

空气湿度对导线电晕起始电压的影响

王清亮¹,张璐¹,李舟¹,范建斌²,殷禹²,谷琛²,张乔根¹

(1.西安交通大学电气工程学院,西安市,710049;2.中国电力科学研究院,北京市,100192)

[摘要] 我国特高压工程中,输电线路要经过山地、湖泊等高湿度地区,空气湿度对架空输电线路电晕放电有较大影响。为研究湿度对导线电晕放电的影响,利用同轴线-筒电极研究了不同大气湿度对交流以及直流正负极性电晕起始电压的影响规律。试验结果表明:湿度对直流正极性电晕起始电压影响较小,而对直流负极性以及交流电压电晕起始电压影响较大;在相对湿度达50%~60%时,直流负极性与交流起晕电压最高。分析认为,空气湿度对空间电荷分布的影响以及湿度对导线表面状态的影响是导致起晕电压变化的主要因素。

[关键词] 空气湿度;电晕;起晕电压

中图分类号: TM 85 文献标志码: A 文章编号: 1000-7229 (2009) 08-0038-04

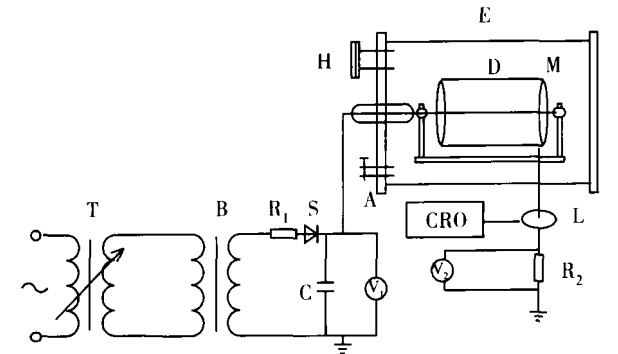
0 引言

目前,特高压输电线路的电磁环境问题开始受到人们的关注^[1-4]。输电线路电磁环境问题与导线电晕密切相关,导线电晕已成为影响特高压输电线路结构和建设费用的重要因素。特高压线路的起晕电压、无线电干扰和可听噪声成为研究的热点^[5-6]。特高压电网因输送距离长,不可避免地要经过高湿度地区,湿度也是影响特高压线路电晕的一个重要因素。虽然国内外对电晕放电特性研究较多^[7-11],但关于湿度对电晕的影响,目前的研究并不多。特高压输电线路的分裂导线等效半径大,起晕电压高^[12],并且大尺寸导线起晕所需空间太大,不易调节湿度达到同一稳定值,试验难以进行。在试验室中,利用小尺寸导线研究不同湿度对电晕放电起始电压的影响规律以及影响机理,对不同湿度下特高压线路电晕特性研究有参考价值。本文在小型人工气候模拟装置中,利用同轴圆柱线-筒电极研究了湿度对直流和交流电晕放电的影响,并同时采用电晕平均电流法和电晕脉冲电流法2种方法对电晕现象进行了研究。

1 试验电路及试验方法

试验在小型人工气候模拟装置中进行,人工气候模拟装置采用有机玻璃筒密闭容器,直径50 cm、长80 cm。线-筒电极为同轴结构。高压线电极采用

直径0.9 mm的光滑铜导线。接地筒电极由铝网制成,直径12.5 cm,圆筒电极边沿设有均压环,以防止边沿电场畸变对电晕特性产生影响。采用超声加湿装置产生细雾状湿气,经湿气通道注入有机玻璃容器,调节注入湿气量以控制湿度。湿气通入后静置4 h以上,使空间湿度达到均衡。通过置于装置内的电子湿度计测量湿度。试验电路图如图1所示。



T—调压器;B—试验变压器;R₁—水电阻;R₂—测量电阻;C—电容器;S—硅堆;V₁—静电电压表;V₂—毫伏表;E—小型人工气候模拟装置;H—湿度调节通道;A—气压调节通道;D—线筒电极;L—罗哥夫斯基线圈;M—均压环。

