

文章编号: 1005-2992(2017)06-0086-07

# 考虑空气湿度影响的特高压直流线路离子流场研究

祝 贺<sup>1</sup>, 刘 豪<sup>2</sup>, 李本增<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 凉山 615000)

**摘 要:** 随着特高压直流输电线路的建设, 线路引起的电磁环境问题也受到广泛关注。线路附近的合成电场和离子流密度是评价电磁环境的两个重要指标。我国西南地区水电资源丰富, 建设特高压直流输电线路将电能输送到负荷中心具有很高的经济效益。然而, 西南地区较高的空气湿度是影响电磁环境的重要因素。为了得到受空气湿度影响的特高压输电线路地面离子流场的分布规律, 建立考虑空气湿度影响的离子流场计算模型, 研究不同空气湿度下特高压直流输电线路离子流场的分布规律。计算结果表明: 在空气湿度影响下, 随空气湿度增加地面合成场强和离子流密度幅值都有不同程度增大, 合成场强的增长幅度非常显著, 而离子流密度的增长幅度很小, 基本可以忽略。

**关 键 词:** 特高压直流输电线路; 空气湿度; 上流有限元法; 合成电场; 离子流密度

**中图分类号:** TM726

**文献标识码:** A

为满足全面建成小康社会对电力增长的需求, 克服我国经济发展与能源分布不平衡的现状。发展具有输电容量大, 输送距离远, 线路走廊占地少等优点的特高压电网, 将我国西部地区的电能资源输送到经济发展较快的东部地区, 实现我国电力资源的优化配置<sup>[1-2]</sup>。与交流输电线路相比, 直流输电线路导线极性不变, 电晕放电产生的带电离子, 在电场力的作用下向周围空间运动, 导致输电线路附近空间充满带电离子, 因此, 直流输电线路周围空间的电场是由空间电荷与导线共同作用产生的, 称为合成电场<sup>[3-5]</sup>。

我国幅员辽阔, 地形和气象条件复杂多变, 特高压直流输电线路通常要途径高海拔, 高温湿, 重污染等气象条件复杂地区。随着特高压直流输电线路的建设, 学者们做了很多关于雾<sup>[6]</sup>、风速<sup>[7-9]</sup>、降雨<sup>[10]</sup>、雾霾<sup>[11]</sup>等气象条件对离子流场分布影响的研究。但针对空气湿度对离子流场分布规律影响的深入研究依然比较少。我国西南地区水电资源丰富, 建设特高压直流输电线路将丰富的电能资源输送到东部沿海地区具有很高的经济效益。但西南地区降雨多, 空气湿度大, 空气中悬浮着大量水蒸气分子会影响线路附近的电磁环境<sup>[12-13]</sup>。环境的合成电场和离子流密度是判断线路沿线电磁环境是否超标的重要依据。因此, 加强空气湿度对特高压直流输电线路电磁环境影响的研究, 对发展特高压电网的具有重要的工程实用价值。

本文通过分析空气湿度对特高压直流输电线路离子流场影响的机理, 建立考虑空气湿度影响的离子流场计算模型, 研究不同空气湿度对特高压直流输电线路离子流场分布的影响。基于 Kaptzov 假设, 采用上流有限元法求解, 给出不同空气湿度影响下特高压直流输电线路地面合成电场和离子流密度的分布规律, 为新建特高压直流输电线路设计提供依据。

收稿日期: 2017-03-10

作者简介: 祝 贺(1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 特高压输电技术及电磁环境。

电子邮箱: zhuhe1215@163.com(祝贺); liuhao15@126.com(刘豪); 954562880@qq.com(李本增)

