

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.01.003

表面水滴对交流导线电晕特性的影响

朱 军^{1,2}, 刘云鹏¹, 朱 雷¹, 耿江海¹, 安 冰², 李 渝²

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网廊坊供电公司, 河北 廊坊 065001)

摘要:雨天条件下,输电线路导线表面形成的水滴会畸变导线周围电场,从而改变导线的电晕特性。笔者基于实验室小电晕笼,利用实验室研发的电晕损失测量系统,测量了不同水滴等级(水膜、一滴水、中等水滴、饱和水滴)下导线的电晕损失,获得了表面水滴对导线电晕起始特性的影响规律。同时,笔者针对自然界中雨水电导率的差异,研究了不同的水滴电导率对电晕放电特性的影响。结果表明:水滴的存在严重影响了导线在交流电压下的电晕损失特性,相同电压作用下,表面附着水滴的导线电晕损失比干净导线电晕损失大得多,且随着水滴等级的提高而增加;在30~680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 电导率范围内,水滴电导率对交流导线电晕放电影响不明显;导线的起晕电压随导线表面水滴等级的提高依次下降,最低可降到原来的34.02%左右。

关键词:表面水滴;电晕笼;电晕损失;起晕电压;电晕放电;电导率

Influence of Surface Water Drop on Corona Characteristics of AC Transmission Lines

ZHU Jun^{1,2}, LIU Yunpeng¹, ZHU Lei¹, GENG Jianghai¹, AN Bing², LI Yu²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. State Grid Langfang Power Supply Company, Hebei Langfang 065001, China)

Abstract: In rainy weather, water drops existing on the surface of a transmission line conductor will distort the electric field around the conductor, thus the corona characteristics of the conductor will be changed. In this study, based on a laboratory corona cage, the self-developed corona loss measurement system was utilized to measure the corona loss of conductor under different water drop level (water film, a drop of water, moderate water drops, and saturated water drops). Thus, the influence law of the surface water drop on corona inception characteristic was obtained. Moreover, the effect of water conductivity on corona discharge characteristics was investigated considering the difference in conductivity of different rain water. The results show that: 1) Water drops on conductor significantly affect the corona loss of the conductor, e.g., under same voltage, the corona loss of a conductor with water drops on its surface is much greater than that of a clean conductor; 2) The conductor's corona inception voltage decreases with the level of water drop on its surface increasing, and the minimum can reach 34.02% of original value; and 3) In the conductivity range of 30~680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, water drop conductivity has little impact on corona discharge of AC conductor.

Key words: surface water drop; corona cage; corona loss; corona inception voltage; corona discharge; conductivity

0 引言

当输电线路导线周围电场强度超过空气击穿场强时,导线周围的空气发生电离,形成电晕放电^[1-4]。在晴好天气下交流输电线路导线一般不会发生电

晕,而在雨、雾天气下导线表面形成的水滴会导致导线表面电场畸变,从而降低导线的电晕起始电压,发生电晕放电^[5-7]。电晕放电受环境条件的影响很大,在降雨条件下影响更为显著^[8-11]。中国幅员辽阔,部分地区气候多变,降雨多、湿度大,极易在导线表面形成水滴或凝露,影响导线的电晕特性,这

收稿日期:2014-08-21; 修回日期:2014-09-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB209401)。

Project Supported by National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB209401)。

就对中国交流输电线路的电晕限制提出了更高的技术要求。因此,深入研究交流电压作用下导线表面雨滴对导线电晕特性的影响十分必要。

目前国内外学者就降雨对导线电晕放电特性的影响开展了相关研究^[12-14]。但研究工作主要集中在降雨过程中,不同雨量大小(小雨、中雨、大雨、暴雨)对导线电晕特性的影响。关于降雨后导线表面形成的水滴对导线电晕特性的影响研究,更多是在直流电压作用下的报道。笔者通过测量交流导线附着水滴时的电晕损失,研究不同形态、数量和电导率的表面水滴对交流导线电晕特性的影响规律。