图1 电晕试验电路

试验时,试验室内的温度维持在 $16 \pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,温度影响可以忽略。待湿度恒定后,升高电压直至线电极发现电晕现象。试验利用 $10\text{ k}\Omega$ 无感电阻加毫伏表测量电晕电流。利用宽频带罗哥夫斯基线圈测量电晕脉冲信号^[12],其测量频率为 $0.396\sim 120\text{ MHz}$,可以很好地满足测量要求。

基金资助项目: 国家电网公司科技项目(SGSC[2005]81)
收稿日期: 2009-05-26
作者简介: 王清亮(1984—),男,硕士研究生,从事放电理论、电气设备外绝缘方面的研究。

2 起晕电压的确定方法

2.1 电晕脉冲法

在直流电压作用下,无论正负极性,发生电晕后,电晕脉冲起始幅值均在 2 mA 以上,脉冲形状稳定且明显区别于背景噪声。本文定义电晕脉冲起始电压为起晕电压。交流电压作用下,随电压升高,在负半周先出现电晕脉冲,形状与直流负极性脉冲相同;正半周出现电晕脉冲所需电压稍高,脉冲形状与直流正极性脉冲相同。本试验取较低值,定义交流负脉冲起始电压有效值为交流起晕电压值。图 2 为直流电压作用下正、负极性电晕脉冲。图 2 横坐标为每格 100 ns,纵坐标每格 5 mV。

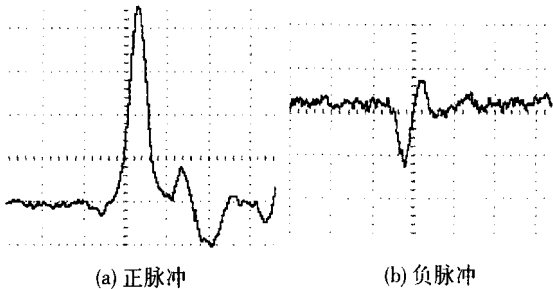


图 2 电晕特性脉冲

2.2 电晕平均电流法

在直流电压作用下,无论正负极性,当电压较低时,电极间主要为由外电离因素形成的极少的空间电荷,回路间电流很小,几乎为 0。当电压达到起晕电压时,电晕电流突然增大,然后随电压升高而快速上升。本文取电晕电流开始增加时电流的拟合直线与电压轴的交点电压值为电晕起始电压。图 3 为直流正极性下起晕电压的确定。

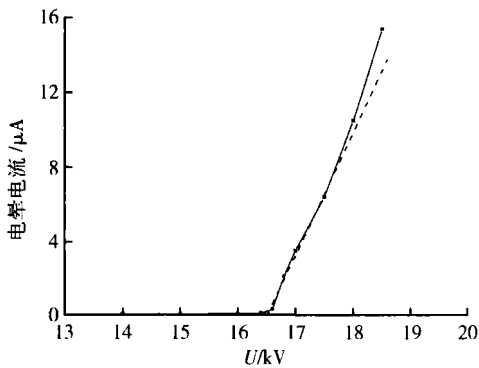


图 3 直流正极性起晕电压的确定

交流电压作用时,因线-筒电极相当于一个电容,回路中存在一个随电压线性增加的电流。当电压达起晕电压后,电晕电流开始出现,回路电流开始快速增加,如图 4 所示。在图中利用起晕前的线性电容电流作一条电流的拟合直线 A,再利用回路电流与直线 A 的分叉点后 2 kV 内的所有点作拟合

