delta U_b}{U_{b2}} \times 100\%, \Delta U_b = U_{b2} - U_{b14} \quad (3)$$

$U_{b2}$  为降雨强度  $I=2\text{ mm/min}$  时的交流放电电压,  $U_{b14}$  为降雨强度  $I=14\text{ mm/min}$  时的交流放电电压, 其试验结果如表 2 所示。

表 2 不同降雨强度下棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压

$d/\text{m}$	电极结构	$U_b/\text{kV}$		$k_1/\%$
		$I=2\text{ mm/min}$	$I=14\text{ mm/min}$	
0.4	棒-板	163.28	152.92	-6.73
	棒-棒	170.55	166.01	-2.66
0.6	棒-板	221.09	206.63	-6.54
	棒-棒	242.61	234.81	-3.22
0.7	棒-板	257.33	241.83	-6.02
	棒-棒	274.81	266.37	-3.07

由表 2 可知,不同电极结构下,其最大变化幅度不同,其中棒-板空气间隙交流放电电压的最大变化幅度比棒-棒空气间隙交流放电电压的最大变化幅度要高。其主要原因是淋雨环境下,棒-板空气间隙是不均匀电场,雨滴的存在更容易诱导空气间隙的放电,由此可以说明淋雨环境下雨滴对不均匀电场(棒-板电极结构)影响大,对均匀电场(棒-棒电极结构)影响小。

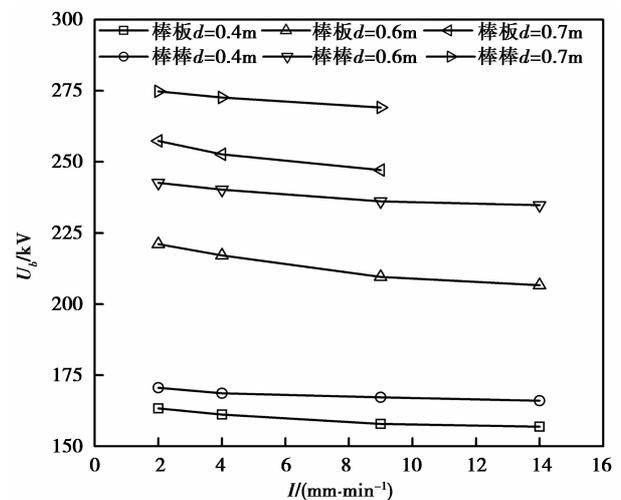


图 7 降雨强度对不同电极结构交流放电电压的影响

表 2 中的数据绘制如图 7 所示。由图 7 可知,随着降雨强度的增加,棒-板(棒-棒)电极结构的空气间隙交流放电电压逐渐降低;棒-板空气间隙的交流放电电压随着降雨强度的增加变化比较明显,而棒-棒空气间隙的交流放电电压变化不是很明显,随着降雨强度的增加,棒-棒空气间隙交流放电电压与棒-板空气间隙交流放电电压的差值会逐渐增大。有研究表明,在极不均匀电场的放电轴上放置半径  $1\text{ mm}$  的水滴时,由于水滴的存在极大地畸变了电场,使得水滴表面的最大场强增大为原来的

4.21倍<sup>[14]</sup>;在球-球均匀电场中,水滴表面的电场强度跃变为无水滴时的3倍左右<sup>[15]</sup>,雨滴对不均匀电场的畸变程度大于均匀电场,使得棒-板(不均匀电场)空气间隙的交流放电电压降低得快,棒-棒(均匀电场)空气间隙的交流放电电压降低得慢。

2)雨水电阻率对不同电极结构型式放电电压的影响。

棒-棒空气间隙距离  $d=0.4\text{ m}$ ,雨水电阻率  $\rho_{20}$  为  $2\ 604, 1\ 000, 666.67, 500\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,降雨强度  $I=4, 9\ \text{mm/min}$  环境下的交流放电电压及最大变化幅度  $k_p$ :

$$k_p = \frac{\Delta U_{bp}}{U_{bp2604}} \times 100\%, \Delta U_{bp} = U_{bp2604} - U_{bp500} \quad (4)$$