1 导线在不同水滴等级条件下的模拟试验方法

目前对于导线表面水滴的等级尚无标准参照,为体现不同水滴分布状态下对导线电晕特性的影响,将水滴等级划分为水膜、一滴水、中等水滴、饱和水滴4个等级。采用刻度滴管在导线下表面布置稀疏水滴,使用水滴标称直径为0.5 mm的喷头对整根导线表面喷水,喷头与地面呈45°,导线表面会形成基本均匀的水滴,随着喷水次数的增加,导线表面水滴的数量越来越多,体积也越来越大。对导线进行短时间喷淋,使导线表面布满水滴,但水滴体积不大,形成中等水滴,模拟中小雨或阵雨时导线表面水滴的情形;对导线喷水多次直到有大量水珠从导线表面落下形成饱和水滴,模拟大雨条件下导线表面的情形。此外,使用干净的湿抹布涂抹导线表面使其形成均匀的水膜,模拟导线憎水性极差,在雨雾天气或湿度大时表面形成水膜的情形。

各等级水滴条件下的导线外观见图1。

2 试验方法和测量系统

实验期间,环境温度(13 ± 4)℃,相对湿度(43.4 ± 7)%,气压为一个标准大气压。文中采用直径25.7 mm的光滑钢管作为模拟导线,借助实验室小电晕笼(见图2)开展交流导线的电晕实验研究。电晕笼结构为方形,笼壁截面尺寸为1.8 m×1.8 m,测量段部分长3 m,两侧各有0.5 m长的保护部分,用来防止导线端部效应对电晕测量的影响。利用实验室研发的电晕笼电晕损失测量系统对导线进行了电晕损失的测量。该测量系统的基本思想是:通过混合型光供电电子式电流互感器实现电晕笼中导线电流的准确测量;采用高精度电容分压器实现电压的准确测量;电压信号采用同轴电缆传输,电流信号采用光

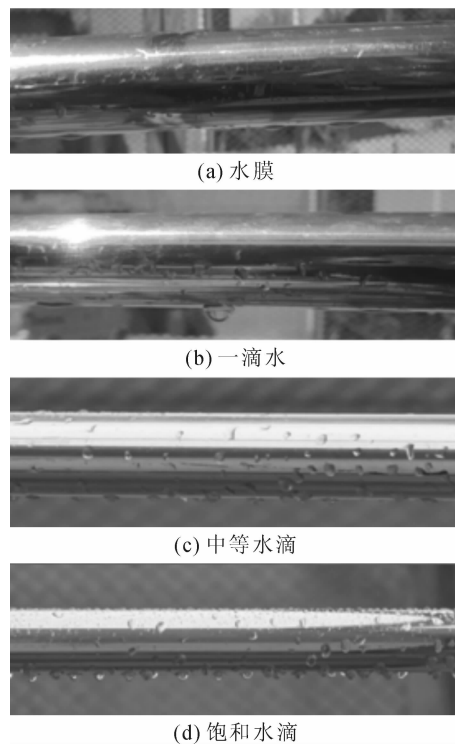


图1 不同雨滴等级下的导线外观

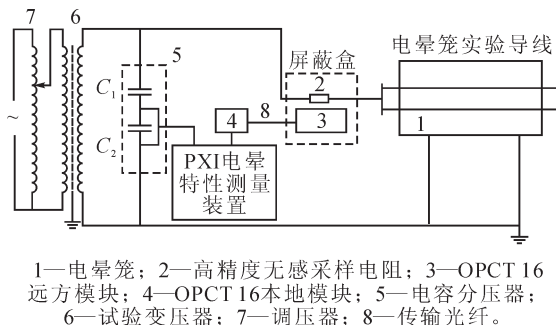
Fig. 1 Appearance of conductor under various water drop level

纤传输,结合现代数字信号处理技术和虚拟仪器技术实现电晕笼中导线电晕损失的测量^[15-17]。试验电源由YDTW-50/250交流试验变压器提供,额定电压为250 kV,额定输出容量为50 kV·A,满足该次试验对交流电源的要求。测量系统接线见图3。



图2 实验室小电晕笼

Fig. 2 Laboratory small cage



1—电晕笼; 2—高精度无感采样电阻; 3—OPCT 16 远方模块; 4—OPCT 16本地模块; 5—电容分压器; 6—试验变压器; 7—调压器; 8—传输光纤。