# 1 空气湿度对离子流场的影响机理

## 1.1 空气湿度对离子迁移率影响

环境空气是由多种气体组成的混合气体。环境空气包括氮气、氧气、氩、二氧化碳和水蒸气等成分。空气湿度越大环境空气中水蒸气的含量越高。我国南方地区空气湿度比较大,沿海地区的空气湿度可以达到 80% 以上,雾天空气的相对湿度可以达到 100%。当空气湿度较大时,空气中悬浮着大量水蒸气,带电离子与水蒸气发生碰撞和吸附,使水蒸气荷电化,荷电饱和后带电离子不再与水蒸气发生碰撞。水蒸气质量较大,电场力对其影响很小,荷电饱和的水蒸气保持静止。荷电化的水蒸气带有电荷,导致其附近的电场发生改变,以及影响空气中带电离子的密度和离子的迁移率。

杨津基教授在分析带电粒子在电场中的运动规律时,认为离子迁移率按照气体质量的  $M^{1/2}$  变化<sup>[14]</sup>。假设空气湿度为  $H$  时的离子迁移率

$$K_{Hr} = \sqrt{\frac{M_n}{M_{Hr}}} K_n, \quad (1)$$

式中: $K_n$  正常天气时的离子迁移率; $M_n$  为正常天气时的空气分子相对质量, $M_n = 29$ ;  $M_{Hr}$  为空气湿度为  $H$  时的空气分子相对质量。

由公式(1)可知,通过求解空气湿度为  $H$  时的气体分子质量即可获得在该相对湿度下的离子迁移率。赵永生等在研究雾对离子流场分布影响时,认为饱和空气湿度(空气相对湿度 100%) 的空气分子相对质量<sup>[15]</sup>

$$M_a = 29 \frac{m_h + m_a}{m_a}, \quad (2)$$

式中: $m_h$  为饱和空气湿度空气中水蒸气的含量, $m_h = 23 \text{ g/m}^3$ ;  $m_a$  为常温常压下空气密度, $m_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

由公式(2),可求得空气湿度为  $H$  时的空气分子相对质量

$$M_{Hr} = 29 \frac{m_{Hr} + m_a}{m_a}, \quad (3)$$

式中: $m_{Hr}$  为空气湿度为  $H$  时的水蒸气含量,可通过饱和空气湿度空气中水蒸气含量求得。在常温常压下,空气湿度为  $H$  时的水蒸气含量

$$m_{Hr} = H_r m_h \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $H_r$  为空气相对湿度; $m_h$  为常温常压下饱和空气湿度空气中水蒸气含量, $\text{g/m}^3$ 。

## 1.2 空气湿度对电晕放电的影响

空气湿度是影响输电线路电晕特性的重要参数。线路发生电晕放电后,导线表面场强为电晕起晕场强(Kaptzov 假设)。高场强下有效电离系数随湿度升高而增大,高场强区域内碰撞电离能力增强,使电晕起始电压随湿度升高而减小,电晕放电程度增加<sup>[16-17]</sup>,从而影响环境中带电离子的分布。

空气湿度对电晕放电的影响与湿空气中的水分子含量对各放电参数的影响有关。Abdel - Salam 在研究空气湿度对棒板电晕放电影响时,认为环境空气为干空气和水蒸气两部分组成的混合气体,将空气湿度对电晕放电的影响分为干空气和水蒸气对电晕放电的影响<sup>[18-19]</sup>。因此,根据 Abdel - Salam 法,空气湿度影响的导线电晕起始场强  $E_{onsetp}$  分解为干空气和水蒸气条件下的电晕起始场强  $E_{dp}$  和  $E_{sp}$  两个

部分,即

$$E_{onsetp} = \frac{P_d}{P} E_{dp} + \frac{P_s}{P} E_{sp}, \quad (5)$$

式中: $P_s$  为水蒸气分压; $P_d$  为干空气分压; $P$  为空气压强,根据道尔顿分压定律, $P = P_s + P_d$ 。

水蒸气分压  $P_s$  可由下式计算:

$$P_s = H \cdot P_w, \quad (6)$$

$$P_w = 611 \times 10^{7.5t/(273.3+t)}, \quad (7)$$

式中: $P_w$  为饱和水蒸气分压,即饱和湿空气中水蒸气分压; $H$  是空气相对湿度。

根据公式(6),公式(5) 可求得空气相对湿度为  $H$  时的导线电晕起始场强

$$E_{onsetp} = E_{dp} \cdot \frac{P_d}{P} + E_{sp} \cdot H \cdot \frac{P_w}{P}. \quad (8)$$

