

220 kV户内变电站工频电场计算及分析

梁文辉¹, 李永明¹, 何胜鱼², 刘 岩¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 国网万州供电公司, 重庆 404160)

摘要: 研究城市户内气体绝缘变电站 (GIS) 的工频电磁场分布, 对电磁环境评估、防止对设备的电磁干扰有重要的意义。模拟电荷法以其方法简单、实用性强的优点, 在输变电系统的工频电场计算中得到广泛的应用。变电站内电力设备分布集中、形状复杂, 导致变电站中的工频电场计算变得复杂。其中变压器对变电站的工频电场整体分布影响较大。计算结果表明整个变压器室在距离地面 1.5 m 高的平面上工频电场分布在 1.2 ~ 12.5 V/m 之间, 限流电抗器室的 1.5 m 高的电场整体分布在 4.86 ~ 651.88 V/m 之间, 变电站整个户外环境的工频电场分布在 0.9 ~ 20.8 V/m 之间, 计算结果可为在设计阶段优化变电站工频电场分布提供参考。

关键词: 变电站; 变压器; 电抗器; 工频电场; 数值计算

Calculation and analysis of power frequency electric field in 220 kV indoor substation

LIANG Wenhui¹, LI Yongming¹, HE Shengyu², LIU Yan¹

(1. State Key Laboratory of Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State Grid Wanzhou Power Supply Company, Chongqing 404160, China)

Abstract: It is important to study the distribution of power frequency electromagnetic field in urban indoor GIS substation for electromagnetic environment assessment and prevention of electromagnetic interference to equipment. The simulated charge method is still widely used in power frequency electric field calculation of power transmission and transformation system because of its simple method and strong practicability. The centralized distribution and complex shape of power equipment in substation make the calculation of power frequency electric field in substation more complex and difficult. Among them, the transformer has a great influence on the overall distribution of power frequency electric field. The calculation results show that the power frequency electric field of the whole transformer room is 1.2~12.5 V/m on the plane 1.5 m above the ground, the power frequency electric field of the current limiting reactor room is 4.86~651.88 V/m, and the power frequency electric field of the whole outdoor environment of the substation is 0.9~20.8 V/m. The calculation results can provide reference for optimizing the power frequency electric field distribution of the substation in the design stage.

Key words: substation; transformer; power frequency electric field; numerical calculation

0 引言

随着我国电力工业的迅速发展和用电负荷的日益增大,输变电系统的容量越来越高^[1],与此同时,输变电系统的电磁场环境也日益严峻。变电站作为交流输电系统中的变电枢纽,其中的电磁环境问题越来越受到公众的关注^[2-3]。

随着我国城市化的推进,城市用地日益紧缺,城市建筑物之间间距较小。因此,为减小城市用地面积,降低城市中变电站的电磁场以及噪声对周围居民的影响,常采用全户内变电站^[4-6]。虽然全户内变电站降低了其外部环境的工频电磁场强度,但是由于其内部结构紧凑、设备密集,导致电场源及磁场源之间、作业人员工作区域与场源之间距离小,作业人员容易暴露在场强较高的电磁场中^[7-8],因此,对全户内变电站内部工频电磁场分布的计算研究对作业人员的工作环境评价、变电站的设计与建设具有重要意义。

文献[9]采用多偶极子数学模型计算了城市户内变压器周围的磁场水平,与测量结果吻合较好。文献[10]采用COMSOL有限元软件计算钢筋混凝土结构建筑物对工频电磁场的屏蔽能力,计算结果表明,建筑物对磁场的屏蔽可以忽略,对电场起到较好的屏蔽作用。

对于城市户内气体绝缘变电站(Gas Insulated Switchgear, GIS),国内的研究处于现场测量的初步阶段,文献[11]对城市110 kV全户内变电站的工频电磁场大小进行了测量,测量结果表明,变电站围墙外的工频电磁场水平接近环境本底水平。文献[12]对110 kV/220 kV户内变电站的测量结果表明,GIS配电装置比空气绝缘的常规配电装置有更好的工频电磁场屏蔽效果,且变电站中的设备区和配电区是工频电磁场的主要来源。然而对户内变电站的电场分布则鲜有研究。

