

降雨对空气间隙工频闪络电压影响的试验研究

耿翠英, 陈守聚, 刘莘昱, 吕中宾, 杨晓辉, 朱 华

(河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 研究雨天气候下导线-塔杆气隙击穿特性对于提高高压输电线路运行可靠性、预防击穿事故具有重要的意义。笔者通过人工模拟试验,研究了实际气隙和塔杆结构条件下,不同降雨强度、雨水电阻率、雨水运动路径等因素对气隙工频击穿特性的影响,得出不同雨强、雨水电阻率和雨水运动路径下导线-杆塔空气间隙工频击穿特性的变化规律。有关结论可为现场防风偏放电和输电线路设计提供依据。

关键词: 气隙; 击穿; 工频; 人工模拟

中图分类号: TM8

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0036-04

Experimental Study of the Raining Effect on Frequency Breakdown Voltage of Air-gap

GENG Cui-ying, CHEN Shou-ju, LIU Shen-yu, LU Zhong-bin, YANG Xiao-hui, ZHU Hua

(Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: It is important to study the air-gap breakdown characteristics between conductor and tower in rainy weather for improving the reliability of high voltage power grid. In this paper, the breakdown characteristics were studied through artificial simulation test, and the relationships among breakdown voltage and some factors, such as rain intensity, rainwater resistivity, and drop direction were investigated, and the corresponding results were obtained. This study would be helpful for design and maintenance of transmission line against rainy weather.

Key words: air-gap; breakdown; power frequency; artificial simulation

0 引言

输电线路在大雨情况下造成的绝缘击穿是影响线路安全运行的主要问题之一,严重影响电力系统供电可靠性。2004年以来,仅河南省500 kV输电线路已发生由于恶劣天气引起的放电多达15条次,其中大部分是在强降雨情况下引起的,严重影响系统的安全运行^[1-4]。

笔者在搜集国内各地气象资料的基础上,建立了模拟淋雨平台,在试验室中人工模拟出和实际现场相符的降雨气候,在此基础上对实际尺寸结构的导线-杆塔构架气隙的工频击穿特性进行了系统的试验研究。

1 试验方法

试验前,首先将模拟导线与杆塔构架位置调整好,控制二者之间的最短距离为设定值,调节淋雨排

的角度和雨量大小,在淋雨排正常工作1 min之后开始升压。升压按如下步骤进行:先施加约75%的击穿电压(估算值),然后以每秒约2%的速度升压至气隙击穿。击穿电压以5个连续测定的击穿电压值的算术平均值计算,5个电压值的方差不超过3%^[5]。

试验中,模拟雨水的瞬时雨强大小通过改变水泵的个数和喷头数量来调节,并在每组试验开始时均使用DSJ2型虹吸式雨量计进行测量。淋雨排放放在升降车上,距导线5 m,通过调整淋雨排的高度及淋雨排的对地夹角,可自由地调节雨水与放电路径的夹角。

在研究雨水电阻率对导线-杆塔空气间隙工频击穿电压影响试验中,电阻率值较大的雨水通过在纯净水中加自来水来配制,电阻率值较小的雨水通过在自来水中加NaCl来配制,文中给出的雨水电阻率值均已校正为温度为20℃下的值。每组试验中,雨水电阻率值与试验设定值之间基本一致(最大变化幅度小于1.7%)。

收稿日期:2008-06-17; 修回日期:2008-10-21

作者简介:耿翠英(1978-),女,河南虞城人,硕士,工程师,从事过电压及输电技术方面研究。

做试验时,先按一定顺序改变其中一个参量进行试验,为了减小误差,再按相反的顺序调节变量进行试验,结果取两次试验的平均值。

文中所有试验数据均已按 GB/T 16927.1-1997 修正为标准状态下(温度 $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, 压力 $b_0=101.3\text{ kPa}$, 绝对湿度 $h_0=11\text{ g/m}^3$) 的值。

2 试验结果及分析

2.1 塔杆表面水滴对击穿电压的影响

调整导线-杆塔构架的间隙距离至设定值,在未淋雨(空气间隙自然干燥、导线-杆塔构架干燥)时先试验求得该间隙距离的工频击穿电压,然后打开淋雨排,对导线-杆塔构架淋雨 1 min 后,关闭淋雨排,立刻试验求得此时该空气间隙距离下的工频闪络电压。该间隙距离的试验完成后,对导线-杆塔构架通风一小时使模拟杆塔干燥,并使空气间隙恢复自然干燥状态,然后调整导线-杆塔构架的间隙距离至下一个设定值开始试验。