由公式(8) 可知, $E_{onsetp}$  的计算需要求出  $E_{dp}$  和  $E_{sp}$ 。因为 Peek 公式计算的导线电晕起始场强是不考虑空气湿度影响的,将 Peek 公式计算的结果作为干空气时导线电晕起始场强

$$E_{dp} = 30m(1 + 0.301/\sqrt{r}), \quad (9)$$

式中: $m$  为导线表面粗糙系数; $r$  为线路导线半径。

水蒸气条件下的导线电晕起始场强  $E_{sp}$ , 可以通过计算饱和湿空气下的导线起晕场强  $E_{wp}$  求得,即

$$E_{sp} = \left(1 - \frac{P}{P_w}\right) E_{dp} + \frac{P}{P_w} E_{wp}. \quad (10)$$

山东大学徐明铭等<sup>[20]</sup> 在研究湿度对直流电晕放电影响时,认为饱和湿空气下电晕起始场强

$$E_{wp} = 33.37 \left(1 + \frac{0.259}{\sqrt{r}}\right). \quad (11)$$

结合公式(10) 和公式(11),可求得水蒸气中直流导体电晕起始场强  $E_{sp}$ , 进入计算出湿空气中导线电晕起始场强  $E_{onsetp}$ , 如公式(12) 所示。

$$E_c = E_0 m \delta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r_0}}\right) \left[1 + \left(5.76 - \frac{1.63}{0.21 + 0.69\sqrt{\delta r_0}}\right) \cdot \frac{P_w}{P} \cdot H\right], \quad (12)$$

式中: $E_0$  为输电线路表面场强, kV/m; $r_0$  为输电线半径, cm; $m$  为输电线表面粗糙系数; $\delta$  为空气相对密度; $P_w$  为饱和水蒸气分压; $P$  为湿空气压强; $H$  为空气的相对湿度。

## 2 建立考虑空气湿度的离子流计算模型

### 2.1 控制方程

环境空气是由多种成分组成的混合气体,空气各成分均匀分布并充满整个空间。在研究空气湿度影响离子流场分布时,认为环境空气是由干空气和水蒸气组成的混合气体。干空气包括氮、氧、氩和二氧化碳四种气体占空气总体积的 99.98%。水蒸气在空气总体积的占比很小,可以忽略水蒸气对空气介电常数的影响,因此,可以选用与单一气体相似的泊松方程和电流连续性方程进行计算。考虑空气湿度的特高压直流线路离子流场的控制方程为

$$\nabla \cdot \nabla \varphi = \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho^+ - \rho^-}{\varepsilon_0}, \quad (13)$$

$$J^+ = K'_+ \rho_e^+ E_t + \rho_s^+ V_s^+, \quad (14)$$

$$J^- = K'_- \rho_e^- E_t - \rho_s^- V_s^-, \quad (15)$$

$$\nabla \cdot J^+ = -R \frac{\rho^+ \rho^-}{e}, \quad (16)$$

$$\nabla \cdot J^- = R \frac{\rho^+ \rho^-}{e}, \quad (17)$$

式中: $\varphi$  为标量电位,V; $\rho^+ \rho^-$  分别为空间的正、负电荷密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\rho_e^+ \rho_e^-$  分别为空间的正、负离子电荷密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\rho_s^+ \rho_s^-$  分别为带正、负电荷的水蒸气电荷密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $E_t$  为合成电场的电场强度,V $\cdot \text{m}^{-1}$ ; $J^+ J^-$  分别为正、负离子流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ; $K'_+ K'_-$  分别为空气中正、负离子迁移率, $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $V_s^+ V_s^-$  分别为带正、负极性水蒸气的移动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $R$  为离子复合系数, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\varepsilon_0$  为空气介电常数, $8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ; $e$  为电子电量, $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

