

特高压交流输电线路电晕放电对工频电场的影响

黄子璇¹, 席黎明², 樊梦旭¹, 邹 澎¹

(1. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450052; 2. 河南省电力勘测设计院, 郑州 450007)

摘要: 目前, 中国投入运行的交流输电线路中电压等级最高的已达到 1 000 kV, 为了精确计算超/特高压输电线路的工频电场, 笔者基于模拟电荷法, 建立了考虑电晕放电的计算模型。模型中需要计算导线周围离子流场中正负电荷的运动、复合及最终在宏观上达到稳态的过程。空间中任意一点的工频电场由导线内的束缚电荷和空间中的电离电荷共同决定。其创新点在于每根分裂子导线单位长度的电量仅用一个模拟线电荷等效代替。与现有文献中仿真结果的比对验证了文中计算模型的正确性。对 1 000 kV 三相 8 分裂交流输电线路的算例进行仿真计算, 并与测量数据对比分析, 得出电晕放电使地面工频电场增加约 5% 的结论。

关键词: 特高压; 交流输电线路; 模拟电荷法; 电晕放电; 离子流场; 工频电场强度

中图分类号: TM726.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0006-06

Influence of Corona Discharge on Power Frequency Electric Field Underneath UHV AC Transmission Lines

HUANG Zixuan¹, XI Liming², FAN Mengxu¹, ZOU Peng¹

(1. Institute of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: At present, the highest voltage of AC transmission lines in service in China has reached 1 000 kV. To accurately calculate the power frequency electric field of EHV/UHV transmission line, the authors propose a calculation model with consideration of conductor corona discharge on the basis of the charge simulation method (CSM). This model simulates the motion and recombination process of the space line charges in the ion flow field around the conductors in entire cycles until the power loss reaches a steady state. The ground level power frequency electric field is determined by the charges in conductors and surrounding space. The innovation of the model is that the quantity of electricity per unit length of each sub-conductor is simulated by one line charge. Simulation results are compared with the results in literatures to verify the correctness of the proposed model. The electric field on ground underneath 1 000 kV 3-phase 8-bundle AC transmission lines is simulated using this model, and the results are compared with the measured values. Conclusion is drawn that corona discharge leads to about 5% enhancement in the power frequency electric field.

Key words: ultra-high voltage (UHV); AC power transmission lines; charge simulation method (CSM); corona discharge; ion flow field; power frequency electric field

0 引言

特高压指 1 000 kV 及以上的电压。由于特高压

输电具有输电容量大、线损低、适用于远距离传输电能等特点, 符合中国当前电网的发展方向, 因此成为电力领域的研究热点之一。电晕放电是导线表面某一点的电场强度超过临界值(称为起晕场强)时发生

收稿日期: 2013-09-17; 修回日期: 2013-10-21

基金项目: 国家环保部公益性行业科研专项经费资助项目(No.200909106)。

Project Supported by Research Special Funds of National Public Service Sectors(No.200909106).

的气体局部自持放电现象。考虑到经济性, 输电线路通常设计成在正常运行电压下允许有一定程度的电晕放电^[1-2]。

电晕放电会对线路下方的工频电场产生一定程度的影响。目前, 在计算 500 kV 以下(包括 500 kV)输电线路的地面工频电场时通常忽略电晕放电的影响^[3-4], 由于特高压输电线路电压等级高, 电晕放电现象可能更为严重, 因此学术界普遍认为在计算特高压输电线路的地面工频电场时应该计及电晕放电的影响^[5-8]。

国内外众多学者对考虑电晕影响的地面工频电场计算模型做出了研究。Clade J J 等人最早提出了适用于导线布置在屏蔽金属筒中央的对称结构的交流输电电晕损失的计算模型^[9]。Salam 等人提出了适用于线板结构的电晕离子流场计算模型, 并将该模型从单相不分裂导线拓展到三相、六相不分裂导线, 计算了输电线路的工频电场和电晕损失^[10-13]。中国学者的计算模型基本是以 Salam 模型的思想为基础, 做出一定的简化、改进, 如郑亚利模型^[14-15]、李伟模型^[16-17]和张剑模型^[18-20]。这 3 种模型各有优缺点, 计算都得出电晕放电使地面电场强度增大的结论, 增大程度从 5% 到 20% 不等。

