

不同降雨强度下超高压输电线路下的三维工频电场计算

蒋钟 姚芯 陈健 尉桢强

国网浙江安吉县供电有限公司, 浙江 安吉 313300

[摘要] 输电线路的电磁环境一直备受关注, 输电线路长年运行在不同的气候条件下, 其中以晴天和雨天环境居多, 不同的天气条件会改变地面附近的电场分布。文章基于三维模拟电荷法建立杆塔、弧垂导线以及雨滴的模型, 并通过 Matlab 进行编程计算, 得到如下结果: 和晴天相比, 雨天时距地 1.5m 处的场强反而减弱, 并且电场存在畸变; 雨天对近地电场有较明显的屏蔽作用, 并且随着降雨强度的增大, 屏蔽作用增强; 将计算的数值结果与 ICNIRP 规定的公众暴露场强规定值 4000V/m 进行比较, 均在安全范围之内, 从而为降雨天气下超高压输电线路杆塔周围的电磁环境数值评估提供一定的数值依据和理论支持。

[关键词] 降雨强度; 超高压输电线路; 三维工频电场计算; 杆塔; 模拟电荷法 (CSM)

DOI: 10.33142/hst.v3i3.1954

中图分类号: TM75

文献标识码: A

Three Dimensional Power Frequency Electric Field Calculation of EHV Transmission Line under Different Rainfall Intensity

JIANG Zhong, YAO Xin, CHEN Jian, WEI Zhenqiang

State Grid Zhejiang Anji County Power Supply Co., Ltd., Anji, Zhejiang, 313300, China

Abstract: The electromagnetic environment of the transmission line has always been concerned. The transmission line runs in different climatic conditions for many years, especially in sunny and rainy days. Different weather conditions will change the distribution of electric field near the ground. Based on the three-dimensional simulation charge method, the model of tower, sag wire and raindrop is established, and the following results are obtained through Matlab programming calculation: compared with sunny days, the electric field strength at 1.5m from the ground in rainy days is weakened, and the electric field is distorted; rain has obvious shielding effect on the near earth electric field, and with the increase of rainfall intensity, the shielding effect is enhanced; the calculated numerical results are within the safe range compared with the public exposure field intensity of 4000V / M specified by ICNIRP. Therefore, it can provide a certain numerical basis and theoretical support for the numerical evaluation of the electromagnetic environment around the UHV transmission line towers in rainy weather.

Keywords: rainfall intensity; EHV transmission line; three-dimensional power frequency electric field calculation; pole tower; simulated charge method (CSM)

引言

随着我国超高压与特高压输电的高速发展, 由此带来的电磁环境问题, 已经越来越受到备受社会与国民的关注。对于实际的输电线路, 需要考虑导线弧垂、杆塔的影响, 其电场的计算是复杂的三维场问题。同时, 线路实际运行在复杂的天气环境下, 其中以雨天和晴天为主, 但是现有文献对这部分的研究甚少, 所以对于复杂天气条件下的三维电场分析是很有必要的。

文献[1]在计算电场时考虑了杆塔模型, 采用三维线单元模拟电荷法计算了杆塔附近的电场, 但是其采用的杆塔模型较为简略, 与实际杆塔模型相差较大。文献[2]在计算杆塔附近的电场时细化了杆塔模型, 使其更接近实际的杆塔模型, 得到的计算结果也更加接近实际情况。文献[3]在计算杆塔附近电场时, 研究了气象因素对线路弧垂产生的影响, 进而影响了电场的分布, 但没有考虑气象因素造成的环境变化对电场分布的影响。文献[7]在计算电场时, 考虑了气象因素造成的环境变化对电场的影响, 其采用数据修正方法对模型进行修正, 但数据采集对象是某段特定的线路, 存在特殊性。

本文建立了杆塔、弧垂导线和雨滴的三维模型, 基于三维点电荷与三维线单元模拟电荷法, 利用雨滴在空间内有序分布来模拟雨天环境的方式, 研究了不同降雨强度下的天气环境对近地电场的影响。