## 2.2 考虑空气湿度的离子流场基本假设及边界条件

在研究过程中,通常需要使用一些假设条件使计算过程得到简化。运用上流有限元法计算特高压直流输电线路空间合成电场时,根据线路离子流场的特点引入以下基本假设:

(1)环境空气中环境空气是由多种成分组成的混合气体,在研究空气湿度影响离子流场时,认为环境空气是由于空气和水蒸气两种气体组成的。

(2)水蒸气的形状为标准球形,并均匀分布充满整个空间,不影响空气介电常数,忽略荷电后的水蒸气造成的局部电场畸变。

(3)环境空气中的悬浮水蒸气均匀分布,不考虑水分子的动态过程。在电场中水蒸气分子的运动速度相对离子的迁移速度来说可以被忽略。

(4)导线附近充满带电离子,忽略导线电离层的厚度。

(5)电晕产生的空间电荷只影响场强大小而不影响其方向(Deutsh假设):

在求解特高压直流输电线路附近空间的离子流场时,需要根据假设条件和实际情况确定控制方程的边界条件。

(1)地面: $\rho=0$ ;

(2)输电线表面: $\rho=\pm U$ ( $U$  为线路电压);

(3)人工边界: $\rho=U_b$ ( $U_b$  为标称电位)。

(4)输电线路导线表面保持起晕场强  $E^c$  不变,即  $\frac{\partial \rho}{\partial n} = E^c$ 。(Kaptzov 假设)

通过以上的基本假设和边界条件,可以求解出泊松方程和电流连续方程,进而求得直流输电线路的离子流密度与合成电场。

## 2.3 考虑空气湿度影响的离子流场计算流程

综上,进行空气湿度影响离子流场分布的研究时,根据控制方程,基本假设和边界条件,对考虑空气湿度影响的离子流场求解流程如下:

(1)输入各项参数,设置导线、地面和人为边界条件,生产网格;

(2)设置导线表面电荷密度,求解标称电场;

(3)采用上流有限元法求解不考虑空气湿度时的空间电荷密度。

(4)求解空间电位和电场分布;

(5)判断导线表面场强、空间电荷密度是否满足给定误差,否则利用步骤(4)的计算结果对导线表面的空间电荷密度进行更新;

用于判断是否停止计算的判断参数  $\delta_\rho$  和  $\delta_E$  为

$$\delta_\rho = \frac{|\rho_n - \rho_{n-1}|}{\rho_{n-1}} < 1\% , \tag{18}$$

$$\delta_E = \frac{|E_{\max} - E_c|}{E_c} < 1\% , \tag{19}$$

式中: $\rho_n$ 、 $\rho_{n-1}$  分别为第  $n$  次和第  $n - 1$  次导线表面的空间电荷密度; $E_{\max}$  为导线表面最大场强, $E_c$  为导线的电晕起晕场强。

(6)重复步骤(2) ~ 步骤(4)直至满足误差限定条件。

### 3 空气湿度对特高压直流输电线路离子流场的影响分析

研究对象选用±800 kV 云—广线为范例对特高压直流输电线路受空气湿度影响的空间电场与离子流密度分布进行计算。±800 kV 云—广线参数:分裂导线型号为 6×LGJ-630/45,导线分裂间距 45 cm,子导线半径 1.68 cm,线路极间距离 22 m,导线距地最低高度 18 m。特高压直流输电线路计算模型,如图 1 所示。

为了进行对比分析,计算了不同空气湿度影响下的地面合成场强和离子流密度。因为空气中水蒸气分子含量比较少,在研究空气湿度对特高压直流输电线路电场分布影响时,计算了不考虑空气湿度和空气湿度分别为 50%、80% 以及 100% 时的几种工况时空间电场和离子流密度的分布。结果如图 2、图 3 所示。