本文首先针对变电站中的变压器建立了三维简化模型,再对模拟电荷法的电场计算方法进行推导,然后对220 kV户内变电站的变压器室的工

频电场和整个户内变电站外部的电磁环境进行了计算和分析。

1 模拟电荷法

模拟电荷法是根据电磁场的唯一性定理,将连续分布的自由电荷或束缚电荷用位于计算区域之外假设的一组离散化的模拟电荷等效替代,再将各个电荷在计算场点上产生的电场进行叠加,最后可以近似出原来的电荷在计算场点上的电场分布^[13-14]。

在GIS中,由于设备外形复杂,采用其他电荷难以操作,且增加计算量,因此采用点电荷作为设备上的模拟电荷,对于连接导体,则采用线电荷。在三维坐标系下,分别对点电荷与线电荷的电位系数进行推导。

点电荷计算示意图如图1所示。 x 轴代表大地,空间中存在一个大小为 $+q$ 、位于 z 轴的点电荷。考虑大地的影响,应在其关于 x 轴的对称位置设置电荷 $-q$ 。 ρ_1 、 ρ_2 分别为待求场点 P 与 $+q$ 、 $-q$ 之间的距离。

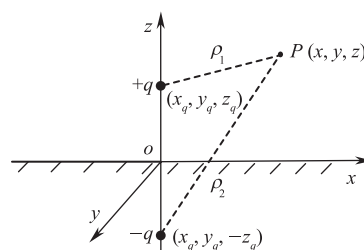


图1 点电荷计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of point charge calculation

点电荷 $+q$ 与 $-q$ 在 P 点形成的电位分别为

$$\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon\rho_1} \quad (1)$$

$$\varphi_2 = -\frac{q}{4\pi\epsilon\rho_2} \quad (2)$$

根据空间坐标关系, ρ_1 与 ρ_2 的值分别为

$$\rho_1 = \sqrt{(x-x_q)^2 + (y-y_q)^2 + (z-z_q)^2} \quad (3)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x-x_q)^2 + (y-y_q)^2 + (z+z_q)^2} \quad (4)$$

根据叠加原理,地面上某点电荷 $+q$ 在空间中任一点 $P(x, y, z)$ 产生的电位为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (5)$$

因此, 电位系数为

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (6)$$

在对输电导线的三维电场计算中, 为了更加接近实际的模型, 需要用到线电荷。将导线剖分为1段线电荷单元, 假设某个线电荷单元的长度为 L , 其在空间中的示意图如图2所示。

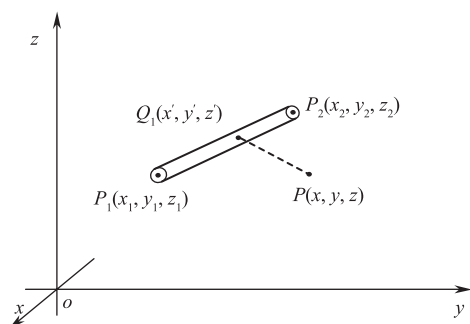


图2 线电荷计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of line charge calculation

线电荷的端点坐标分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 与 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $Q(x', y', z')$ 为其内部任一点的坐标, 若将其用端点坐标表示, 则可得

$$x(u) = x_1 + \frac{l}{L}u, y(u) = y_1 + \frac{m}{L}u, z(u) = z_1 + \frac{n}{L}u \quad (7)$$

式中, u 的取值范围为 $0 \leq u \leq L$; $l = x_2 - x_1$; $m = y_2 - y_1$; $n = z_2 - z_1$ 。

若设单元线电荷两端的电荷密度分别为 $\tau(0) = \tau_1$, $\tau(L) = \tau_2$, 则线电荷任一点上的电荷密度为

$$\tau(u) = \tau_1 + \frac{\tau_2 - \tau_1}{L}u \quad (8)$$

此线电荷单元在点 P 产生的电位为

$$\varphi = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\tau(u)}{D} du \quad (9)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数; D 为场点到源点之间的距离, 其大小为