1 三维模拟电荷法

目前, 国内外常用的计算电场方法主要是有限元法、有限差分法和模拟电荷法。本文杆塔、弧垂导线和雨滴模型均为三维模型, 模型尺寸相差较大。有限元法在划分网格时容易出现数据量过大导致无法运行或者运行过慢的问题。有限差分法也存在划分网格时容易导致数据量过大的问题。因此有限元法与有限差分法不适用于本文的研究。

模拟电荷法^[4,5]的优点在于原理简单,建模快速,求解的未知量少,从而使得计算速度快,并且算法具有较高的准确度。本文研究杆塔周围的三维电场分布,传统的二维模拟电荷法无法满足要求。杆塔和弧垂导线建模时需要用到三维线单元模拟电荷^[6],并且用三维点电荷模型来等效雨滴模型。因此,本文基于模拟电荷法的基本原理结合场强的叠加原理,得到了三维点电荷与三维线单元混合模拟电荷法的场强公式。

1.1 三维线单元模拟电荷

假设 P_1 为线单元起点,沿 P_1P_2 方向建立局部坐标 u ,并设线单元长度为 L ,则单元内部任一点 $Q(x_3, y_3, z_3)$ 的坐标可由下式求出:

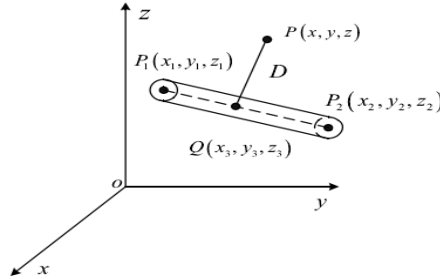


图 1 三维线单元模拟电荷模型

$$\begin{cases} x_3(u) = x_1 + l \times \frac{u}{L} \\ y_3(u) = y_1 + m \times \frac{u}{L} \\ z_3(u) = z_1 + n \times \frac{u}{L} \end{cases} \quad \begin{cases} l = x_2 - x_1 \\ m = y_2 - y_1 \\ n = z_2 - z_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u \in [0, L]$ 。线电荷密度 τ 在单元内线性分布:

$$\tau(u) = au + b \quad (2)$$

其中, a 、 b 待定,则场内任一点 $P(x, y, z)$ 产生的电位为:

$$\varphi_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\tau(u)}{D} du \quad (3)$$

D 为线单元内场源点到 P 点距离, ϵ_0 为真空介电常数。对积分限作变量代换,令 $u = Lt (0 \leq t \leq 1)$, 则式(3)可以表示为:

$$\varphi_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{At + B}{\sqrt{Et^2 + Ft + G}} dt \quad \begin{pmatrix} E = l^2 + m^2 + n^2 \\ F = -2[l(x - x_1) + m(y - y_1) + n(z - z_1)] \\ G = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\ A = aL \\ B = b \end{pmatrix} \quad (4)$$

设 $\tau(0) = \tau_1$, $\tau(L) = \tau_2$, 积分求出电位系数为:

$$\varphi_P = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} = \left\{ \frac{2E + F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F + 2E + 2\sqrt{E(E + F + G)}}{F + 2\sqrt{EG}} \right) - \frac{1}{E} (\sqrt{E + F + G} - \sqrt{G}) \right\} \tau_1 + \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{-F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F + 2E + 2\sqrt{E(E + F + G)}}{F + 2\sqrt{EG}} \right) + \frac{1}{E} (\sqrt{E + F + G} - \sqrt{G}) \right\} \tau_2 \quad (5)$$