直线 B,取 A 和 B 交点的电压值作为起晕电压。

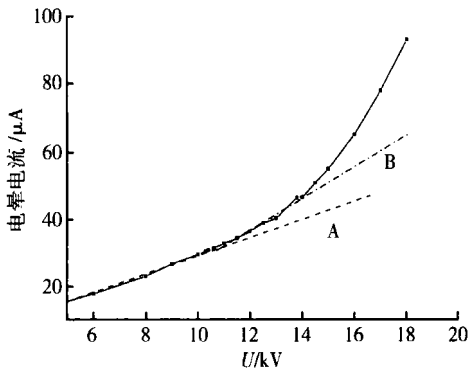


图 4 交流起晕电压的确定

3 导线起晕电压随湿度的变化

在直流正极性电压作用下,随湿度的增加,导线起晕电压略有升高,但升高的幅度不大。电晕平均电流法测得不同湿度下起晕电压如图 5 实线所示,从图中可以看出,随湿度增加,起晕电压值总体呈上升趋势,上升幅度不大。相对湿度从 20%增加到 87%,起晕电压从 16.5 kV 上升到 16.7 kV,上升 1.2%。电晕脉冲法测得不同湿度下起晕电压如图 5 虚线所示,从图中可以看出,起晕电压随湿度增加也呈上升趋势,相对湿度从 20%增加到 87%,起晕电压仅上升 0.6%。从图 5 还可以看出,电晕平均电流法测得的起晕电压值较电晕脉冲法稍高。分析认为:导线恰好起晕时,电晕程度较小,产生的空间电荷量偏少,而迁移区电阻很大,故在测量回路没有引起明显的变化;只有当所加电压较高,空间电荷增加后,测量回路才出现了明显的电晕电流,故电晕平均电流法测量值稍高。

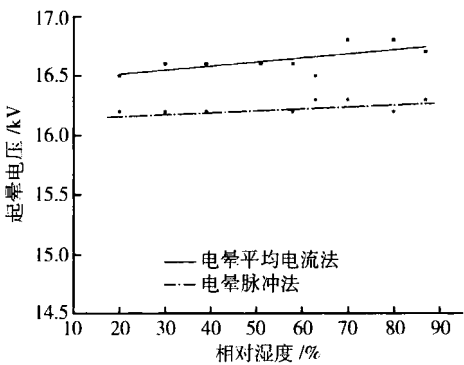


图 5 直流正极性下不同湿度起晕电压

直流负极性电压作用下,当空气湿度低于 50% 时,起晕电压随湿度的增加而增加;当空气湿度大于 50% 后,起晕电压又随湿度的增加而降低。电晕平均电流法测得不同湿度下起晕电压如图 6 实线所示,当相对空气湿度从 20%增加到 50% 时,起晕电压从 14.8 kV 增加到 15.2 kV,增加幅度为 2.7%;当相对

湿度从50%增加到87%时,起晕电压下降到14.2 kV,下降幅度为6.6%。电晕脉冲法测得不同湿度下起晕电压如图6虚线所示,当相对空气湿度从20%增加到50%时,起晕电压从13.8 kV增加到14.6 kV,增加幅度为5.7%;当相对湿度从50%增加到87%时,起晕电压下到13.5 kV,下降幅度为7.5%。

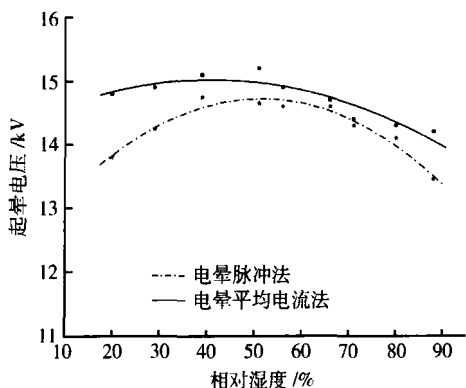


图6 直流负极性下不同湿度起晕电压

交流电压作用下,起晕电压随湿度的变化趋势与直流负极性相似。电晕平均电流法测得不同湿度下起晕电压如图7实线所示,当相对空气湿度从29%增加到57%时,起晕电压从10.8 kV增加到11.8 kV,增加幅度为9%;当相对湿度从57%增加到87%时,起晕电压下降到11 kV,下降幅度为6.8%。电晕脉冲法测得不同湿度下起晕电压如图7虚线所示,当相对空气湿度从29%增加到57%时,起晕电压从10.4 kV增加到11.2 kV,增加幅度为7.7%;当相对湿度从57%增加到87%时,起晕电压下到10.7 kV,下降幅度为4.5%。