文中以 Salam 模型、李伟模型为基础, 基于模拟电荷法, 在每根子导线内仅设置一个模拟线电荷, 建立计算模型, 且将该模型用于工程算例的仿真, 与测量数据进行比较分析。需说明的一点是, 虽然在计算低电压等级的输电线路下方的工频电场时一般不计电晕影响, 但是文中提出的计算模型同样适用。

1 计算方法

由于 1 000 kV 特高压输电线路一般采用 8 分裂导线, 因此笔者在模型的建立和计算中以水平排列的三相 8 分裂导线为例, 其他排列方式和子导线分裂数计算方法相同^[21-22]。分裂导线示意图见图 1。

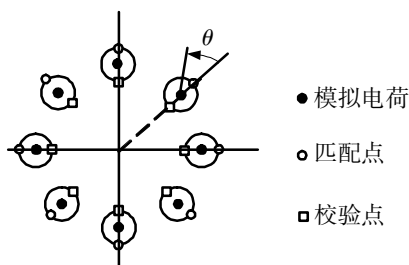


图 1 分裂导线示意图

Fig. 1 Bundle conductor diagram

模型的基本思想是: 每根子导线单位长度的电量用位于其轴心的一个模拟线电荷等效代替, 首先

由皮克公式得到起晕场强, 根据导线表面场强的不均匀性和高斯定理计算起晕电荷。然后, 把一个交流周期划分为若干个时段, 采用模拟电荷法计算当前时刻导线内的模拟电荷。若导线内的模拟电荷超过起晕电荷, 则发生电晕放电, 发射到空间中的电离电荷量为二者之差, 导线内的电荷称束缚电荷, 等于起晕电荷量。每一时刻都要重新计算导线内的模拟电荷, 并判断是否有新的空间电荷产生。空间电荷在电场力的作用下发生迁移、复合, 部分被拉回导线表面中和。计算每个交流周期的功率损失, 经过若干个周期后, 功率损失基本稳定在一个值不变, 说明计算达到稳定。进而在下一周期中可以计算空间中任意一点的电场强度。

1.1 模拟电荷的计算

把一个交流周期(工频 50 Hz)平均分为 N_T 个时段, 则三相导线上的电压为:

$$\begin{aligned} u_a &= \sqrt{2} u_0 \sin[\omega(k-1)\Delta t] & k=1, 2, \dots, N_T; \\ u_b &= \sqrt{2} u_0 \sin[\omega(k-1)\Delta t - 120^\circ] & k=1, 2, \dots, N_T; \\ u_c &= \sqrt{2} u_0 \sin[\omega(k-1)\Delta t + 120^\circ] & k=1, 2, \dots, N_T. \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, u_0 是输电电压的有效值, 每相线路的各分裂子导线电压值相等。

根据“国际大电网会议第 36.01 工作组”的推荐, 采用模拟电荷法计算导线内的模拟电荷^[23]。模拟电荷、匹配点、校验点的位置见图 1。三相导线单位长度的电量由 $3n(n=8)$ 个模拟线电荷等效替代, 构成向量 $Q=[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_{3n}]$, 匹配点位于该相导线的外接圆与各分裂子导线表面的交点处, 构成向量 $U=[u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{3n}]$, 校验点位于与相应子导线匹配点正对的内侧位置。

在未产生空间电荷的第 k 时刻, 第 i 个匹配点的电位可表示为

$$u_i = \sum_{j=1}^{3n} \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r_{ij}'}{r_{ij}}\right) = \sum_{j=1}^{3n} p_{i,j} q_j \quad (2)$$

式(2)中: ϵ_0 是真空中介电常数; r_{ij} 和 r_{ij}' 分别是第 i 个匹配点到线电荷 q_j 及其镜像电荷的距离; $p_{i,j}$ 表示第 i 个匹配点与第 j 个模拟电荷 q_j 间的电位系数。