由 $[V]=[P][Q]$ 可知, P_1 电荷与 P_2 电荷的电位系数为:

$$P_{11} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2E+F}{2\sqrt{E^3}} \ln\left(\frac{F+2E+2\sqrt{E(E+F+G)}}{F+2\sqrt{EG}}\right) - \frac{1}{E}(\sqrt{E+F+G}-\sqrt{G}) \right\}$$

$$P_{12} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{-F}{2\sqrt{E^3}} \ln\left(\frac{F+2E+2\sqrt{E(E+F+G)}}{F+2\sqrt{EG}}\right) + \frac{1}{E}(\sqrt{E+F+G}-\sqrt{G}) \right\} \quad (6)$$

为了满足边界条件, 需要加入镜像电荷, P_1 镜像电荷与 P_2 镜像电荷的电位系数为:

$$P_{11}' = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ -\frac{2E'+F'}{2\sqrt{E'^3}} \ln\left(\frac{F'+2E'+2\sqrt{E'(E'+F'+G')}}{F'+2\sqrt{E'G'}}\right) + \frac{1}{E'}(\sqrt{E'+F'+G'}-\sqrt{G'}) \right\} \quad (7)$$

$$P_{12}' = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{F'}{2\sqrt{E'^3}} \ln\left(\frac{F'+2E'+2\sqrt{E'(E'+F'+G')}}{F'+2\sqrt{E'G'}}\right) - \frac{1}{E'}(\sqrt{E'+F'+G'}-\sqrt{G'}) \right\} \quad (8)$$

由电场叠加原理可知, 实际电场强度为非镜像和镜像两部分之和, 其表达式如下:

$$E_{px} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(x-x_1-lt)}{(\sqrt{E't^2+Ft+G})^3} dt + \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(x-x_1-l't)}{(\sqrt{E't^2+F't+G'})^3} dt$$

$$E_{py} = -\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(y-y_1-mt)}{(\sqrt{E't^2+Ft+G})^3} dt + \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(y-y_1-m't)}{(\sqrt{E't^2+F't+G'})^3} dt$$

$$E_{pz} = -\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(z-z_1-nt)}{(\sqrt{E't^2+Ft+G})^3} dt + \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(A't+B')(z+z_1-n't)}{(\sqrt{E't^2+F't+G'})^3} dt$$

$$A' = a'L = (-\tau_2 + \tau_1)L$$

$$B' = b' = -\tau_1 \quad (9)$$

1.2 三维点电荷模拟电荷

假设 Q 为空间内一点电荷, P 为空间内任一点, 两点坐标如图2所示。

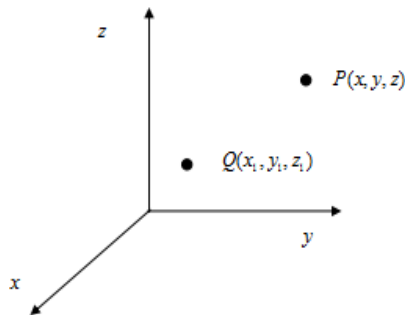


图2 三维点电荷模型

点电荷 Q 到空间点 P 的距离可以由下式计算得到:

$$d = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (10)$$

P 点的电位为:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon d} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}} \quad (11)$$

可知 Q 点电荷的电位系数为:

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}} \quad (12)$$

P 点的电场计算公式如下所示:

$$\begin{aligned} E_{Px} &= -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{x-x_1}{[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \\ E_{Py} &= -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{y-y_1}{[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \\ E_{Pz} &= -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{z-z_1}{[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (13)$$

当整个空间中既存在三维线单元模拟电荷, 又存在三维点电荷时, 空间中任意一点的电场强度, 通过场强的叠加原理, 可以看成是由线单元模拟电荷与点电荷各自在该点的场强的叠加, 即

$$\begin{aligned} E_{Px} &= E_{Px\text{线}} + E_{Px\text{点}} \\ E_{Py} &= E_{Py\text{线}} + E_{Py\text{点}} \\ E_{Pz} &= E_{Pz\text{线}} + E_{Pz\text{点}} \end{aligned} \quad (14)$$

