

风速对高压输电线电晕放电电流的影响研究

风作为一种常见的自然现象，当其达到一定大小时，会严重影响高压输电线路的电晕放电。从电晕放电时粒子所受力的角度出发研究风速对电晕放电的影响，将带电粒子的受力划分为电场所产生的力与风所产生的力之和。根据气体放电理论，推导出电晕放电点附近，某一单位体积单元内带电粒子的六种变化，并通过研究电晕放电发生时单位体积内粒子数目的增减，计算电晕放电电流的微观表达式。从该表达式的计算过程中可以发现，电晕放电受大气气压、环境温度和风速等多种因素制约。通过电晕放电电流的微观公式、宏观表达式以及电晕放电电流的测试实验，得到风速的大小影响电晕放电电流的大小，风速越大电晕放电电流越大。

王 雷 王平平/陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应国家级重点实验室

0 引言

特高压直流输电工程的相继建成投运和持续安全稳定运行，标志着特高压直流输电技术已经成熟，具备大规模应用的条件^[1-2]。随着输电电压等级的提高，电晕放电不可避免，并已成为影响高压、特高压输电线路安全稳定运行的重要因素。

风是由于空气对流而形成的一种常见的自然现象。风速达到一定大小时，会严重影响高压输电线路的电晕放电，在我国西北和沿海地区常年风速较大，这种影响尤为突出。文献[3]研究了风对单极直流导线表面电晕的影响，研究表明电晕损耗随风速增大而增加。文献[4]通过实验测量的方法研究了直流线路下

国家自然科学基金资助项目(51777213)

风对地面合成电场强度和离子流密度分布的影响。文献[5]研究了风速对特高压直流输电线路离子流场分布的影响。

为研究风速对高压输电线电晕放电电流的影响，本文从气体放电的基本过程及气体击穿入手，分析电晕放电的物理机制，在此基础上推导出电晕放电电流的微观表达式，并在分析电晕放电电流的宏观表达式和实验研究的基础上，得到风速对电晕放电电流的影响规律。

1 电晕放电电流微观计算

当高压传输线发生电晕放电时，气流会作用于放电时产生的粒子，将气流对粒子的作用力定义为风力。则发生电晕放电时，带电粒子所受的力为电场力和风力的矢量和，即

$$\vec{F}_t = \vec{F}_e + \vec{F}_w \quad (1)$$

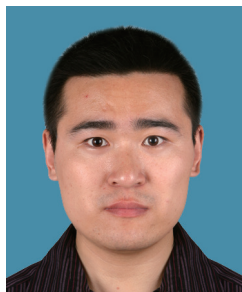
式中， $\vec{F}_t$ 为带电粒子所受力的瞬间矢量和； $\vec{F}_e$ 为电场对带电粒子的作用力； $\vec{F}_w$ 为气流对带电粒子产生的风力。

电晕放电电流由以下条件决定：高压传输线产生的电场、电场对空气电离后由电离后的电荷产生的空间电场以及风力和电场对离子的运动轨迹和分布的影响。

假设带电粒子在真空中运动，它从电场得到的能量全部转化为动能，使离子加速。根据牛顿第二定律，式(1)中电场力分量 $\vec{F}_e$ 可以表示为

$$\vec{F}_e = m_i \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} \quad (2)$$

式中， m_i 为离子质量； $\vec{v}$ 为离子速度； $\vec{E}$ 为



王 雷/讲师

关键词/Keywords

风速·
电晕放电·
电流·
高压输电·
带电粒子·

高压传输线产生的电场。

由于与大气分子的碰撞会造成动能损伤，空气中的大气分子会降低离子的运动速度。碰撞会减掉离子的大部分速度，若是在气体中，由于碰撞时气体夺取能量，这就像摩擦力作用一样，最终离子的速度落到某一个值，称为平均漂移速度。平均而言，认为此时的运动速度与电场 $\vec{E}$ 成正比关系，且比例系数为一常量，该常量仅与大气成分和大气密度有关^[6]。为此，在空气静止时，假设初速度为零，则离子的速度可以表示为

$$\vec{v} = k_i \vec{E} \quad (3)$$

式中， k_i 为离子迁移率。

气流产生的风力对带电粒子的作用力为^[7]

$$\vec{F}_w = C_D q_r S \quad (4)$$

式中， q_r 为气流的动力； S 为带电粒子的投影面积； C_D 为阻力系数。

将对电子的作用力等效为电场力，那么电子所受的力可假设为总的电场力，即原电场 $\vec{E}_r$ 所产生的力和风力的等效电场 $\vec{E}_w$ 所产生的力。等效后，总电场为