表 1 列出了不同间隙距离下使用不同电阻率的雨水对导线-杆塔空气间隙预淋湿后,工频击穿电压的值及其变化率;图 1 给出了雨水电阻率为 $1800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 时,导线-杆塔空气间隙预与淋湿前后其工频闪络电压的变化趋势。

表 1 全干和淋雨后导线-杆塔空气间隙的闪络电压 kV

间隙距离/m	0.6	0.8	1.0	1.2
未淋雨	252.6	301.5	343.6	399.2
淋雨 1 min 后	223.8	282.6	336.5	385.5
雨水电阻率: $800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$	-11.4%	-6.3%	-2.1%	-3.4%
淋雨 1 min 后	224.2	283.2	336.8	386.3
雨水电阻率: $1800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$	-11.2%	-6.1%	-2.0%	-3.2%
淋雨 1 min 后	224.5	283.7	337.2	386.8
雨水电阻率: $8000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$	-11.1%	-6.0%	-1.9%	-3.1%

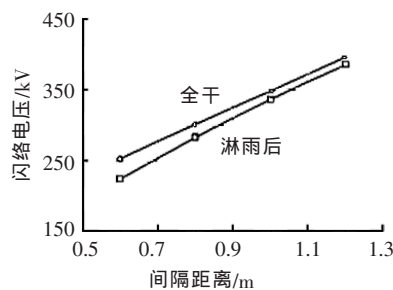


图 1 淋雨前后导线-杆塔空气间隙闪络电压

由表 1 可见,淋雨后导线-杆塔空气间隙的工频击穿电压比淋雨前有不同程度的降低,随着导线-杆塔空气间隙距离的增加其降低幅度逐渐变小,但此时雨水电阻率对击穿电压变化的影响不明显。雨水电阻率为 $1800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 、间隙距离为 0.6 m 时,预淋湿后其工频闪络电压比全干时降低了 11.4%;同样条件下,当间隙距离为 1.2 m 时,其降低

幅度为 3.4%。

以上试验结果表明,当导线-杆塔空气间隙淋雨后,导线和杆塔构架上挂有大量水滴形成了尖端,特别是对于挂在导线上的水滴而言,这些水滴的存在使得导线表面不再光滑,改变了导线表面的电场分布,在水滴表面其电场强度较高,导致了击穿电压的降低。随着导线-杆塔空气间隙距离的增大,水滴对整个空间电场的影响相对减小,其工频击穿电压变化幅度也逐渐变小。

比较同样间隙距离下、不同雨水电阻率下的试验结果可见:试验范围内,水滴本身的导电性(电阻率变化范围: $800\sim 1800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$)对导线-杆塔空气间隙的工频击穿电压影响不大。这是因为在试验电压范围内,导线上挂着的水滴都可被认为是良导体,水滴表面附近的电场强度主要由外加电压、水滴形状、水滴介电常数决定,而试验范围内水滴电阻率的变化对水滴介电常数的影响微小,此时影响导线-杆塔空气间隙工频闪络电压的原因主要是水滴对空间电场的畸变。

2.2 降雨强度的影响

调整导线-杆塔构架的间隙距离至设定值,在未淋雨即全干(空气间隙自然干燥、导线-杆塔构架干燥)时先试验求得该间隙距离的工频闪络电压,然后打开淋雨排,对导线-杆塔构架淋雨 1 min 后,开始调节雨量从小到大分别模拟不同雨型进行试验。为保证试验结果的准确性,在达到试验最大雨量后,再按雨量从大到小顺序重复一次进行试验。当该间隙距离的试验完成后,对导线-杆塔构架通风一小时以使模拟杆塔干燥,并使空气间隙恢复自然干燥状态,然后调整导线-杆塔构架的间隙距离至下一个设定值开始试验。

表 2 与图 2 是雨水电阻率 $800\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 、雨水与放电路径的夹角为 0° (雨水方向与放电路径平行)、杆塔上有模拟脚钉(其方向平行于导线)、无风时的结果。

由表 2 可见,降雨对导线-杆塔空气间隙的工频击穿电压影响比较明显。一旦有降雨发生,其工频闪络电压明显降低,且间隙距离越小,该趋势越明显。当间隙距离为 0.6 m 时,击穿电压最大降低幅度为 16.2%;而间隙距离为 1.2 m 时,降低幅度为 13.3%。