2 计算模型

为了使计算结果具有普遍意义, 本文针对我国常见的 500kV 输电线路模型进行建模, 杆塔模型采用酒杯型杆塔, 导线型号采用 4×LGJ-400/35, 子导线间距为 0.45m, 相间距为 12m, 相导线悬挂高度为 31m。同时, 为了避免实际雨天雨滴大小、雨滴间距等参数的实时变化带来的计算结果特殊性, 本文采用不同半径的三维点电荷模型在空间中有序分布来模拟不同降雨强度的雨天环境。

设线路相电压按三相对称正弦规律变化, 计算采用有效值, 额定线电压 500 kV, 以实际运行考虑, 计算电压取额定电压的 1.05 倍, 即 $U_A=303.1$ kV, $U_B=1.5 \times 10^2 - j2.6 \times 10^2$ kV, $U_C=-1.5 \times 10^2 + j2.6 \times 10^2$ kV。

2.1 输电线路模型

杆塔的实际架构十分复杂, 考虑到本文计算的是距地 1.5m 处的电场, 杆塔顶部的部分结构对其影响基本可以忽略不计, 同时为了兼顾计算量与计算速度, 建模时对杆塔进行如下简化处理:

- 1) 忽略杆塔的次要金属结构、绝缘子串以及固定金具;
- 2) 杆塔金属架构均用线单元模拟电荷模型等效, 中轴线上分布电荷, 匹配点分布在架构表面;
- 3) 对于长金属架构, 采用分段的方法将其分成多段收尾相接的线单元模拟电荷模型。

图 3 为按上述方法简化处理后的数学模型。

本文将杆塔放置于坐标原点处。如图 4 所示, 图中杆塔以直线段示意, H 为杆塔高度, 杆塔两侧的导线分别用悬链线 L_1 和 L_2 表示。

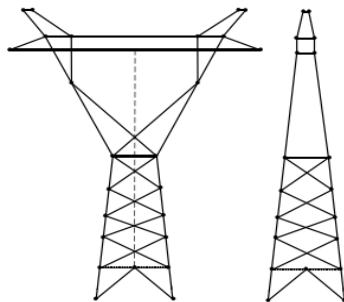


图 3 数学模型

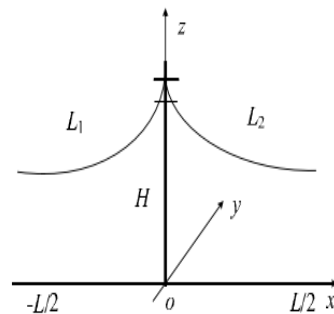


图 4 杆塔附近纵向截面示意图

图4所示架空输电线分为 L_1 、 L_2 两部分，而坐标原点不在档距中央，结合文献[7-8]中悬链线的方程，通过原点平移得到如下两个悬链线方程，分别来表示 L_1 和 L_2 ：

$$z_1 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(ch \frac{\gamma(x+L/2)}{\sigma_0} - 1 \right) + h \quad (-L/2 \leq x \leq 0) \quad (15)$$

$$z_2 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(ch \frac{\gamma(x-L/2)}{\sigma_0} - 1 \right) + h \quad (0 \leq x \leq L/2) \quad (16)$$

式中： γ 为导线比载； σ_0 为导线最低点水平应力； h 为导线最低点对地高度； L 为档距； Z_1 和 Z_2 分别为导线 L_1 和 L_2 上任意一点对地高度。

对于档距内不同相的导线，认为它们服从相同的弧垂变化规律。仅考虑导线自重负载。采用线单元模拟电荷法对所建模型进行计算，计算时将各相导线剖分为多个线单元，线电荷分布在轴线上，并对大地作镜像，匹配点取在线单元的表面。