$$\vec{E} = \vec{E}_r + \vec{E}_w \quad (5)$$

其中

$$\vec{E}_w = \vec{F}_w / e = C_D q_r S / e \quad (6)$$

电晕放电发生时，会有电子、正离子和负离子同时出现，这些带电粒子共同作用促使电晕放电的发生，产生电晕电流。那么电晕放电发生时，这些带电粒子是如何发生变化的，下面根据气体放电理论对电晕放电发生时带电粒子的增减进行详细研究，并进一步计算电晕放电电流。在电晕放电点附近，取某一单位体积单元，则在该体积单元内带电粒子的变化有以下六种。

1.1 汤生电离

根据汤生理论，电子在向阳极方向运动时，与气体分子碰撞，电离会产生大量的电子和正离子，将这一过程称为汤生电离。假设某指定区域内含有 n_1 个电子， n_1 个电子前进距离 dx 碰撞产生的带电粒子数 dn ，则有

$$dn = \alpha n_1 dx \quad (7)$$

根据式(7)，可知由于汤生电离单位体积内电子增长速率为

$$\frac{dn_1}{dt} = \alpha n_1 \frac{dx}{dt} = \alpha n_1 \vec{v} \quad (8)$$

由式(3)得

$$\frac{dn_1}{dt} = \alpha n_1 k_i |\vec{E}| \quad (9)$$

式中， n_1 为该指定区域内的电子数， $|\vec{E}|$ 为实际电场与风力的等效电场之和。

由于汤生电离产生一个电子的同时，会产生一个正离子，因此正离子产生的速率为

$$\frac{dn_2}{dt} = \alpha n_1 k_i |\vec{E}| \quad (10)$$

式中， n_2 为由汤生电离产生的正离子数。

1.2 自然电离

地球上的放射性物质发出的放射性射线、外太空的宇宙射线以及从太阳飞来的高能粒子等在不断地电离着大气。这些自然因素产生离子的速率为 q_i ， q_i 同为正负离子产生的速率，因为根据电荷守恒定律，电离产生一个电子的同时，也会出现一个正离子。

1.3 复合

气体中电子和正离子由于碰撞而恢复到中性粒子的过程，称为复合。电子与正离子的复合会导致离子数量的损耗。设单位时间、单位体积内电子和正离子数为 n_1 和 n_2 ，那么由于复合而减少的电子和正离子数目为

$$dn = -\alpha_r n_1 n_2 dt \quad (11)$$

式中， $-\alpha_r$ 为离子复合系数，其数值取决于大气压强和大气温度。

1.4 扩散

在带电粒子复合的同时，还伴随着带电粒子的扩散而导致带电粒子在一定区域内减少。假设 n_i 是指定区域的带电粒子数，则其梯度为 ∇n_i ， ∇ 为微分算子，粒子进入或逸出该指定区域，导致粒子

增加或减小的数是陡度 ∇n_i 的微分, 即为 $\nabla^2 n_i$, ∇^2 为拉普拉斯算符。所以因粒子扩散导致一区域内粒子数目的变化可以由式(12)表示

$$\frac{dn_i}{dt} = D_i \nabla^2 n_i \quad i=1, 2, 3 \quad (12)$$

式中, D_i 为扩散系数, 它与迁移率有关, 可以表示为^[8]

$$D_i = k_i \rho / (Ne) \quad (13)$$

式中, N 为在压强 p 下单位立方厘米体积内的分子数。

一般电晕放电点附近的电荷密度要大于周围的电荷密度, 因此扩散一般会导致带电粒子数的减少。

1.5 电子附着产生负离子

电子和中性原子或分子碰撞时可以发生种种反应, 根据气体的种类和电子的能量, 电子还可以被原子或分子捕获形成负离子, 这种现象为电子的附着。

定义附着系数 δ , 相当于一个电子在1 s内发生附着的次数。如果 τ 为一个电子附着大气分子的平均时间, 则电子附着速率或负离子产生速率为

$$\frac{dn_3}{dt} = \frac{n_1}{\tau} \quad (14)$$

式中, τ 由大气温度和压强决定, 其等于每秒内与空气分子碰撞的电子数与附着系数 δ 的比值。

1.6 空间电荷电场导致粒子数的变化

由静电理论, 在无限小体积内电荷导致粒子数的变化可表示为

$$\iint_{S_a} \bar{J}_i d\bar{S}_a = -\frac{dq}{dt} \quad i=1, 2, 3 \quad (15)$$

式中, $\bar{J}_i$ 为带电粒子的电流密度; $d\bar{S}_a$ 为单元面积。

设 ρ_i 表示无穷小空间的体电荷密度, 则

$$-\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \iiint_{V_a} \rho_i dV_a = \iiint_{V_a} \bar{J}_i d\bar{S}_a \quad (16)$$