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

将式(7)、式(8)代入式(9), 化简后可得

$$\varphi = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{At + B}{\sqrt{Et^2 + Ft + G}} dt \quad (11)$$

式中, $A = \tau_2 - \tau_1$; $B = \tau_1$; $E = l^2 + m^2 + n^2$; $F = -2\{l(x_2 - x_1) + m(y_2 - y_1) + n(z_2 - z_1)\}$; $G = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$ 。

将单元线电荷两端的电荷密度 $\tau(0)$ 、 $\tau(L)$ 代入, 求得电位系数为

$$\begin{aligned} \varphi_p = & \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2E + F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F + 2E + 2\sqrt{E(E + F + G)}}{F + 2\sqrt{EG}} \right) - \right. \\ & \left. \frac{1}{E} (\sqrt{E + F + G} - \sqrt{G}) \right\} \tau_1 + \\ & \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{-F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F + 2E + 2\sqrt{E(E + F + G)}}{F + 2\sqrt{EG}} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{E} (\sqrt{E + F + G} - \sqrt{G}) \right\} \tau_2 \end{aligned} \quad (12)$$

匹配点选取在导线表面, 电位已知。要求每个线性单元在匹配点产生电位系数, 建立如下方程

$$[P_i][\tau] = [\varphi_i] \quad (13)$$

式中, $[P_i]$ 为线电荷的电位系数矩阵; $[\tau]$ 为未知的模拟线电荷列向量; $[\varphi_i]$ 为匹配点电位, 也是列向量。

由此, 可求出空间中任一点的工频电场强度, 若将电场强度沿 x 、 y 、 z 三个方向拆分, 则可得三个方向的电场强度分别为

$$\begin{aligned} E_{px} = & -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At + B)(x - x_1 - lt)}{(\sqrt{Et^2 + Ft + G})^3} dt \\ E_{py} = & -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At + B)(y - y_1 - mt)}{(\sqrt{Et^2 + Ft + G})^3} dt \\ E_{pz} = & -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At + B)(z - z_1 - nt)}{(\sqrt{Et^2 + Ft + G})^3} dt \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $F' = -2\{l(x - x_1) + m(y - y_1) + n(z - z_1)\}$; $G' = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2$ 。

电场强度为

$$E = \sqrt{E_{px}^2 + E_{py}^2 + E_{pz}^2} \quad (15)$$

2 户内变电站主要设备建模及工频电场计算

2.1 变压器室建模

由于户内变电站占地面积小，布置紧凑，宜采用小型化设备。现有的220 kV户内变电站多采用三相一体式油浸式变压器。考虑到通风、散热以及降低噪声的要求，将变压器与散热器分开布置，散热器室不存在裸导线，又与变压器室分离，因此散热器室电磁场水平接近于环境电磁场，仅对变压器室中的工频电场进行计算研究。

变压器220 kV侧和GIS设备之间的连接主要有空气套管连接、电缆连接和油-气套管连接三种形式^[11]。空气套管连接是常规变电站中最常用的形式，变压器绕组通过油纸电容式套管或陶瓷充油套管出线，出线端直接连接到GIS套管内，或通过铜排连接到电缆终端。对于电缆连接，变压器高压侧绕组通过浸泡于变压器油中的电容式套管出线，再用导线棒引出到电缆终端的接线板上，电缆终端与变压器出线套管中充入变压器油，将导线与空气隔离，形成一个独立的绝缘系统。对于油-气套管连接，变压器绕组通过油纸电容式套管出线，然后与GIS套管连接，导体处于全封闭的GIS室内。