2.2 雨滴模型

本文计算不同降雨强度雨天的雨滴之间的间距，选取一个空间大小一定的区域，将雨滴均匀、有序的布置在这个区域中模拟雨天环境。

不同降雨强度的雨天，雨滴的大小、数量、间距都会对空间电场产生不同程度的影响。由文献[9]可知，

$$\frac{r}{R} = \frac{t}{T} \left(1 - \ln \frac{t}{T} \right) \quad (17)$$

$$v = \sqrt{3.34 \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1 \right) g D} \quad (18)$$

$$d = 10 \cdot D \sqrt[3]{10 \frac{v_b}{v_a}} \quad (19)$$

式中， T 为一次降雨的总时间； R 为 T 时间段的降雨总量； t 为 T 时间段内的某一时间段； r 为 t 时间段内的降雨总量； ρ_w 为水的密度； ρ_a 为空气的密度； g 为重力加速度； D 为雨滴的直径； d 为雨滴间隔距离； v_b 为收尾速度； v_a 为瞬时降雨强度。

雨滴采用三维点电荷模型，电荷集中于球心，电位匹配点以及电位校验点设置在球形表面。结合表1的数据^[9]和式(17)-(19)，计算得到不同降雨强度等级下雨滴的相关参数如表2所示。

表1 不同降雨等级下雨滴平均尺寸

| 降雨等级 | 降雨强度/(mm/h) | 雨滴的平均直径/mm |
|------|-------------|------------|
| 小雨 | 0.27 | 1.0-1.25 |
| 中雨 | 2.54 | 1.25-1.75 |
| 大雨 | 12.70 | 1.75-2.0 |

表2 不同降雨等级下雨滴的相关参数

| 降雨等级 | 瞬时降雨强度/(mm/min) | 雨滴收尾速度/(m/s) | 雨滴间距/cm |
|------|-----------------|--------------|---------|
| 小雨 | 0.0229 | 5.22 | 13.16 |
| 中雨 | 0.2154 | 5.84 | 8.09 |
| 大雨 | 1.0771 | 6.90 | 7.00 |

3 数值计算结果与分析

3.1 数值算法

针对上述的杆塔模型、架空输电线模型和雨滴模型，结合三维线单元电荷模拟电荷法与三维点电荷模拟电荷法的计算方法，通过Matlab平台进行编程仿真，本文数值算法的流程图如图5所示。

图5所示，首先需要导入各个模型的坐标，接着设置线单元及三维点电荷的模拟电荷、匹配点、校验点的坐标和匹配点电压矩阵，通过 $[V]=[P][Q]$ 矩阵计算，求解各模拟电荷的电量，并通过计算校验点电压矩阵 $[V']$ 来验算所选取的模拟电荷位置是否合适，若校验点计算电压与实际边界电压的误差在合理范围之内，则进一步计算附近距地1.5m处

的电场分布。

3.2 雨天时电场数值计算结果

计算雨天的地面电场时，针对杆塔中央下方以及边相下方，分析这两区域的电场分布在雨天下的变化。

图 6 为晴朗天气下，杆塔中心，距地 1.5m 处 $[x(-1.5, 1.5), y(-1.5, 1.5)]$ 正方形区域的电场分布。图 7 为小雨天气下，杆塔中心，距地 1.5m 处 $[x(-1.5, 1.5), y(-1.5, 1.5)]$ 正方形区域的电场分布。从图 7 中可以发现电场中存在许多小尖峰，说明雨滴的存在使得电场发生了畸变。

图 8 为边相下方距地 1.5m 处，晴天与小雨天气电场分布的比较，从图中可以发现，小雨天气的电场强度曲线低于晴天的曲线，说明小雨的存在导致了这种现象，小雨的存在对其内部的电场存在屏蔽作用。根据静电屏蔽原理，由于小雨空间区域的存在，并且雨水作为导体，其空间区域的内部可以近似的看成是导体的内部，但因为雨滴之间间隙的存在，该空间内部并非是完全封闭的导体内部，因此其对电场存在一定的屏蔽作用，但是并不能完全屏蔽电场。