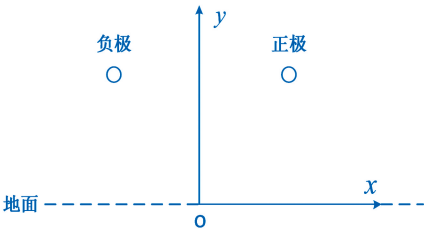


图 1 特高压直流输电线路计算模型

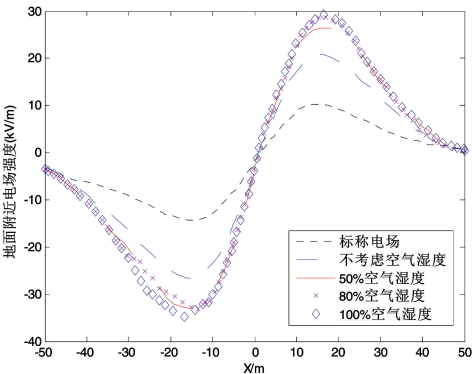


图 2 不同空气湿度下的地面合成场强分布

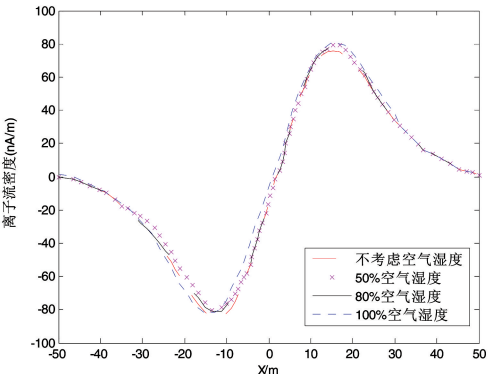


图 3 不同空气湿度情况下地面离子流密度分布

通过图 2 和图 3 可以看出,不同空气湿度情况下,特高压直流输电线路地面合成场强和离子流密度分布趋势基本相同,但随空气湿度增加地面合成场强增大幅度非常显著。由图 2 可知负极导线下的地面合成电场最大值大于正极导线下地面合成电场的最大值,当空气湿度达到 100% (饱和湿度)时,负极导线下地面合成电场强度已经超过 30 kV/m,达到 35.6 kV/m,而正极导线下地面合成电场才刚好达到 30 kV/m。说明空气湿度对直流输电线路负极导线周围的合成电场影响大于正极导线。受空气湿度影响的负极导线地面合成电场与不考虑空气湿度影响时的合成电场相比,当空气相对湿度达到 50% 时,地面合成场强最大值增加 6.2 kV/m,增加了 28%;当空气相对湿度达到 80% 时,地面合成场强增大 8.9



kV/m,增大了40%;当空气相对湿度达到100%水蒸气饱和时,地面合成场强最大值增加9.9 kV/m,增加了45%。图3为各空气湿度情况下的地面离子流密度分布。由图3可知,受空气湿度影响地面离子流密度也有所增加,但是增加幅度很小,基本上可以忽略。因此,在研究空气湿度对直流输电线路电磁环境影响时,主要考虑空气湿度对合成电场的影响。

## 4 结 论

本文通过分析空气湿度对离子流场的影响机理,建立考虑空气湿度影响的离子流场计算模型,研究4种不同空气湿度下特高压直流输电线路合成场强和离子流密度的分布规律,得到如下结论:

(1)特高压直流输电线路地面合成电场随空气湿度的增大而增大,而且负极导线地面合成场强比正极导线地面合成场强增长显著,当达到饱和空气湿度时,负极导线地面合成场强已经超过标准规定的限值30 kV/m,达到35.6 kV/m。因此,特高压直流输电线路设计时,对经过高湿度地区的线路,应考虑空气湿度对地面合成场强的影响。

(2)地面离子流密度值随湿度增大稍有增加,增加幅度很小基本可以忽略。即使空气相对湿度达到100%时,离子流密度值也在国家标准规定的控制限值内,并有足够的裕度。

(3)空气湿度影响特高压直流输电线路合成电场分布的主要原因:空气湿度较大时,空气中悬浮着的大量水分子会降低离子迁移率,使地面附近的离子流密度增长幅度很小;空气中的大量水分子吸附带电离子后而带电,使其周围的电场发生畸变,导致合成电场增大。