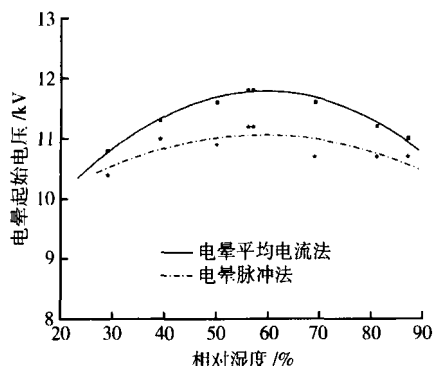


图7 交流电压下不同湿度起晕电压

4 试验结果分析

直流正极性电压作用下,近导线区为强场区,在导线发生电晕放电前,已经发生了较为强烈的非自持放电。对于近导线空间发生的1个电子雪崩,当其头部达到导线时,电子雪崩发展到最大。此时,电子雪崩内部电场被削弱,在其内部发生较强的复合作

用,发出光子,这些光子在空间广大的区域内引起光电离。而这些光电离最终能否形成二次电子崩,是自持放电发生与否的关键。如图8所示,随空气湿度的增加,水分子在一定程度上吸收光电离形成的电子,限制二次电子崩的形成,从而增加了起晕电压。但在正极性导线附近,电子向强场区运动,速度很快,不易被水分子捕获。因此,水分的吸附作用很弱。只在电离区边界上,电场较弱、电子运动速度缓慢的区域吸附作用才变得明显,但电离边界上电子数目很少,所以空气湿度对正极性电晕的抑制作用是微弱的。

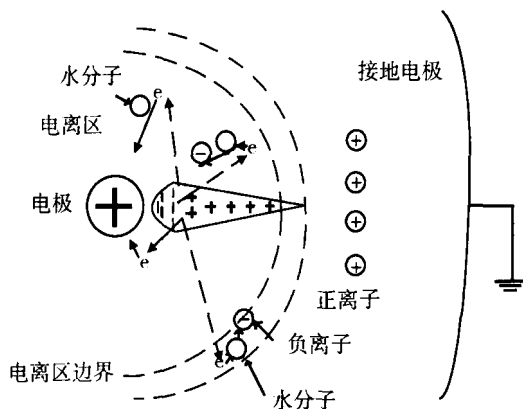


图8 湿度对正极性电晕空间电荷分布的影响

直流负极性下,当导线发生电晕以前,近导线区域同样发生了较为强烈的空间电离,产生大量电子和正离子,其中电子是引起空间碰撞电离的主要因素。在近导线空间,恰好起晕时,电子产生和消失之间存在动态平衡,即

$$\alpha_0 = b + \eta + \sigma \tag{1}$$

其中: α_0 为电子生成率,定义为单位时间内空间产生的电子数与总数之比,与空间电场强度相关,同一电压下为定值; b 为迁出率,在电场作用下,单位时间内移出电离区的电子数与总数之比; η 为结合率,单位时间内与正离子中和的电子数与总电子数之比; σ 为捕获率,即被空气中氧气或水分子捕获形成负离子的电子数与总电子数之比。如图9所示,当空气湿度增加后,部分电子被水分子捕获, σ 增加,破坏了式(1)原有的平衡,使近导线区电子数目减少,电离作用减弱,导致起晕电压提高。另外,负极性下,大量电子向电离区外围运动,在电离区边界上与水分子结合成负离子,这些负离子运动速度缓慢,留在电离区边界附近,引起近导线区电场减弱,电离作用减弱, α_0 减小,从而提高起晕电压。同时,因为水分子具有电负性,负极性的导线对空间水分子也有吸引作用,当空气湿度增大到一定程度以后,强极性水分子易受负极性导线吸引而在导线表面非均匀附着,增加了导线表面的粗糙度,引起起晕电压下降。

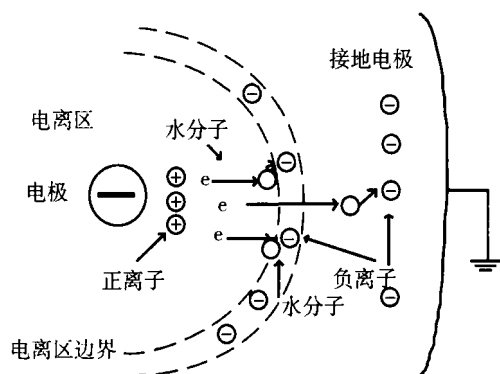


图 9 湿度对负极性电晕空间电荷分布的影响

交流电压作用下, 交流负半周首先引起电晕放电, 交流正半周起晕电压稍高, 故交流电晕起始主要决定于负半周。湿度对交流电晕的影响与直流负极性下基本相似, 即随湿度增加, 捕获率 σ 增加, 生成率 α_0 减小, 电离作用减弱, 从而提高起晕电压; 同时又由于水分子的不均匀附着, 使起晕电压下降。