由图 2 可见,随着降雨瞬时雨强的增大,击穿电压有继续降低的趋势,但降低幅度略有下降,随着雨强的进一步增大,空隙的工频闪络电压下降呈现出饱和趋势。

在各种间隙距离下,降雨均使击穿电压降低。原因主要是由于雨水的介电常数比空气的大得多(约为 80:1),放电间隙中雨滴的存在使得雨滴颗粒附近的电场强度增强。对于尖-板极不均匀电场,当放电

表 2 不同雨强下气隙的击穿电压

间隙距离/m	kV						最大变化幅度/%
	干燥	淋雨 1 min	2.4/(mm·min ⁻¹)	4.8/(mm·min ⁻¹)	9.6/(mm·min ⁻¹)	14.4/(mm·min ⁻¹)	
0.6	252.6	223.8	205.9	198.4	191.0	187.6	-16.2
0.8	301.5	282.6	269.5	261.2	254.6	250.5	-11.4
1.0	343.6	336.5	314.8	306.5	298.6	295.1	-12.3
1.2	399.2	385.5	351.4	343.9	337.5	334.2	-13.3

注:表中最大变化幅度指雨强为最大(14.4 mm/min)时的闪络电压比淋雨 1 min 后闪络电压的降低幅度。

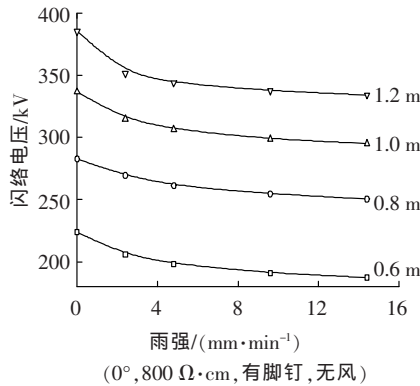


图 2 雨强对导线-杆塔空气间隙闪络电压的影响
注:图中雨强为零处的闪络电压是指相同条件下,淋雨 1 min 后关闭雨水立即测得的。

对称轴上存在有单个直径 1 mm 的水滴时,由于水滴对电场的畸变作用,可使得水滴表面附近空间的场强最大增大为原来的 4.3 倍;特别是在淋雨条件下,由于放电间隙中存在有较多水滴,各个雨滴之间的相互作用将进一步影响空间电场分布和放电过程。

2.3 雨水电阻率的影响

调整导线-杆塔构架的间隙距离至设定值,在未淋雨即全干(空气间隙自然干燥、导线-杆塔构架干燥)时先试验求得工频击穿电压,然后再打开淋雨排,对导线-杆塔构架淋雨 1 min 后,开始调节雨水电阻率从小到大,在最大雨强下进行试验。在达到试验最大雨水电阻率后,再调节雨水电阻率从大到小重复进行试验。该间隙距离的试验完成后,通风一小时使模拟杆塔干燥,并使空气间隙恢复自然干燥状态,然后调整间隙距离至下一个设定值开始试验。

表 3 是雨强 14.4 mm/min、雨水与放电路径夹角 0°、杆塔上有脚钉(脚钉方向平行于导线)、不同雨水电阻率下的击穿电压值。图 3 给出了放电间隙为 0.6 m、雨水与放电路径夹角 0°、杆塔上有脚钉(方向平行于导线)、不同雨水电阻率、不同雨强对导线-杆塔空气间隙闪络电压的变化趋势。

表 3 不同雨水电阻率下气隙的击穿电压 kV

间隙距离/m	雨水电阻率/(Ω·cm)			最大变化幅度/%
	8×10 ³	1 800	800	
0.6	198.1	192.2	187.6	-5.3
0.8	257.6	254.4	250.5	-2.8
1.0	305.1	300.1	295.1	-3.3
1.2	341.6	338.1	334.2	-2.2

注:最大变化幅度为雨水电阻率从 8×10³ Ω·cm 到 800 Ω·cm 时闪络电压降低的幅度。

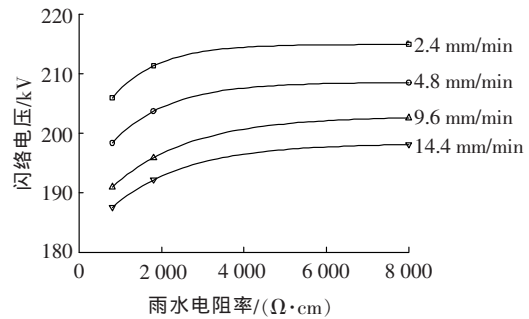


图 3 0.6 m 放电间隙下雨水电阻率对导线-杆塔空气间隙闪络电压的影响(0°,有脚钉,无风)