对于变压器220 kV出线侧和110 kV出线侧则采用没有屏蔽的软导线。

整个变压器室如图3和图4所示。整体长×宽×高为18 m×15 m×24 m，变压器主体大小为9 m×12 m×4 m，位于变压器室的正中间，220 kV导线从建筑物顶部进入，与变压器220 kV套管连接，导线高出变压器顶面10.5 m，三相导线之间间距2.5 m，水平导线长度为10.2 m，竖直导线长为9.5 m；110 kV导线从建筑物顶部进入，与变压器110 kV套管连接，导线高出变压器顶面1 m，三相导线之间间距1.5 m，水平导线长度为4.5 m，竖直导线长为0.8 m；图4中右边从下往上依次为A、B、C相，导线穿过墙壁连接到限流电抗器，其出线套管几何尺寸小，对整体电场的影响可以忽略；变压器油枕为半径0.65 m，

长4 m的圆柱，其圆心高于地面6 m。



图3 变压器室俯视图

Fig. 3 Top view of transformer room

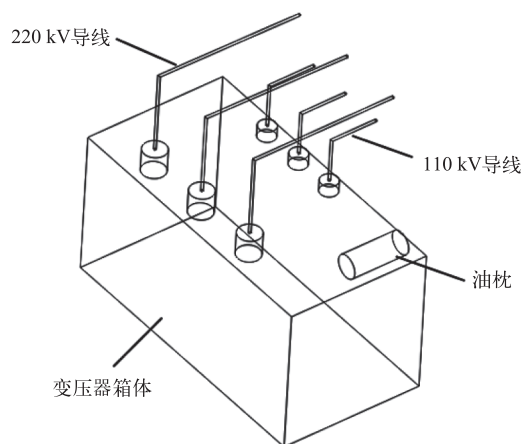


图4 变压器室内部三维结构

Fig. 4 Three dimensional indoor structure of transformer

2.2 变压器室工频电场计算结果及分析

为研究变压器室中设备对变压器室整体电场的影响，对变压器室模型进行简化，只考虑220 kV出线、110 kV出线以及变压器主体模型，然后对简化模型1.5 m高的电场进行计算，计算结果如图5所示。

场强较大值主要在输电导线下方，220 kV导线A、C相下方的场强较大。B相下方的电场由于叠加作用，数值较小；110 kV导线A、C相下方的场强较大，B相下方的电场由于叠加作用，数值较小。墙壁对电场有显著的降低作用，电场强度从变压器室任意位置到墙壁逐渐减小。整个变

压器室的电场强度较小,远低于标准要求的工频电场职业暴露限值5 kV/m。

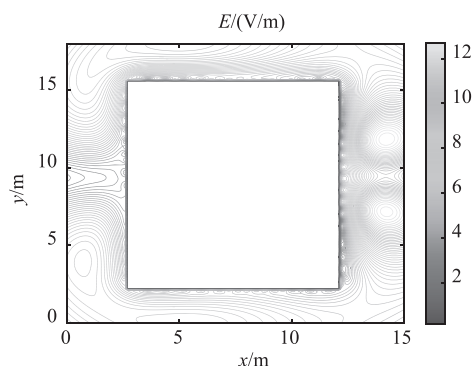


图5 变压器室电场分布

Fig. 5 Electric field distribution in transformer room

2.3 限流电抗器室建模

限流电抗器接在户内变电站中主变压器的低压侧,用来限制变电站发生短路故障时的短路电流、变压器中产生的合闸涌流和高次谐波等。由于干式空心电抗器结构简单,维护方便,线性度高,户内变电站中多选择其作为限流电抗器。干式空心电抗器主要由电抗器本体与支撑结构构成,磁路为空气,绕组由多条并联的铝制线圈制成,并用环氧树脂浸透的玻璃纤维进行包封,电抗器线圈的上下端用铝制星形架固定。支撑结构与电抗器绝缘由瓷或水泥等材料构成。

限流电抗器室的进线由变压器室的低压侧引出,联络导线为没有屏蔽的软导线,采用电缆出线,通过电缆通道连接到10 kV开关设备,电抗器本体品字形布置,共4个限流电抗器组。其中一组的限流电抗器模型如图6所示。