$3n$ 个匹配点的电位构成如下矩阵形式

$$U=PQ. \quad (3)$$

式(3)中, P 是电位系数矩阵。

解上述方程组, 得到 k 时刻每根子导线上的模拟电荷 q_j ($j=1, 2, \dots, 3n$)。

1.2 起晕电荷的计算

导线表面某一点发生电晕放电的临界场强称为起晕场强。该模型假设, 导线某点发生电晕期间该点

场强维持在起晕场强不变(Kaptzov 假设)。计算起晕场强应采用皮克公式,它是由美国工程师皮克提出的一个经验公式,针对正负电压形式不同的皮克公式为:

$$E_{\text{onset}+} = \delta m_1 m_2 (33.7 + \frac{8.13}{\sqrt{100 r_0 \delta}}) \text{ (kV/cm)}; \quad (4)$$

$$E_{\text{onset}-} = \delta m_1 m_2 (31.0 + \frac{9.55}{\sqrt{100 r_0 \delta}}) \text{ (kV/cm)}. \quad (5)$$

式(4)、(5)中: r_0 为导线半径,cm; δ 为空气的相对密度(在标准大气压和温度为 20 °C 的条件下, $\delta=1$); m_1 为导线表面的粗糙系数,对于表面平滑的非绞合导线, m_1 为 1,否则 $m_1 < 1$; m_2 为气象系数,对于不同天气情况, m_2 约为 0.8~1.0。表面系数 m_1 、 m_2 是经验值,空中降落的物质、新导线上的油脂、金属毛刺以及雨雪天气等都是影响电晕放电的主要因素。

由于相间距远大于分裂半径,故在探讨起晕电荷量时可忽略其余两相导线的影响。对每一相而言,每根子导线的表面电场强度由该相所有子导线的电量共同决定,因此每根子导线表面一周的电场强度是不相等的,位于子导线所围成圆周内侧的场强小,外侧的场强大,满足公式

$$E(\theta) = E_{\text{ave}} [1 + \frac{(n-1)r_0}{R} \cos\theta]. \quad (6)$$

式(6)中: n 为导线分裂数; r_0 为子导线半径; R 为分裂半径; E_{ave} 为子导线表面的平均场强; θ 为子导线表面某一点与子导线轴心的连线与子导线表面场强最大点与子导线轴心的连线间的夹角,见图 1。

子导线表面最外侧首先达到起晕场强($E_{\text{onset}+}$ 或 $E_{\text{onset}-}$),此时子导线表面的平均场强为

$$E_{\text{ave}} = \frac{E_{\text{onset}+}}{[1 + (n-1)r_0/R]}. \quad (7)$$

由于分裂间距远大于子导线半径,故可用高斯定理计算单位长度的起晕电荷

$$q_{\text{onset}\pm} = 2\pi\epsilon_0 E_{\text{ave}} r_0. \quad (8)$$

1.3 空间电荷的运动

每一时刻对每根子导线比较当前电量 q_i ($i=1,2,\dots,3n$)和 $q_{\text{onset}\pm}$ 的大小,若 $q_i > q_{\text{onset}\pm}$,则把超过的部分发射到空间中,称为空间电离电荷

$$q_{\text{si}} = q_i - q_{\text{onset}\pm}. \quad (9)$$

导线自身的束缚电荷变为 $q_{\text{onset}\pm}$ 。

发射到空间中的电荷受到电场力的作用, Δt 时间内发生的位移满足:

$$\Delta x = \mu E_x \Delta t; \quad (10)$$

$$\Delta y = \mu E_y \Delta t. \quad (11)$$

式(10)、(11)中: μ 为离子迁移率,对正、负电荷分别为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; E_x 和 E_y

是该空间电荷所处位置的电场强度,由束缚电荷、束缚电荷的镜像电荷、空间电荷、空间电荷的镜像电荷共同决定。

当导线周围存在空间电荷之后,匹配点的电位方程,即式(2)应修改为

$$u_i = \sum_{j=1}^{3n} p_{i,j} q_j + \sum_{j=1}^{n_s} p_{\text{si},j} q_{\text{sj}}. \quad (12)$$

式(12)中,等号右边第 1 项为导线束缚电荷对匹配点电位的贡献,第 2 项为空间电荷对匹配点电位的贡献(空间电离电荷的数量为 n_s)。

1.4 空间电荷的迁移、复合

空间电荷在电场力的作用下发生迁移,计算表明每相导线产生的空间电荷基本被限制在本相附近几十厘米的范围内。随着电压的周期性变化,与导线极性相同的空间电荷被推离导线,极性相反的被吸引靠近导线。正负电荷在空间中相遇发生复合,电荷密度减小。运动返回导线的电荷在导线表面中和,从计算中删除。这一动态过程经过若干电压周期后达稳定,判定标准是每个周期的功率损失基本稳定在一个值不变。