由表 3 可见,在试验范围内,雨水电阻率对间隙击穿强度有所影响,但其影响相对雨强影响要小得多。随着雨水电阻率的降低,击穿电压有所降低。在最大降雨强度(14.4 mm/min)、间隙距离 0.6 m 时,当电阻率从 8×10³ Ω·cm 变化至 800 Ω·cm 时,闪络电压降低了 5.3%;同样条件下,当放电间隙为 1.2 m 时,闪络电压降低了 2.2%。

由图 3 可见,当雨水电阻率在 2×10³ Ω·cm 以下时,击穿电压随电阻率降低迅速下降,且随着电阻率的进一步降低,闪络电压下降速度有增加的趋势;在雨水电阻率大于 4×10³ Ω·cm 后,随着电阻率的增大,击穿电压的上升呈现出饱和趋势。

2.4 雨水运动路径影响

试验步骤为:调整导线-杆塔构架的间隙距离至设定值,在未淋雨即全干时先试验测得该间隙的工频击穿电压,然后打开淋雨排,通过调节升降机的高度和淋雨排的角度来调节雨水运动轨迹与放电路径的夹角进行试验,同一间隙距离下均做了 0°(平行于放电路径)、45°和 90°(垂直于放电路径)3 个角度的试验。该间隙距离的试验完成后,对导线-杆塔构架通风一小时使模拟杆塔干燥,并使空气间隙恢复自然干燥状态,然后调整导线-杆塔构架的间隙距离至下一个设定值开始试验。

表 4 是雨强 14.4 mm/min、雨水电阻率 1 800 Ω·cm、杆塔上有脚钉、无风不同雨水运动路径下放电间隙的工频击穿电压。图 4 给出了放电间隙为 0.6 m、雨水电阻率 1 800 Ω·cm、杆塔上有脚钉、无风时不同雨水运动路径、不同雨强对空气间隙闪络电压的变化趋势。

由表 4 可见,试验条件内,雨水运动轨迹与放电路径的夹角对工频击穿电压的影响不明显。同样条

表4 不同雨水方向的闪络电压 kV

放电间隙/m	夹角			最大变化幅度/%
	90°	45°	0°	
0.6	195.6	194.4	192.2	-1.8
0.8	258.8	256.5	254.4	-1.7
1.0	304.8	303.2	300.1	-1.5
1.2	341.6	340.0	338.1	-1.0

注:最大变化幅度为雨水与放电路径夹角从90°到0°时闪络电压的降低幅度。

件下,当夹角为0°时,闪络电压最低;当夹角为90°时,电压值最高,但二者区别不大。随着放电间隙距离的增大,雨水运动轨迹对闪络电压的影响有减小的趋势:雨强14.4 mm/min、雨水电阻率 $1800 \Omega \cdot \text{cm}$ 、0.6 m间隙时,夹角为0°时的击穿电压较90°时降低了约1.8%;同样条件下,当距离增大到1.2 m时,击穿电压降低幅度为1%。

2.5 电极结构影响

研究了导线-杆塔构架电极结构(有脚钉和没

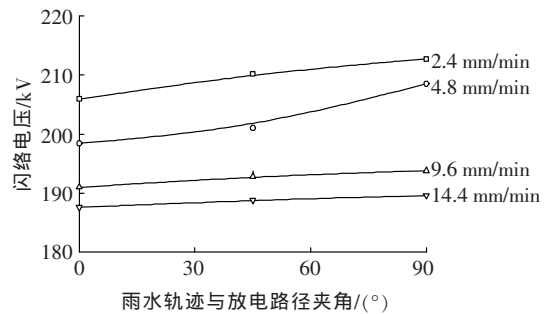


图4 0.6 m间隙下雨水运动方向对导线-杆塔空气间隙闪络电压的影响($1800 \Omega \cdot \text{cm}$,有脚钉,无风)