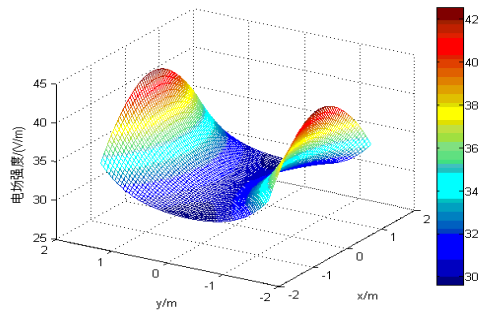


图 6 晴天天气下，杆塔中心距地 1.5m 处三维电场

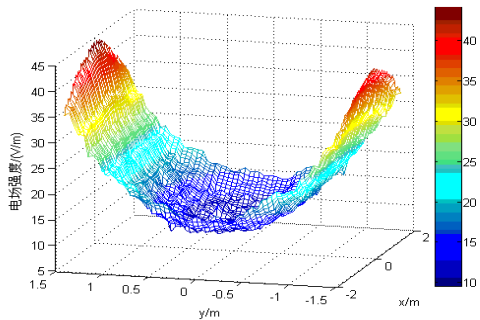


图 7 小雨天气下，杆塔中心距地 1.5m 处三维电场

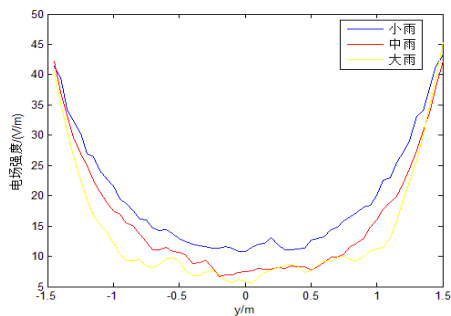


图 9 杆塔中心距地 1.5m 处，不同降雨等级的雨天电场分布比较

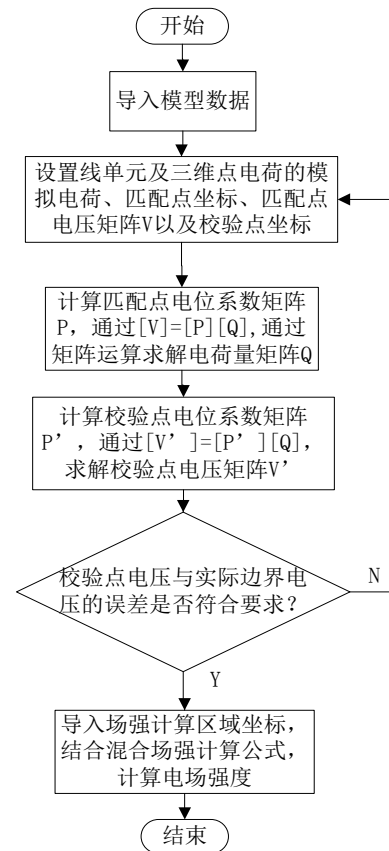


图 5 数值计算流程图

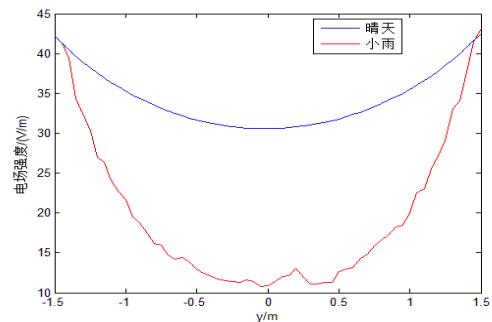


图 8 杆塔中心距地 1.5m 处，晴天与小雨电场分布比较

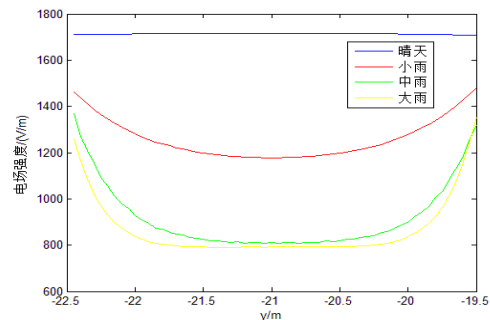


图 10 边相下方距地 1.5m 处，不同气象条下的电场分布比较

图9为杆塔中心距地1.5m处,不同降雨等级的雨天电场分布的比较,图10为边相下方距地1.5m处,不同气象条件下的电场分布比较,从中可以发现,小雨对应的电场分布曲线高于中雨对应的电场分布,高于大雨对应的电场分布,说明大雨对电场的屏蔽作用最强,其次是中雨,最后则是小雨。因为大雨、中雨、小雨在空间分布的密度不同,大雨在空间的分布密度大于中雨和小雨的分布密度,大雨形成的雨滴空间更接近一个整体,所以对电场的屏蔽作用更加明显。

3.3 计算结果比较

表3 无地线、有杆塔、有弧垂模型在不同气象条件下场强比较结果

| 气象条件 | | 计算场强最大值 (V/m) | 计算场强最小值 (V/m) | 我国职业暴露电场强度 (V/m) | 我国公众暴露电场强度 (V/m) |
|------|----|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 晴天 | | 1742 | 28.95 | 5000 | 4000 |
| 雨天 | 小雨 | 1480 | 11.16 | | |
| | 中雨 | 1369 | 6.73 | | |
| | 大雨 | 1355 | 5.41 | | |

通过晴天和雨天的数值计算,并参考国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)制定的关于电磁场暴露限值的导则和标准^[25],相应数据均列于表3。由表3可知,晴天和雨天的最大场强均小于我国职业暴露电场强度以及公众暴露电场强度要求。

4 结论

- 1) 雨滴在空间内有序分布,对周围电场产生了畸变,但是畸变程度不大。
- 2) 雨天对空间电场具有屏蔽作用,随着降雨强度的增强,雨天对电场的屏蔽作用更加明显。
- 3) 对于同一输电线路及其杆塔,晴天时的最大电场强度1742V/m大于小雨时的最大电场强度1480V/m,小雨时的最大电场强度大于中雨时的最大电场强度1369V/m大于大雨时的最大电场强度1355V/m。参考我国对于公众暴露电场强度的安全要求,计算得到的电场强度最大值小于安全值4kV/m,可知雨天的电场环境相对来说是较为安全的。