1.5 计算空间中任一点场强

k 时刻空间中任意一点 p 的场强 $E_p(k)$ 为

$$E_p(k) = \sum_{j=1}^{3n} \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{r_{p,j}}{r_{p,j}^2} - \frac{r_{p,j}'}{r_{p,j}'^2} \right) + \sum_{j=1}^{n_s} \frac{q_{\text{sj}}}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{r_{\text{sp},j}}{r_{\text{sp},j}^2} - \frac{r_{\text{sp},j}'}{r_{\text{sp},j}'^2} \right). \quad (13)$$

式(13)中: $r_{p,j}$ 和 $r_{p,j}'$ 分别是由线电荷 q_j 及其镜像电荷指向场点 p 的单位向量; $r_{\text{sp},j}$ 和 $r_{\text{sp},j}'$ 分别是由空间电荷 q_{sj} 及其镜像电荷指向场点 p 的单位向量; $r_{p,j}$ 和 $r_{p,j}'$ 分别是线电荷 q_j 及其镜像电荷与场点 p 的距离; $r_{\text{sp},j}$ 和 $r_{\text{sp},j}'$ 分别是空间电荷 q_{sj} 及其镜像电荷与场点 p 的距离。

计算一个周期内 p 点场强的瞬时值 $E_p(k)$ ($k=1, 2, \dots, N_T$), p 处的工频场强为一个电压周期内的平均值为

$$E_p = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} E_p^2(k)}. \quad (14)$$

2 与 Salam 三相模型对比验证

文中的计算模型是对 Salam 模型进行改进,并应用到分裂导线,因此能够重现文[11-13]中的仿真结果是模型正确性的一个很好的验证。选取 220 kV 水平三相输电线的算例,导线高度 $H=9.144 \text{ m}$,相间距 $D=6.096 \text{ m}$,导线半径 $R=0.011557 \text{ m}$,表面系数 0.6。计算地面工频电场强度的分布曲线,见图 2。图

3 为文[11]中的计算结果。在文中以下的讨论中, 称不考虑电晕放电的工频电场为标称场, 考虑电晕放电的工频电场为合成场。

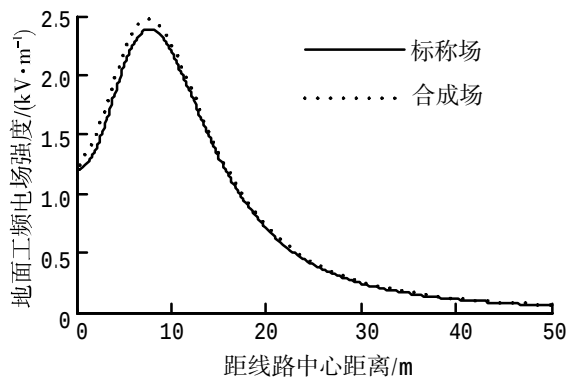


图2 文中计算所得 220 kV 输电线路电场强度分布曲线

Fig. 2 Electric field (RMS value) on ground underneath a 220 kV three-phase line in this paper

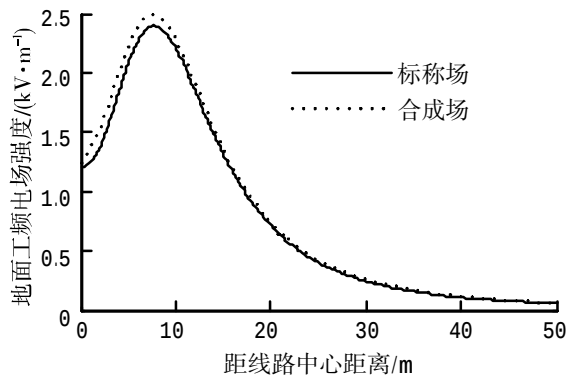


图3 文[11]中 220 kV 输电线路电场强度分布曲线

Fig. 3 Electric field (RMS value) on ground underneath a 220 kV three-phase line in documentation [11]