交流电晕与直流负极性的不同之处在于, 交流电压是交变的, 当电压由负转正时, 负半周形成的水合负离子会以较慢的速度向电极运动, 这些水合负离子一部分被导线接收, 使水分子在导线上附着, 增加了表面的粗糙度, 引起起晕电压降低; 另一部分则留在近导线空间, 当电压变为负极性后, 空间负电荷使导线表面电场减弱, 导致起晕电压提高。2 方面共同作用, 使湿度对交流电晕起始的影响较直流电晕更加复杂。

5 结论

(1) 直流正极性导线电晕起始电压随湿度的增加略有升高, 但升高幅度不大。直流负极性电晕起始电压随湿度的增加先升高后降低, 在空气湿度达 50%~60% 时, 起晕电压最高。

(2) 交流电晕起始电压和空气湿度的关系与直流负极性情况相似。

(3) 水分子对空间电子的吸附作用以及水分子

与电子形成的负离子对电场的畸变作用, 提高了电晕起始电压。水分子在导线表面的非均匀附着, 则使起晕电压降低。湿度对交流电晕的影响更加复杂。

6 参考文献

- [1] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术. 2005, (29)12: 1-9.
- [2] 郭雄, 聂定珍, 万保权, 等. 交流特高压输电工程环境影响问题的基础研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2001.
- [3] 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.
- [4] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [5] 范建斌, 谷琛, 李军, 等. ± 800 kV 典型直流设备电晕起始电压的海拔校正方法[J]. 中国电机工程学报. 2007, 28(25): 8-13.
- [6] Nayak S K, Thomas M J. An integro-differential equation technique for the computation of radiated EMI due to corona on HV power transmission line [J]. IEEE Transactions on Power delivery, 2005, 20(1): 488-493.
- [7] D B Philips, R. G Olsen, P D Pedrow. Corona onset as a design optimization criterion for high voltage hardware[J]. IEEE transactions on dielectric and electrical insulation, 2000, 11: 744-751.
- [8] Van Brunt RJ. Physics and chemistry of partial discharge and corona [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 761-784.
- [9] A.A. Al-Arainy, N.H. Malik. Statistical variation of ac coronap pulse amplitudes in point-to-plane air gaps [J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 681-687.
- [10] N.L. Allen, M Abdel-Salam and I. Cotton. Effects of temperature and pressure change on positive corona and sparkover under direct voltage in short air gaps[J]. IET sci. techol, 2007, 1(4): 210-215.
- [11] Trichel G W. The mechanism of the negative point to plane corona onset[J]. physical Review, 1938.
- [12] 陈勇, 万启发, 霍锋, 等. 1000 kV 交流输电线路导线的电晕特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 30-31.

Influence of Humidity on Conductor Corona Onset Voltage

WANG Qing-liang¹, ZHANG Lu¹, LI Zhou¹, FAN Jian-bin², YIN Yu², GU Chen², ZHANG Qiao-gen¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

[Abstract] UHV transmission lines in China may cross some high humidity areas such as lakes and mountains. Air humidity has great effect on corona performance of transmission lines. In this paper, AC and DC corona onset voltage under different air humidity was studied with the line-cylinder electrode. The results show that the change of the air humidity has slight effect on positive DC corona onset voltage. But the change of the air humidity has an obvious effect on AC and negative DC corona onset voltages. The AC and negative DC corona onset voltages are highest when the relative air humidity is about 50%~60%. The influences of humidity on space charge distribution and the rough rate of the electrode surface are the main reasons that may cause the corona onset voltage changes with air humidity.

[Keywords] air humidity; corona; corona onset voltage

(责任编辑: 魏希辉)