[参考文献]

[1] Adel Z. El Dein. Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines[J]. Power Delivery, 2013, 29(2): 899-907.

[2] 彭迎,阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.

[3] 倪光正,杨仕友,钱秀英,等. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[4] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.

[5] 彭迎,阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.

[6] 河南省电力公司组. 输电线路基础[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

[7] 孟遂民,孔伟等. 架空输电线路设计[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[8] 刘伟. 降雨对棒-板短空气间隙直流放电影响的仿真及试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.

[9] 舒海莲,杨秀,伟荣,等. 同杆并架多回输电线路工频电场研究[J]. 华东电力, 2010, 38(11): 1721-1724.

[10] 陈楠,文习山,蓝磊,等. 交叉跨越输电导线三维工频电磁场计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1752-1759.

[11] 宗伟,孙才华,隋吉生,等. 多路供电系统高压输电线考虑弧垂的场强计算模型[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 18-21.

[12] 黄道春,阮江军,余世峰,等. 特高压紧凑型输电线路工频电场强度计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 69-71.

[13] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz) [J]. Health Physics, 1998, 74(4): 494-522.

作者简介: 陈健(1991-),男,浙江安吉,研究方向为输电线路电磁环境分析。蒋钟(1985-),男,浙江安吉,从事的工作为供电所管理。姚蕊(1990-),女,浙江安吉,研究方向为小水电站和分布式光伏电站。