对比图 2、3 可见, 文中模型计算得到的地面工频电场分布曲线与文献中的吻合度很高, 最大值出现的位置和幅值基本相同, 从而验证了文中模型的正确性。

3 典型工程算例分析

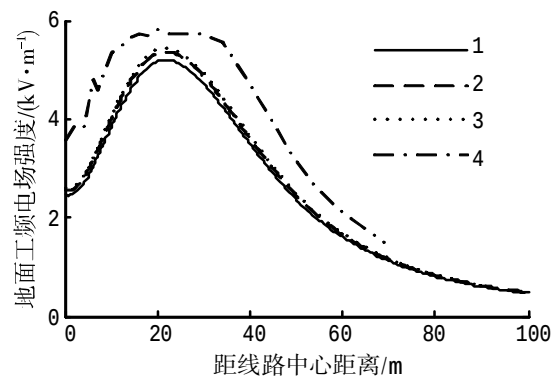
将计算模型应用到实际的 1 000 kV 特高压三相交流输电线路。文中所用算例为晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压交流试验示范工程的一段, 位于河南省偃师市顾县镇顾刘路东王村西约 500 m。

三相导线为正三角形排列, 弧垂最低点坐标 $(-15, 31), (0, 48), (17, 31)$, 单位为 m。相导线采用 8 分裂钢芯铝导线, 分裂间距 0.4 m, 子导线半径 0.015 m。天气情况为晴, 相对湿度为 69%, 风速 1.2 m/s。测量仪器为德国 Narda 公司 NBM-550 电磁辐射分析仪, 探头高度 1.5 m。测量布点间距是 1 m, 运行电压为 1 050 kV。

分别用文中提出的计算模型和适用于三相多分

裂导线的李伟模型对该实例进行计算。使用李伟模型时, 每根分裂子导线内均匀设置 6 个模拟线电荷。李伟模型较文中模型的复杂之处在于: ①文中模型每根子导线只需设置一个模拟线电荷, 李伟模型每根子导线设置若干个模拟线电荷; ②文中模型的起晕电荷由高斯定理得到, 每根子导线都相同, 且假设计算过程中维持不变, 李伟模型需要在每一时段针对每个匹配点重新计算起晕电荷, 计算中还考虑了空间电荷的影响。以上两点使得计算量大幅增加, 计算时间延长。

图 4 是用两种模型计算得到的合成场与标称场、测量数据四者的对比曲线。表 1 是地面工频电场最大值的比较。



1—标称场; 2—合成场(李伟模型);

3—合成场(文中模型); 4—测量值。

图4 工频电场强度计算结果与测量数据对比曲线

Fig. 4 Calculation results and measured data distribution curve

表 1 地面工频电场最大值的比较

Tab. 1 Comparison of the max electrical field of calculated data and measured data kV/m

参数	文中模型	李伟模型	标称场	测量值
最大电场强度	5.437 2	5.361 6	5.189 2	5.792 0

从图 4 中可以看出: ①考虑电晕放电与不考虑电晕放电的曲线分布趋势一致, 电晕放电现象产生的空间电离电荷对地面工频电场有一定的加强作用; ②文中模型较李伟模型得到的曲线略高一些, 即计算所得的电晕影响略大, 但不明显。

表 1 给出了工频电场最大值的比较。与标称场相比, 文中模型得到的地面电场最大值较标称场最大值增大了 4.78%, 李伟模型得到的地面电场最大值较标称场最大值增大了 3.32%, 电晕的影响都不大。

从图 4 中还可以看出, 地面电场计算值远低于实测值, 相差最大处约达到 1 kV/m。分析可能的原因如下: ①测量环境的影响, 由于实地测量是在麦地

中进行的,生长出的作物相当于抬高了地面,等效于降低了导线高度;②仿真中导线的表面系数根据经验确定,所以计算时的起晕场强与线路实际的起晕场强可能不相等;③测量时仪器和读数存在不可避免的误差。

针对提出的第 1 点原因,假设麦苗高度为 0.8 m,相当于三相线路的对地高度降低 0.8 m,测量探头的对地高度为 0.7 m,重新采用文中模型进行计算,得出的数据见表 2。

表 2 地面抬高 0.8 m 地面工频电场最大值的比较

Tab. 2 Comparison of the max electrical field of calculated data and measured data after elevating the ground 0.8 m kV/m