$U_{bp2604}$  为雨水电阻率  $\rho_{20} = 2\ 604\ \Omega \cdot \text{cm}$  的交流放电电压,  $U_{bp500}$  为雨水电阻率  $\rho_{20} = 500\ \Omega \cdot \text{cm}$  的交流放电电压,其试验结果如表 3 所示。

表 3 不同雨水电阻率下棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压

$d/\text{m}$	$I$ $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	电极 结构	$U_b/\text{kV}$		$k_p/\%$
			$\rho_{20} =$	$\rho_{20} =$	
			$2\ 604\ \Omega \cdot \text{cm}$	$500\ \Omega \cdot \text{cm}$	
0.4	4	棒-板	161.13	157.21	-2.43
		棒-棒	168.21	165.47	-1.63
0.4	9	棒-板	156.83	149.43	-4.72
		棒-棒	167.23	164.55	-1.60
0.6	9	棒-板	209.53	194.83	-7.02
		棒-棒	236.13	230.33	-2.46
0.7	9	棒-板	246.11	235.03	-4.50
		棒-棒	269.10	260.13	-3.33

由表 3 可知,不同电极结构下,其最大变化幅度不同,其中棒-板空气间隙交流放电电压的最大变化幅度比棒-棒空气间隙交流放电电压的最大变化幅度要高,由此可以说明雨水电阻率对不均匀电场影响大,对均匀电场影响小。其主要原因是电阻率对雨水介电常数的影响本身不是很大,相同介电常数的雨滴在均匀电场中比不均匀电场畸变作用小。

由表 3 中的试验数据绘制如图 8 所示。由图 8 可知,两种不同电极结构的空气间隙放电电压都是随着雨水电阻率的减小而逐渐降低,其主要原因是雨滴介电常数的增加电场逐渐非线性加强<sup>[16]</sup>,有利

于空气间隙的放电;在暴雨情况下,即降雨强度  $I=4\ \text{mm/min}$  时,棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压变化趋势比较平缓;在大暴雨情况下,即降雨强度  $I=9\ \text{mm/min}$  时,棒-板空气间隙的交流放电电压在电阻率比较低(电导率比较高)时下降趋势变得很明显,而棒-棒空气间隙在大暴雨、重污染地区的交流放电电压变化趋势不是很明显。

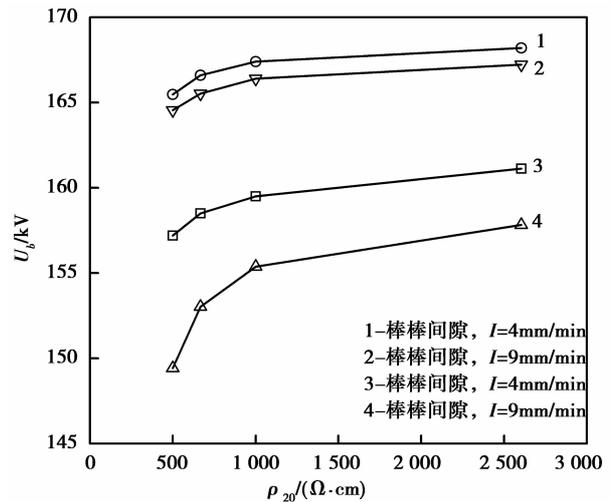


图 8 雨水电阻率对不同电极结构放电电压的影响

由表 2 和表 3 中的试验数据可以得出:无论是棒-板(不均匀电场)空气间隙与棒-棒(均匀电场)空气间隙的交流放电电压最大变化幅度主要受降雨强度的影响,雨水电阻率对棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压影响比较小。