根据斯托克斯积分定理

$$\begin{aligned} \iint_{S_a} \bar{J}_i d\bar{S}_a &= \iiint_{V_a} \nabla \bar{J}_i dV_a \\ &= \iiint_{V_a} \left(-\frac{d\rho_i}{dt}\right) dV_a \end{aligned} \quad (17)$$

因此, 可得体电荷密度的变化率公式为

$$\nabla \bar{J}_i = -\frac{d\rho_i}{dt} \quad (18)$$

式(18)应用于三种带电粒子, 得到电晕放电中电场作用产生的粒子。对于电子有

$$\bar{J}_1 = -n_1 e \bar{v}_1 \quad (19)$$

由以上两式得

$$\rho_1 = n_1 e \quad (20)$$

于是, 电子数量变化率可以表示为

$$\nabla n_1 \bar{v}_1 = \frac{dn_1}{dt} \quad (21)$$

将式(12)代入上式得

$$\frac{dn_1}{dt} = \nabla n_1 k_1 \bar{E}_1 \quad (22)$$

式中, $\bar{E}_1$ 为实际电场与风力电场的等效电场之和。同理, 对于正离子

$$\bar{J}_2 = n_2 e \bar{v}_2 \quad (23)$$

式中, $\bar{v}_2$ 为正离子的运动速度; e 为正离子的电荷量。结合式(18)得

$$\rho_2 = n_2 e \quad (24)$$

于是, 正离子数变化率可以表示为

$$\nabla n_2 \bar{v}_2 = \frac{dn_2}{dt} \quad (25)$$

正离子速度可以用正离子处的合成电场强度代替实际电场与风力电场的等效电场之和。将式(13)代入上式得

$$\frac{dn_2}{dt} = \nabla n_2 k_2 \quad (26)$$

对于负离子

$$\bar{J}_3 = -n_3 e \bar{v}_3 \quad (27)$$

结合式 (18) 得

$$\rho_3 = n_3 e \quad (28)$$

于是, 负离子密度变化率可以表示为

$$\overline{\nabla n_3 v_3} = \frac{dn_3}{dt} \quad (29)$$

将式 (3) 代入上式得

$$\frac{dn_3}{dt} = \overline{\nabla n_3 k_3 E_3} \quad (30)$$

式中, $\overline{E_3}$ 为实际电场与风力的等效电场之和。

根据以上分析可知, 电晕放电发生时, 单元空间内带电粒子将发生以上几种变化, 表1列出了电子、正离子和负离子三种带电粒子的增减。

表1 单元空间内的粒子变化

粒子种类	粒子增加	粒子损耗
电子	汤生电离 $\alpha n_1 k_1 \overline{E_1} $, 自然辐射 q_i , 电场激发 $\overline{\nabla(k_1 E_1 n_1)}$	复合 $-\alpha_r n_1 n_2$, 扩散 $-D_1 \nabla^2 n_1$, 电子吸附 $-n_1/\tau$
正离子	汤生电离 $\alpha n_1 k_1 \overline{E_1} $, 自然辐射 q_i , 电场激发	复合 $-\alpha_r n_1 n_2$, 扩散 $-D_2 \nabla^2 n_2$
负离子	电场激发 $\overline{\nabla(k_3 E_3 n_3)}$, 电子吸附 n_1/τ	扩散 $-D_3 \nabla^2 n_3$

三种粒子共同作用构成电晕放电电流, 假设该封闭单元的电位移矢量为 $\overline{p_i}$, 根据高斯定理有

$$\iint_{S_a} \overline{p_i} dS_a = q = \iiint_{V_a} \rho_i dV_a \quad i=1, 2, 3 \quad (31)$$