参数	文中模型	标称场	测量值
最大电场强度	5.692 1	5.437 2	5.792 0

从表 2 看出,地面抬高 0.8 m 后,工频电场计算值(标称场和合成场)有所增大,合成场最大值与实测最大值比较接近,电晕放电使地面工频电场最大值增大 4.00%。

4 结论

1)文中提出了一种基于 Salam 模型的计算分裂导线的地面工频电场的计算模型,该模型较李伟模型相比可大幅减少计算量,提升计算速度,仿真结果验证了该模型的正确性;

2)文中计算了 1 000 kV 三相 8 分裂特高压输电线路的地面工频电场,得出了电晕放电使其增加约 5%的结论,并分析了计算值与测量值的差别。

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 隋晓杰,宋守信.高压输电线路电晕放电分析[J].电力建设,2006,27(3):37-38.
SUI Xiaojie, SONG Shouxin. Analysis on corona discharge of HV transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(3): 37-38.
- [3] HJ/T/ 24—1998 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].1998.
HJ/T/ 24—1998 Technical regulations on environmental impact assessment of electromagnetic radiation produced by 500 kV ultrahigh voltage transmission and transfer power engineering[S].1998.
- [4] 封艳彦,俞集辉.超高压架空输电线的工频电场及其影响(一)[J].重庆大学学报,2004,27(4):10-14.
FENG Yanyan, YU Jihui. Power frequency electric field caused by EHV lines and its effect (1) [J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(4): 10-14.
- [5] 陈勇,万启发,霍锋,等.1 000 kV 交流输电线路导线电晕特性[J].高电压技术,2007,33(11):43-45.
CHEN Yong, WAN Qifa, HUO Feng, et al. Corona characteristics of conductors for 1 000 kV AC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 43-45.
- [6] 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.
ZHOU Hao, YU Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [7] 曾庆禹.特高压输电线路电气和电晕特性研究[J].电网技术,2007,31(19):1-8.
ZENG Qingyu. Study on electric characteristic and corona performance of UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 1-8.
- [8] 肖冬萍,何为,谢鹏举,等.高压输电线路电晕放电特性及其电磁辐射场计算[J].电网技术,2007,31(21):52-55.
XIAO Dongping, HE Wei, XIE Pengju, et al. Study on corona characteristics of high voltage transmission line and calculation of its electromagnetic radiation field [J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 52-55.
- [9] CLADE J J, GARY C H, LEFEVRE C A. Calculation of corona losses beyond the critical gradient in alternating voltage [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(5): 695-703.
- [10] ABDEL-SALAM M, SHAMLOUL D. Computation of ion-flow fields of AC coronating wires by charge simulation techniques [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 352-361.
- [11] ABDEL-SALAM M, ABDEL-AZIZ E Z. A charge simulation based method for calculating corona loss on AC power transmission lines [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1994, 27(4): 2570-2579.
- [12] ABDEL-SALAM M, ABDEL-AZIZ E Z. Improved calculation for corona loss on three-phase power transmission lines [C]// Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE. Denver: IEEE, 1994: 1601-1607.
- [13] ABDEL-SALAM M, ABDEL-AZIZ E Z. Corona power loss determination on multi-phase power transmission lines [J]. Electric Power Systems Research, 2001, 58(2): 123-132.
- [14] 程炜,刘黎刚,张艳芳,等.特高压输电线路工频电场的数值仿真研究[J].高压电器,2012,48(2):1-6.
CHENG Wei, LIU Ligang, ZHANG Yanfang, et al. Numerical simulation study on power frequency electric field of UHV AC transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 1-6.
- [15] 郑亚利,俞集辉,汪泉弟,等.电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J].高电压技术,2009,35(4):872-876.
ZHENG Yali, YU Jihui, WANG Quandi, et al. Impact of corona discharge on the power frequency electric field intensity in the extra-high voltage transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 872-876.