## 参 考 文 献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境[M]. 北京:中国电力出版社,2009:9-13.
- [2] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:11-12.
- [4] 崔翔,周象贤,卢铁兵. 高压直流输电线路离子流场计算方法研究进展[J]. 中国电机工程学报,2012,32(36):130-142.
- [5] 王义军,张玉,张卓林. 典型±660kVHVDC系统建模与运行仿真研究[J]. 东北电力大学学报,2013,33(1/2):80-83.
- [6] 蒋兴良,黄俊,董冰冰,等. 雾水电导率对输电线路交流电晕特性的影响[J]. 高电压技术,2013,39(3):636-641.
- [7] 汪润,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.
- [8] P. S. Maruvada. Electric field and ion current environment of HVDC transmission lines: comparison of calculations and measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(1):401-410.
- [9] T. B. Lu, H. Feng, X. Cui, et al. Analysis of the ionized field under HVDC transmission lines in the presence of wind based on upstream finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetism,2010,46(8):2939-2942.
- [10] 鲁非,叶齐政,林福昌,等. 雨滴对高压直流输电线路地面离子流场的影响[J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):125-130.
- [11] 杨帆,代锋,罗汉武,等. 雾霾天气下的直流输电线路离子流场分布特性及其影响因素[J]. 电工技术学报,2016,31(12):49-57.
- [12] 蒋兴良,李源军. 相对湿度及雾水电导率对直流输电线路电晕特性的影响[J]. 电网技术,2014,38(3):576-582.
- [13] 卞星明,惠建峰,黄海鲲,等. 气压湿度对负直流电晕特性影响的研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):118-124.
- [14] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [15] 赵永生,张文亮. 雾对高压直流输电线路离子流场的影响[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):194-199.
- [16] 卞星明,惠建峰,黄海鲲,等. 气压和湿度对正直流电晕流注脉冲特性的影响[J]. 高电压技术,2009,35(10):2371-2382.
- [17] 王清亮,张璐,李舟,等. 空气湿度对导线电晕起始电压的影响[J]. 电网技术,2009,30(8):98-41.
- [18] M. Abdel-Salam. Dielectric strength of compressed insulating gases and their mixtures[J]. IEEE Trans. on Industry Applications,1977,13(6):516-522.
- [19] M. Abdel-Salam. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. IEEE Trans. on Industry Applications,1985,21(1):35-40.
- [20] Xu Mingming, Tan Zhenyu, Li Kejun. Modified peek formula for calculating positive DC corona inception electric field under variable humidity[J], IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(4):1377-1382.

# Study on the Influence of Air Humidity on the Ion Current Field of UHVDC Transmission Line

Zhu He<sup>1</sup>, Liu Hao<sup>2</sup>, Li Benzeng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. State Grid Sichuan Electric Power Co., Liangzhou Power Supply Company, Liangzhou Sichuan 615000)

**Abstract:** With the construction of UHVDC transmission lines, the electromagnetic environment caused by the line is also widely concerned. The synthetic electric field and ion current density near the line are two important indexes to evaluate the electromagnetic environment. China's southwestern region is rich in hydro-power resources, the construction of UHVDC transmission lines to the power supply to the load center has a very high economic efficiency. However, the higher air humidity in the southwest is an important factor affecting the electromagnetic environment. In order to obtain the distribution law of the surface ion current field of the UHV transmission line affected by the air humidity, an ion current field calculation model considering the influence of air humidity was established to study the distribution law of the ion current field of the UHVDC transmission line under different air humidity. The results show that under the influence of air humidity, the field strength and the ion current density increase with the increase of air humidity, and the growth rate of the combined field strength is very significant, and the growth rate of ion current density is very small can be ignored.

**Key words:** UHVDC transmission lines; Air humidity; Upstream finite element method; Synthetic electric field; Ion current density