式中, dS_a 为表面积单元; q 为无限小体积内的净电荷; ρ_i 为粒子的体电荷密度; dV_a 为体积单元。

根据散度定理上式变化为

$$\iint_{S_a} \overline{p_i} dS_a = \iiint_{V_a} \overline{\nabla p_i} dV_a = \iiint_{V_a} \rho_i dV_a \quad (32)$$

$$\overline{\nabla p_i} = \rho \quad (33)$$

电位移矢量可以由下式获得, 即

$$\overline{p_i} = \epsilon_0 \overline{E_T} \quad (34)$$

式中, ϵ_0 为自由空间的介电常数。另外, 单位体积内的离子密度可以通过对三种电荷 n_1 、 n_2 和 n_3 粒子密度求得

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = e[n_2 - (n_1 + n_3)] \quad (35)$$

e 为一个电子的电量。由式 (33) ~ 式 (35)

可得

$$\overline{\nabla E_T} = \frac{e[n_2 - (n_1 + n_3)]}{\epsilon_0} \quad (36)$$

根据表1内单位体积内粒子的变化规律, 可以得到以下方程

$$q_i + n_1 \alpha k_1 |\overline{E_1}| - \alpha_r n_1 n_2 - D_1 \nabla^2 n_1 + \overline{\nabla(k_1 E_1 n_1)} - \frac{n_1}{\tau} = \frac{dn_1}{dt} \quad (37)$$

$$q_i + n_1 \alpha k_1 |\overline{E_1}| - \alpha_r n_1 n_2 - D_2 \nabla^2 n_2 + \overline{\nabla(k_2 E_2 n_2)} = \frac{dn_2}{dt} \quad (38)$$

$$-D_3 \nabla^2 n_3 + \overline{\nabla(k_3 E_3 n_3)} + \frac{n_1}{\tau} = \frac{dn_3}{dt} \quad (39)$$

理论上, 通过式 (37) ~ 式 (39) 便可以表述电晕放电发生时, 任何区域内的带电粒子的变化规律。这些带电粒子的变化规律为研究电晕放电影响因素提供了理论依据。带电粒子的流动产生电流, 单位体积单元的电流也是三种带电粒子共同作用的结果, 电晕电流可以表示为

$$i = \iint_{S_a} \overline{J_i} dS_a \quad (40)$$

由电流密度定义, 可知

$$\overline{J_i} = \rho_i \overline{v_i} \quad (41)$$

则单位体积元内电晕放电的电流密度可以表述为

$$\overline{J_i} = -\rho_1 \overline{v_1} + \rho_2 \overline{v_2} - \rho_3 \overline{v_3} \quad (42)$$

结合式 (3)、式 (40) 和式 (42) 得高压输电线的电晕电流方程为

$$i = e \iint_{S_a} (-n_1 k_1 \overline{E_1} + n_2 k_2 \overline{E_2} - n_3 k_3 \overline{E_3}) dS_a \quad (43)$$

式中, 角标1~3分别代表电子、正离子和负离子; n 为各离子浓度; k 为离子迁移率; E 为电荷电场和风力电场的合成场; e 为单位电荷电量; dS_a 为表面积单元。

式 (43) 为电晕放电发生时放电区任何一点的放电电流, 受多种条件制约, 虽然不能准确确定式中各元素的值, 但是该电流表达式为分析高

压传输线电晕放电影响因素以及其变化规律提供了理论依据。

通过对电晕放电电流的微观计算发现电晕放电受大气气压、环境温度和风速等多种因素制约。例如离子复合系数 α_r 和迁移率 k 的数值取决于大气压强和大气温度；合成电场强度 E 受到气流的影响，气流取决于风速；风速越大合成电场强度 E 越大，电晕电流则越大。

2 电晕放电电流宏观表述

由上一节的研究可知，气流对粒子的作用会影响电晕放电的变化。风对电晕放电的影响是由于气流产生风力的作用，而风力的大小取决于风速。

超特高压输电线上不可避免地会发生电晕放电，式(44)从宏观上给出了在无风条件下电晕放电的电流方程，即

$$I = Av_i(V_a - V_0) \quad (44)$$

式中， I 为平均电晕放电电流； A 为常量； v_i 为离子速度； V_0 为电晕阈值电压； V_a 为高压输电线实际电压。

在有相对气流运动的条件下，气流对电晕放电空间离子产生作用力，会加快电晕空气区离子的扩散，此时电晕放电电流方程为

$$I = A(v_i + v_w)(V_a - V_0) \quad (45)$$

式中， v_w 为相对气流的速度，即风速。

通过式(45)从宏观电流表达式上对高压输电线电晕放电的电流描述，可知风速度大小影响放电电流的大小，风速越大放电电流越大。

3 风速对电晕放电电流影响的实验研究

为了进一步研究风速对电晕放电电流的影响，本文设计了电晕放电电流测试实验，利用强力风扇来产生不同的风速，来测试在不同风速下的电晕放电电流大小，实验布局如图1所示。

利用针-板电极模拟电晕放电系统，实验用GLOW28720型静电高压发生器（输出高压范围为0~35 kV）产生高压，实物如图2所示。研究电晕放电过程中脉冲电流时需要测试回路的平均