图3 测量系统图

Fig. 3 Test system configuration

3 试验结果与分析

3.1 不同水滴等级电晕损失测量结果

经调研发现中国雨水电导率从几十到几百($\mu\text{S}/\text{cm}$)变化^[18-19]。为得出雨水电导率对电晕放电的影响,实验中配置了 30、300、680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 3 种电导率用水,研究水膜、中等水滴、饱和水滴 3 种水滴等级下导线的电晕损失特性。

不同电导率表面雨滴的电晕损失与电压之间的关系见图 4-7。由图 4-7 可看出,当水滴具有不同电导率时,电晕损失特性差别很小,3 种水滴等级都得出同样的结论。故可认为在雨水范围内,电导率对交流导线电晕放电无明显影响。

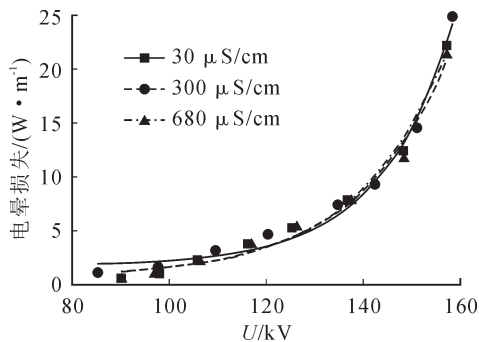


图 4 不同电导率水膜电晕损失测量结果

Fig. 4 Corona loss curves of water film under various conductivity

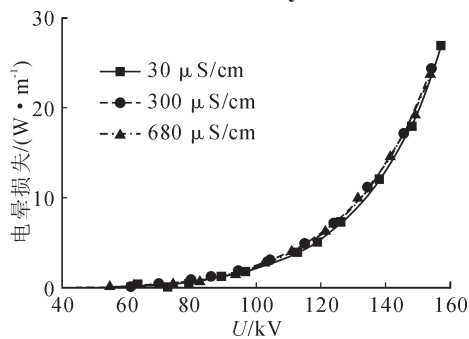


图 5 不同电导率一滴水电晕损失测量结果

Fig. 5 Corona loss curves of a drop of water under various conductivity

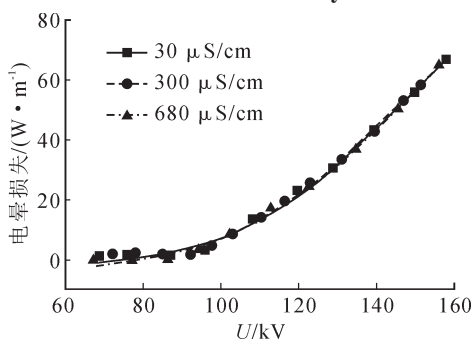


图 6 不同电导率中等水滴电晕损失曲线

Fig. 6 Corona loss curves of moderate water drops under various conductivity

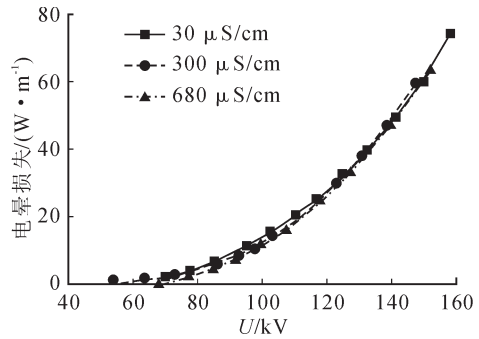


图 7 不同电导率饱和水滴电晕损失曲线

Fig. 7 Corona loss curves of saturated water drops under various conductivity

3.2 不同水滴等级电晕起始特性分析

导线表面雨滴在重力和电场力作用下,表面形态会经历一个由半球形到长椭球形,再到圆锥形的过程。随着所施电压的增加,尖端变得越来越尖,当圆锥尖端的张力和粘滞力不足以克服电场力和重力时,会有细小的水滴从尖端喷出。导线表面布满水滴时,导线表面电场畸变更加严重,水滴周围气体的电离和“水滴的不稳定性”引起局部电晕放电。由于上一小节中说明了电导率对有水滴导线电晕损失影响较小,因此仅用一种电导率水滴说明不同水滴状态下起晕电压的变化。