脚钉两种情况)对空气间隙的工频击穿电压的影响。试验中主要考虑了全干和最大雨强(14.4 mm/min)两种情况下脚钉对击穿电压的影响。表5和图5为雨水电阻率为 $800 \Omega \cdot \text{cm}$ 、雨水运动轨迹与放电路径夹角平行(0°)时,不同间隙距离下的试验结果。

由表5可见,杆塔上存在的脚钉使导线-杆塔

表5 不同距离、电极结构下的击穿电压 kV

间隙距离/m	未淋雨无脚钉/kV	未淋雨有脚钉/kV	变化幅度/%	最大雨强无脚钉/kV	最大雨强有脚钉/kV	变化幅度/%
0.6	262.1	252.6	-3.8	197.3	187.6	-5.2
0.8	311.3	301.5	-3.3	259.8	250.5	-3.7
1.0	354.1	343.6	-3.1	305.9	295.1	-3.6
1.2	410.1	399.2	-2.7	345.2	334.2	-3.3

注:表中变化幅度均为有脚钉时的闪络电压较无脚钉时降低的幅度。

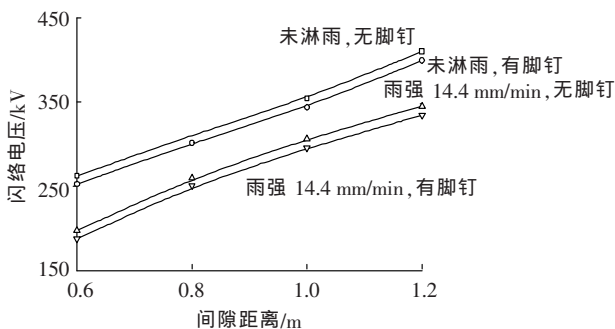


图5 脚钉对导线-杆塔空气间隙闪络电压的影响($800 \Omega \cdot \text{cm}$,无风)

空气间隙的工频击穿电压降低,降雨条件下,脚钉对闪络电压的影响略有增大,但不明显;随着间隙距离的增加,脚钉对闪络电压的影响趋势减小。当间隙距离为0.6 m时,未淋雨状态下,有脚钉时的闪络电压较无脚钉时降低了3.8%;最大雨强(14.4 mm/min)下,有脚钉较无脚钉时的闪络电压降低了5.2%;同样条件下,间隙距离为1.2 m时,未淋雨状态时闪络电压降低了2.7%;最大降雨强度下则降低了3.3%。

造成以上现象的原因主要是杆塔上脚钉的存在改变了导线-杆塔间隙中的电场分布,使场强分布变得更不均匀,使得放电的流注容易向脚钉方向发展。从试验来看,在有脚钉时多数闪络都是沿着脚钉放电,这也充分说明了脚钉存在对间隙闪络的影响。

3 结论

(1)降雨对间隙的工频闪络强度的影响比较明

显。一旦有降雨发生,闪络电压即明显降低,且间隙距离越小,该趋势越明显。间隙距离为1.2 m时,雨水电阻率为 $800 \Omega \cdot \text{cm}$ 的特大暴雨下闪络电压比全干时降低了约16%。

(2)雨水电阻率对间隙工频闪络强度有所影响。随着雨水电阻率增加(电导率降低),闪络电压有所增加,且放电间隙越小,其趋势越明显。间隙距离为1.2 m时,特大暴雨下,电阻率从 $800 \Omega \cdot \text{cm}$ 变为 $8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时闪络电压增加了约2.2%;间隙距离为0.6 m时,特大暴雨下,电阻率从 $800 \Omega \cdot \text{cm}$ 变为 $8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时闪络电压增加了约5.3%。

(3)雨水运动路径与放电路径的夹角对闪络电压影响不明显。

(4)塔身存在脚钉(脚钉方向平行于线路方向)时使闪络电压进一步降低。间隙距离为1.2 m时,有脚钉时的闪络电压比无脚钉时降低了约3%。

参考文献:

- [1] 胡毅. 500 kV输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 高压电技术, 2004, 30(8): 9,10.
- [2] 刘焕明. 500 kV侯临线286号风偏故障分析[J]. 山西电力, 2004(6): 14,15.
- [3] 赵科隆, 庞志宏. 500 kV神侯线风偏放电掉闸分析[J]. 华北电力技术, 1998(4): 23-25.
- [4] 张禹芳. 我国500 kV输电线路风偏闪络分析[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 65-67.
- [5] 谈克雄. 升降法准确度研究[J]. 高压电, 1987, 23(1): 1-3.