- [16] 李 伟, 张 波, 何金良, 等. 超特高压交流输电线路电晕对地面电场的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2288-2294.
LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. Influence of corona effect on ground level electrical field under EHV/UHV AC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2288-2294.
- [17] 李 伟, 张 波, 何金良, 等. 超/特高压交流输电线路电晕损失的数值仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 118-124.
LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. Corona losses calculation of EHV/UHV AC transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 118-124.
- [18] 俞集辉, 张 剑, 张淮清, 等. 交流输电线电晕放电对地面工频电场影响的简便计算方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1228-1233.
YU Jihui, ZHANG Jian, ZHANG Huanqing, et al. Improved method of corona discharge effect on ground frequency electric field on AC transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1228-1233.
- [19] 邢 琳, 刘云鹏, 孙 强, 等. 750 kV 输电线路电晕损失测量技术[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(6): 17-20.
XING Lin, LIU Yunpeng, SUN Qiang, et al. Measurement technology of the corona loss for 750 kV transmission line [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(6): 17-20.
- [20] 万启发, 陈 勇, 谢 梁, 等. 高海拔地区 750 kV 输电工程导线可见电晕试验研究[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(5): 7-9.
WAN Qifa, CHEN Yong, XIE Liang, et al. Experimental study on 750 kV transmission & distribution engineering conductor visible corona in high altitude area [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(5): 7-9.
- [21] 唐 剑, 刘云鹏, 邬 雄, 等. 1 000 kV 特高压交流试验线段无线电干扰阻波器相关问题探讨[J]. 陕西电力, 2008, 36(12): 1-6.
TANG Jian, LIU Yunpeng, WU Xiong, et al. Discussion on radio interference wave trap coil for 1 000 kV UHV AC-testing line [J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(12): 1-6.
- [22] 张 方, 韩俊雅. 1 000 kV 特高压交流输电线路耐张串电位分布计算及均压环优化设计[J]. 陕西电力, 2008, 36(8): 27-31.
ZHANG Fang, HAN Junya. Voltage distribution calculation of tension strands and grading ring optimization design for 1 000 kV UHVAC transmission line [J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(8): 27-31.
- [23] 倪光正, 杨仕友, 邱 捷, 等. 工程电磁场数值计算[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2010.

黄子璇(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电磁场数值计算、电磁环境。

席黎明(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电系统的研究。

樊梦旭(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为广播电视信号发射塔电磁辐射。

邹 澎(1947—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事电磁场与电磁波理论、电磁环境、电波传播、电磁干扰与电磁兼容等方面的研究。

(上接第 5 页)

- [8] OKABE S, TSUBOI T, UETA G, et al. Study of lightning impulse test waveforms for UHV equipment [C]//CIGRE. Paris: CIGRE, 2012: D1-204.
- [9] MIYASHITA M, SHIMIZU Y, KAJIO H, et al. Experiment and examination of long air gap characteristics on positive switching impulse [C]//National Convention of IEEE. [S. l.]: IEEE, 2011: 6-290.
- [10] GÖHLER R, HELBIG D, JAENICKE L R, et al. 1 200 kV AC substations: Full-scale products and integrated solutions [C]//2nd IEC/CIGRE UHV Symposium. Delhi: CIGRE, 2009: 29-30.
- [11] CIGRE Working Group A3.22. Background of technical specifications for substation equipment exceeding 800 kV AC [C]//CIGRE. Brochure: CIGRE, 2011: 456.
- [12] SUN Zhaoying, LIAO Weiming, SU Zhiyi, et al. Test study on the altitude correction factors of air gaps of ± 800 kV UHVDC projects [C]// Proceedings Paper FP0557 of 2009 International Conference on UHV Power Transmission. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-7.
- [13] GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第 1 部分: 一般定义及试验要求[S]. 2011.
GB/T 16927.1—2011 High voltage test techniques Part 1: General definitions and requirements[S]. 2011.
- [14] IEC 60060-1 High voltage test techniques Part 1: General definitions and requirements[S]. 2010.
- [15] GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 2011.
GB/T 11022—2011 Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards[S]. 2011.
- [16] GB 7674—2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 2008.
GB 7674—2008 Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above[S]. 2008.
- [17] CIGRE WG D1.36. Special requirements for dielectric testing of ultra high voltage (UHV) equipment [C]//Recommendations for Standardization of Dielectric Testing of UHV Equipment Exceeding 800 kV, up to and including 1 200 kV. Paris: IEEE, 2012: 77-81.
- [18] 尚振球, 郭文元. 高压电器[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- 张小勇(1974—), 男, 硕士研究生, 从事高电压试验技术研究工作。