### 3 结 论

1)随着降雨强度的增加,棒-板(棒-棒)电极结构形式的交流放电电压都将降低,且交流放电电压变化趋势变得平缓;降雨强度对棒-板结构(不均匀电场)交流放电电压影响大,对棒-棒结构(均匀电场)影响小。

2)随着环境温度( $8\sim 25\ ^\circ\text{C}$ )逐渐升高,棒-板空气间隙的交流放电电压逐渐提高,其最大变化幅度为  $7.03\%$ 。

3)棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压主要受降雨强度的影响,雨水电阻率对棒-板(棒-棒)空气间隙的交流放电电压影响比较小。

4)暴雨(特大暴雨)情况下,降雨强度和雨水电阻率会促使空气间隙的放电,环境温度会阻碍空气间隙的放电。

## 参考文献:

- [1] 肖东坡. 500kV 输电线路风偏故障分析及对策[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 99-102.  
XIAO DONG-PO. Windage yaw fault analysis and countermeasures for 500 kV transmission lines [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 99-102.
- [2] 胡毅. 500kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 9-10.  
HU YI. Study on trip caused by windage yaw of 500kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 9-10.
- [3] 张禹芳. 我国 500kV 输电线路风偏放电分析[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 65-67.  
ZHANG YU-FANG. Analysis on flashover between tower and conducting wires in domestic 500kV transmission lines caused by windage yaw[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 65-67.
- [4] 朱晓平. 500kV 输电线路风偏的探讨[J]. 中国新技术新产品, 2010(13): 139-140.  
ZHU XIAO-PING. Discussion on flashover between tower and conducting wires in domestic 500kV transmission lines caused by windage yaw[J]. China New Technologies and Products, 2010(13): 139-140.
- [5] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.  
HU YI. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 1-8.
- [6] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 风雨对导线-杆塔空气间隙交流放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 845-850.  
HU YI, WANG LI-NONG, SHAO GUI-WEI, et al. Influence of rain and wind on power frequency discharge characteristic of conductor-to-tower air gap[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 845-850.
- [7] 中国电器工业协会. GB/T16927.1—1997. 高电压试验技术—第一部分: 一般试验要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [8] 孙才新, 蒋兴良, 司马文霞, 等. 海拔 4 000 m 以上短空气间隙交流放电特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 116-120.  
SUN CAI-XIN, JIANG XING-LIANG, SIMA WEN-XIA, et al. AC discharge performance and voltage correction of short air gaps in 4000m and above altitude districts[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 116-120.
- [9] 瑞语. 计量雨滴[J]. 中国计量, 2009(7): 52-52.  
RUI YU. Measure of rain. China Metrology, 2009(7): 52-52.
- [10] 杨长河. 气水混合两相体放电现象及机制的理论及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [11] 耿翠英, 陈守聚, 刘莘煜, 等. 降雨对空气间隙交流闪络电压影响的试验研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 36-39.  
GENG CUI-YING, CHEN SHOU-JU, LIU XIN-YU, et al. Experimental study of the raining effect on frequency breakdown voltage of air-gap [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 36-39.
- [12] GALLAGHER J W, BEATY E C, DUTTON J, et al. An annotated compilation and appraisal of electron swarm data in electronegative gases [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1983, 12(1): 109-152.
- [13] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] 叶齐政. 混合两相体放电及其在水处理中应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [15] 齐军, 叶齐政, 顾温国, 等. 运动水滴在球-球直流电场中的放电研究[J]. 高压电器, 2000, 36(2): 12-14.  
QI JUN, YE QI-ZHENG, GU WEN-GUO, et al. Study of discharge phenomena of moving water drip in a sphere-sphere DC gap [J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(2): 12-14.
- [16] 叶齐政, 万辉, 李劲. 气中液滴群在均匀场中的局部电场分析[J]. 高压电器, 2001, 37(6): 14-16.  
YE QI-ZHENG, WAN HUI, LI JIN. The local electric field influenced by the liquid-drops in gas [J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(6): 14-16.

(编辑 王维朗)