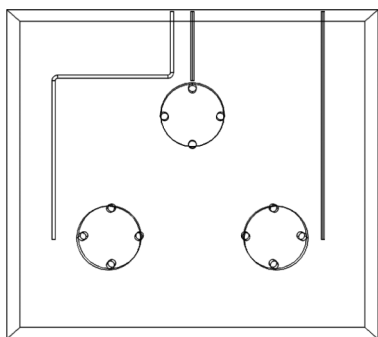


图6 限流电抗器俯视图

Fig. 6 Top view of current limiting reactor

整个电抗器室如图7所示,长×宽×高为9 m×8 m×5 m,电抗器主体呈品字形排列,为高1 m、半径0.8 m的圆柱体。A相中心位置为 $x=4.5$ m, $y=5.5$ m; B相中心位置为 $x=2.4$ m, $y=2.4$ m; C相中心位置为 $x=6.6$ m, $y=2.4$ m。三相进线高4.3 m,半径为0.02 m;每相电抗器下方有四个圆柱形的接地支柱,高1.3 m,直径0.2 m。

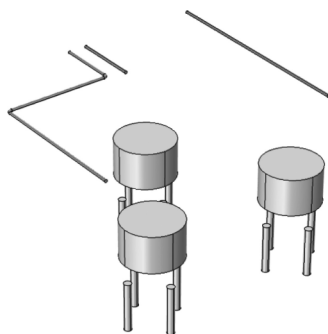


图7 限流电抗器内部结构图

Fig. 7 Internal structure diagram of current limiting reactor

2.4 限流电抗器室计算结果及分析

电抗器进线的电压为10 kV,电抗器本体、接地支柱及墙壁的电位均为零电位。用模拟电荷法对电抗器室内1.5 m高处的电场分布进行计算。在设备与外墙上设置5 299个校验点,线路上设置156个校验点,与匹配点的个数一致。得到的限流电抗器室1.5 m高处的电场分布如图8所示。

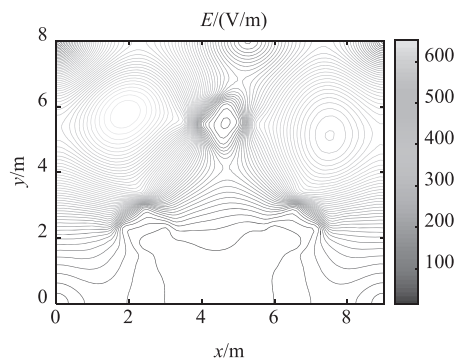


图8 限流电抗器室电场计算结果

Fig. 8 Electric field calculation results of current limiting reactor chamber

由图8可知,限流电抗器室的1.5 m高的电场整体分布在4.86~651.88 V/m之间,其数值整体

较小,但由于接地体的数量及体积较少,因此整体电场高于变压器室。线路下方的电场分布较大,最大值处于A相下方,这是由于A相进线为折线,造成了同相电场的相加;其次为C相下方;B相下方电场由于三相电场的叠加作用,其值较小。电抗器下方电场较小,说明电抗器本体对电场具有一定的屏蔽作用。电场靠近墙壁逐渐减小,说明墙壁对电场有一定的降低作用。

3 有效性验证

为验证本文建模方法和计算方法的有效性,在变电站变压器室选取不同的20个点进行测量,将工频电场计算结果与实测值进行对比,如图9所示。由图9可以看出,本文的工频电场计算结果与实测值吻合较好,说明本文的模型建立方法与计算方法能有效地分析户内变电站内外工频电场的分布情况。

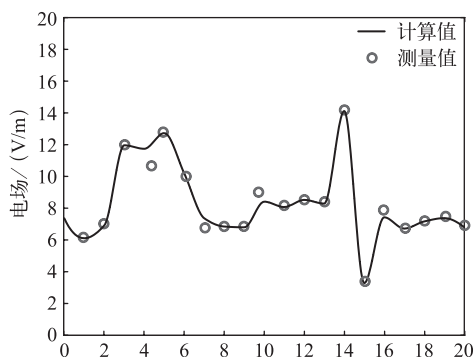


图9 变压器室1.5 m高处的工频电场计算结果与实测值

Fig. 9 Calculation results and measured values of power frequency electric field at 1.5 m height of transformer room