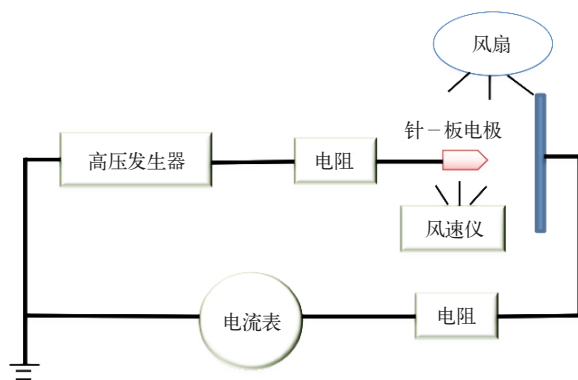


图1 实验系统示意图

电流，电晕放电平均电流可由防静电高压微安表BY2011测得，该微安表实物如图3所示，量程为0~19 999 μA ，准确度为0.2级。



图2 实验用高压直流电源



图3 BY2011型微安电流表

实验时，设置高压发生器的电压为10 kV，通过调节风扇的不同档位和风扇距离放电点的距离，在放电点产生不同的风速。利用风速仪记录下风速，并记录不同风速下电流表的读数，得到电晕放电电流在不同风速下的电流值如表2所示。从表2可以看出，实验测试到的电晕放电电流随风速的变大而增加，这与理论推导相一致。

4 结束语

根据气体放电理论，从电晕放电发生时粒子

表2 电晕放电电流测试结果

风速 /(m/s)	放电电流 / μ A	风速 /(m/s)	放电电流 / μ A
0	305	5.0	399
1.0	324	5.9	417
2.1	342	6.1	439
3.0	363	7.1	461
4.2	380	8.0	483

所受力的角度出发,并通过研究电晕放电发生时单位体积内粒子数目的增减,计算了电晕放电电流的微观表达式。从该表达式的计算过程中可以发现,电晕放电受大气气压、环境温度和风速等多种因素制约。通过电晕放电电流的微观公式、宏观表达式以及电晕放电电流的测试实验,得到风速的大小影响电晕放电电流的大小,风速越大电晕放电电流越大。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出

版社, 2015.

- [3] Khalifa M M, Morris R M. A laboratory study of the effects of wind in DC corona[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(3): 290-298.
- [4] Hara M, Hayashi N, Shiotsuki K, et al. Influence of wind and conductor potential on distributions of electric field and ion current density at ground level in DC high voltage line to plane geometry[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(4): 803-814.
- [5] 汪泓, 李敏, 吕建红, 等. 风速对特高压直流输电线路离子流场分布的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2897-2901.
- [6] Joseph E Nanevicz. Static charging and its effects on avionic Systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, EMC-24(2): 203-209.
- [7] Cobine J D. Gaseous Conductors[M]. 2nd ed. New York: Dover Publications Inc, 1958.

(收稿日期: 2018-06-21) **EA**

(上接第22页)

- Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10401-10414.
- [5] 单茂华, 李陈龙, 梁廷婷, 等. 用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 469-477.
- [6] Ise T, Kita M, Taguchi A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
- [7] 蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, 38(1): 63-68, 82.
- [8] 胡毅, 陈轩恕, 杜砚, 等. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备, 2008(1): 19-22.
- [9] 邓颖, 袁野, 张霞. 大容量锂电池在分布式储能

系统中的应用和前景[J]. 现代机械, 2015(6): 83-86.

- [10] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- [11] Yang X S, Deb S. Cuckoo search via levy flights[C]. NaBic 2009: Proceedings of World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, Coimbatore, India, 2009: 210-214.
- [12] Gandomi A H, Yang X S, Alavi A H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems[J]. Engineering with Computers, 2013, 29(2): 245.
- [13] 兰少峰, 刘升. 布谷鸟搜索算法研究综述[J]. 计算机工程与设计, 2015(4): 1063-1067.

(收稿日期: 2018-08-02) **EA**