电晕笼中导线起晕电压的确定方法有很多种^[20-22],笔者采用切线法获得。具体方法为利用电晕笼电晕损失测量系统得到电晕损失—电压曲线的基础上,做起晕后部分的切线,则该切线和 U 轴交点即起晕电压。通过切线法,得到的不同水滴等级对导线起晕电压的影响,见表 1。试验发现,不同水滴等级下的导线起晕电压与干净导线相比均呈下降趋势,从水膜等级到饱和水滴等级导线起晕电压依次下降了 2.95%~34.02%。

表 1 水滴对导线起晕电压的影响

Table 1 Effect of water drop on AC conductor corona onset voltage

水滴等级	实验测得数据	
	起晕电压/kV	较光滑导线起晕电压下降值/%
光滑	143.16	1.00
水膜	138.93	2.95
一滴水	125.15	12.58
中等水滴	97.64	31.80
饱和水滴	94.46	34.02

4 结论

1) 水滴的存在严重影响了导线在交流电压下的电晕损失特性,相同电压作用下,表面存在水滴的

导线电晕损失比干净导线电晕损失大得多,且随着水滴等级的提高而增加。在30~680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 电导率范围内,水滴电导率对电晕放电无明显影响。

2)水滴及其周围电场畸变严重,使导线的起晕电压明显降低,最低可下降到原来的34.02%。

参考文献:

- [1] 黄道春,阮江军,文武,等. 特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术,2007,31(1):6-11.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 6-11.
- [2] 黄道春,魏远航,钟连宏,等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术,2007,31(8):6-12.
HUANG Daochun, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-12.
- [3] ABDEL-SALAM M, ABDEL-SATTAR S. Calculation of corona V-I characteristics of monopolar bundles using the charge simulation method[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 669-679.
- [4] 毛文奇,刘海燕,徐华,等. 特高压输电对环境影响的讨论[J]. 电力建设,2004,25(8):54-56.
MAO Wenqi, LIU Haiyan, XU Hua, et al. Discussion about impact of EHV transmission on environment[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(8): 54-56.
- [5] ANDERSON J G. 345 kV 及以上超高压输电线路设计参考手册[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981: 324-336.
ANDERSON J G. Transmission line reference book 345 kV and above[M]. Beijing: Power Industry Press, 1981: 324-336.
- [6] NAKANO Y, SUNAGA Y. Availability of corona cage for predicting Radio interference generated from HVDC transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1436-1442.
- [7] 沈琪,汲胜昌,祝令瑜. 交流滤波电容器装置电晕的噪声评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(1): 57-62.
SHEN Qi, JI Shengchang, ZHU Lingyu. The assessment of corona noise on the AC filtering capacitor installation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 57-62.
- [8] 刘云鹏,尤少华,万启发,等. 特高压交流单回试验线段雨天电晕损失研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 114-119.
LIU Yunpeng, YOU Shaohua, WAN Qifa, et al. Research on UHV AC single circuit test line corona losses under rain[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 114-119.
- [9] 赵宇明,麻敏华,关志成,等. 导线污秽对高压直流输电线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 49-54.
ZHAO Yuming, MA Minhua, GUAN Zhicheng, et al. Influence of contaminations of the conductor on HVDC transmission line corona characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 49-54.
- [10] 刘正响,陆宠惠. 海拔高度对导线起晕电压影响的研究[J]. 高电压技术, 1988, 14(3): 38-41.
LIU Zhengxiang, LU Chonghui. The influence of altitude on corona-starting voltages[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(3): 38-41.
- [11] 刘云鹏,李玥翰,刘海峰,等. 风沙条件下导线电晕特性的模拟试验系统设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2417-2423.
LIU Yunpeng, LI Yuehan, LIU Haifeng, et al. Design of simulation test system for corona characteristics of conductor under sandstorm condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2417-2423.
- [12] 律方成,尤少华,刘云鹏,等. 雨雪天气下特高压交流单回试验线段电晕损失实测分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2089-2095.
LYU Fangcheng, YOU Shaohua, LIU Yunpeng, et al. Analysis on corona loss measurement of ultra high voltage AC single circuit test line in rain and snow weather conditions[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2089-2095.
- [13] 王清亮,张璐,李舟,等. 直流负极性下雨滴对导线电晕特性的影响[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 9-13.
WANG Qingliang, ZHANG Lu, LI Zhou, et al. Influence of corona characteristics of water drops on smooth conductor under negative DC voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 9-13.
- [14] 陈澜,陈方东,赵雪松,等. 大雨环境下雨滴对线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2863-2868.
CHEN Lan, CHEN Fangdong, ZHAO Xuesong, et al. Influence of rain drops on corona discharge in AC transmission lines under high rainy condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2863-2868.
- [15] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
YANG Leping, LI Haitao, YANG Lei. Program design and application of LabVIEW[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [16] 刘云鹏,尤少华,万启发,等. 特高压试验线段电晕损失监测系统设计与实现[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1797-1801.
LIU Yunpeng, YOU Shaohua, WAN Qifa, et al. Design and realization of AC UHV corona loss monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1797-1801.
- [17] 尤少华,刘云鹏,万启发,等. 特高压电晕笼的多分裂导线电晕损失测量系统[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 244-249.
YOU Shaohua, LIU Yunpeng, WAN Qifa, et al. Corona losses measurement system of bundle conductor using