4 结束语

本文对220 kV 变电站内主要大型电力设备、变压器室、电抗器室以及周边工频电场分布进行仿真计算分析,分别建立了相应的简化计算模型,再将模拟电荷法应用在工频电场的计算中。计算结果表明整个变压器室在距离地面1.5 m高的平面上工频电场分布在1.2~12.5 V之间,限流电抗器室的1.5 m高的电场整体分布在4.86~651.88 V/m之间,变电站整个户外环境的工频电场分布在0.9~20.8 V之间,均没有超过我国

工频电场公众暴露限值。

本文的研究结果可为变电站的设计人员在工程设计阶段优化变电站的电场分布提供参考,也可为优化变电站工作人员的巡检路径提供参考。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 2019年电力统计年快报基本数据一览表[EB/OL].
- [2] 张波, 何金良, 刘吉克, 等. 云数据中心与高压变电站共站时的工频磁场环境特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3812-3820.
- [3] 罗佳祺. 变电站复杂电磁环境对短距离无线通信性能以及人脑 SAR 影响研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [4] 张蓉. 城市全户内变电站建筑设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [5] 夏泉, 杨然静. 城市户内变电站设计建设与发展趋势[J]. 电力勘测设计, 2018(增刊2): 24-28.
- [6] 陈宝才, 吴慧体, 许明发. 城区中全户内变电站电磁辐射环境影响分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(2): 182-185.
- [7] 江世雄. 不同类型典型变电站工频电磁场强度分布特征研究[J]. 价值工程, 2018, 37(12): 188-190.
- [8] ROZOV V Y, PELEVIN D Y, PIELIEVINA K D. external magnetic field of urban transformer Substations and methods of its normalization[J]. Electrical Engineering & Electromechanics, 2017(5).
- [9] VOLODYMYR ROZOV, VOLODYMYR GRINCHENKO. Electromagnetic field in buildings closed to overhead lines[C] 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017.
- [10] 张光明. 全户内变电站主变压器与GIS连接方法研究[J]. 山东电力, 2017, 44(9): 39-42.
- [11] 李永明, 罗鹏, 徐禄文, 等. 变电站内建筑物工频电场仿真分析与优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 294-299.
- [12] 徐禄文, 罗鹏, 邹岸新, 等. 基于模拟电荷法的

- 变电站工频电场仿真分析[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 27-31.
- [13] 彭迎, 阮江军, 等. 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.
- [14] 罗鹏, 杨峰, 周君杰, 等. 500 kV超高压变电站整体工频电场仿真计算与测量分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 67-73.
- [15] 李永明, 周悦, 刘哲, 等. 超高压输电线路在复杂场景下工频电场的分区域算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 162-166.
- [16] 李永明, 罗鹏, 徐禄文, 等. 基于矩量法的变电站工频磁场建模与计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4232-4238.
- [17] 李永明, 范与舟, 徐禄文. 超高压输电线路铁塔附近地面工频电场仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 782-787.
- [18] 杜志叶, 干喆渊, 阮江军, 等. 基于3D模拟电荷法的变电站工频电场计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2587-2593.
- [19] 李永明, 汪小莞, 杨勃, 等. 粒子群优化模拟电荷法在HGIS工频电场计算中的应用[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2021-08-11].
- [20] 潘超, 谌骏哲, 刘士利. 三维边界元法计算变电站空间工频电场环境[J]. 电测与仪表, 2017, 54(13): 44-48.
-
- ### 作者简介
- 梁文辉（1996—），男，硕士研究生，研究方向为电磁场数值计算、电磁场仿真等。
- 李永明（1964—），男，博士，副教授，研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容及环境保护等。
- 何胜鱼（1996—），女，硕士研究生，研究方向为数值计算及输变电系统电磁环境等。
- （收稿日期：2021-12-25）