- UHV corona cage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 244-249.
- [18] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 4-10.
- WANG Wenxing, DING Guo'an. The geographical distribution of ion concentration in precipitation over China[J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(2): 4-10.
- [19] 杨复沫, 贺克斌, 雷 宇, 等. 2001-2003 年间北京大气降水的化学特征[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 538-541.
- YANG Fumo, HE Kebin, LEI Yu, et al. Chemical characters of atmospheric precipitation in Beijing in years of 2001-2003[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 538-541.
- [20] 谢书勇, 刘 成, 李 政. 超高压输电导线起始电晕电压测量方法的探讨[J]. 高压电器, 1989, 25(6): 39-41.
- XIE Shuyong, LIU Cheng, LI Zheng. The method for measuring initial corona of super high voltage transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(6): 39-41.
- [21] 刘云鹏, 朱 雷, 律方成, 等. 特高压电晕笼直流分裂导线正极性电晕起始特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 73-79.
- LIU Yunpeng, ZHU Lei, LYU Fangcheng, et al. Analysis of the positive corona onset characteristic of the bundle conductors in the UHV corona cage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 73-79.
- [22] 任雷剑. 输电线路导线电晕特性及起晕电压的海拔校正研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- REN Leijian. The corona characteristics of transmission line and the correction of corona onset voltage elevation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- 朱 军(1986—), 男, 工程师, 主要从事电力设备高压试验和带电检测工作。
- 刘云鹏(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特高压输电技术、电气设备在线监测与故障诊断方面的研究。

(上接第 12 页)

- technique in Qinghai-Tibet railway transmission line and substation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [16] 程红丽, 刘 健, 王 森, 等. 基于禁忌搜索的接地网故障诊断[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 139-142.
- CHENG Hongli, LIU Jian, WANG Sen, et al. Fault diagnosis for grounding grids based on Tabu search[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 139-142.
- [17] 刘 健, 王建新, 王 森. 一种改进的接地网故障诊断算法及测试方案评价[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 71-77.
- LIU Jian, WANG Jianxin, WANG Sen. An Improved algorithm of corrosion diagnosis for grounding grids & its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 71-77.
- [18] 张爱莉, 王绍君, 刘 菁. 最小二乘法的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(5): 55-57.
- ZHANG Aili, WANG Shaojun, LIU Qing. Application of least square method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(5): 55-57.
- [19] 吴 宁. 电网络分析与综合[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- WU Ning. Analysis and synthesis of electric network[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [20] 刘渝根, 孟 宪, 田金虎, 等. 接地网故障诊断中测量节点对选取方法分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 73-77.
- LIU Yugen, MENG Xian, TIAN Jinhu, et al. Analysis on the method of selecting nodes on the erosion diagnosis of grounding grid[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2010, 33(1): 73-77.
- 刘渝根(1963—), 男, 硕士, 教授, 长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作。
- 谢丽娜(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事接地技术与电力系统过电压研究。