

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.024

±800 kV 特高压直流输电线路带电作业电位转移特性分析

李智琦¹, 罗日成¹, 李 稳², 周晨梦¹, 史志强³, 郑云龙¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 长沙 410018; 3. 国网山东省电力公司检修公司, 济南 250000)

摘要: 为保障进行±800 kV 输电线路带电作业人员的人身安全, 对带电作业人员电位转移特性的研究有助于制定合适的安全防护措施。通过建立作业人员进行电位转移过程中基于流体动力学的棒—板间隙放电模型, 仿真得到了人与导线间的空气间隙电场强度变化特性, 计算了转移过程中的暂态能量, 分析了转移距离为0.3~0.6 m时电位转移能量数值的分布特点。结果表明, 不同转移距离下的转移能量均在1.0 J附近, 随着转移距离的增大, 转移能量有所增加, 而转移能量高于1.0 J时, 导电手套存在被烧蚀的风险, 因此作业人员进行±800 kV 输电线路带电作业电位转移宜使用电位转移棒进行电位转移, 确保作业人员的人身安全。

关键词: ±800 kV; 带电作业; 电位转移; 流体力学模型; 电场计算; 暂态能量

Analysis of Potential Shift Characteristics of Live Working on ±800 kV UHVDC Transmission Line

LI Zhiqi¹, LUO Richeng¹, LI Wen², ZHOU Chenmeng¹, SHI Zhiqiang³, ZHENG Yunlong¹

(1. School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410018, China; 3. Maintenance Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China)

Abstract: In order to ensure the safety of workers while live working on ±800 kV transmission line, the analysis of the potential transfer characteristics is helpful to take appropriate safety protection for operating personnel. By establishing the model of the rod-plate gap discharge based on hydrodynamics theory during the process of potential transfer, the electric field intensity of the air gap between the worker and the transmission lines is acquired, the transient energy during potential shift is calculated, and the value of potential transfer energy distribution characteristics is analyzed while the transfer distance changed from 0.3 m to 0.6 m. The results show that the transfer energy under different transfer distances is around 1.0 J, and the transfer energy increases with the increase of transfer distance. When the transfer energy is higher than 1.0 J the conductive gloves have the risk of being ablated. Thus, to protect the operating personnel, a potential, transfer rod is required when transferring to the live conductor of the ±800 kV transmission line.

Key words: ±800 kV; live working; potential shift; hydrodynamic model; electric field calculation; transient energy

0 引言

输电线路带电作业是对输电线路进行维护和检修的一种重要方法, 也是保证电力系统稳定运行的主要措施^[1]。电位转移是带电作业的重要环节,

它是指作业人员通过导电手套或其他工具在距离带电体一定距离时迅速进入或者退出等电位的过程。电位转移过程中, 由于人与导线间的电场畸变, 空气间隙会出现放电现象, 形成的脉冲电流和暂态能量非常高, 若防护不当会影响作业人员的安

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2020-02-15

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(15C0031)。

Project Supported by Scientific Research Foundation of Hunan Provincial Education Department(15C0031).

全作业^[2]。为有效保障带电作业人员的人身安全,在进行带电作业安全防护时,电位转移特性分析是需要考虑的重要内容。

国内外学者对电位转移特性开展了相关研究:文[1-3]基于集总电容矩阵理论,建立了暂态响应计算模型,利用仿真软件计算得到了电位转移过程中的人体电位和暂态能量值及变化特点等,并将转移电流计算值与试验测量结果进行了比较。文[4]利用集总电容计算模型计算不同电压等级下的转移能量值,同时进行了导电手套的烧蚀试验,分析了电位转移能量特性。利用集总参数等效电路对作业人员与导线间的空气间隙放电特性进行分析,仅能计算得到特性参数的幅值变化,未体现出电位转移放电过程中发生的微观物理变化过程。空气放电的本质是带电粒子与中性空气分子(原子)、分子(原子)团簇等基本粒子之间,以及这些粒子与电极表面相互碰撞作用的结果^[5]。作业人员进行电位转移时,人与导线间的间隙放电过程包含了一系列的物理变化,通过建立基于流注放电理论的流体力学模型并进行数值计算可以从宏观和微观结合的角度反映放电的发展过程。

文中利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立 ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业人员进行电位转移时的间隙放电模型,通过求解基于流体力学的带电粒子连续性方程和描述电位分布的泊松方程,计算得到电位转移过程中电场强度、转移能量等参数值,对电位转移特性进行分析,为研究带电作业电位转移技术提供参考。

1 物理仿真模型

1.1 可行性分析

带电作业电位转移过程中会产生放电电弧,现场图见图 1。由于人与导线间的电场产生畸变,当电位转移距离较小时,作业人员导电手套或者手持的电位转移棒尖端处会出现放电现象,并在极短时间内由流注放电发展为电弧放电。这一过程产生的暂态能量会威胁作业人员的人身安全。带电作业人员在距离导线 0.5 m 左右处进行电位转移时都会发生放电现象^[1]。此时的空气间隙可以近似认为是棒—板间隙,放电过程是流注放电发展的过程,可以利用基于流体力学的流注放电理论模型进行分析。

1.2 模型建立

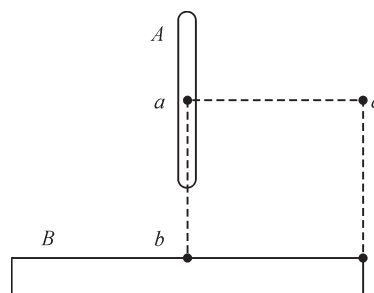
± 800 kV 特高压直流输电线路采用的是六分裂导线,在计算过程中为提高计算速度可用等效半径



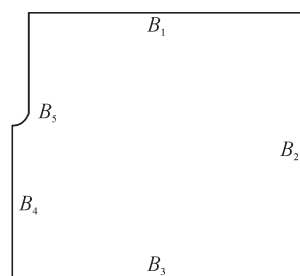
图1 输电线路进入等电位时的放电图

Fig. 1 Discharge of entering the potential transmission line

的导线来代替。电位转移时人与导线之间的间隙可等效为棒—板间隙,其中棒模型即为电位转移棒或者是作业人员带电手套的手指尖端,板模型则为等效半径的导线近人体侧的外表面。计算过程中假定间隙放电为单流注放电过程,棒—板间隙放电的整体模型效果图见图 2(a)。为简化计算模型,提高计算效率,仿真过程中建立的模型为 2D 旋转轴对称模型,计算区域见图 2(b), B_4 为对称轴。其中,棒电极的长度为 0.4 m,直径 4 mm,棒头为半圆,曲率半径为 1 mm。空气间隙的长度可以根据要求在 0.3~0.6 m 进行变更。



(a) 模型整体图



(b) 模型计算区域

图2 棒—板间隙放电模型

Fig. 2 Discharge model of rod-plane gap

1.3 连续性方程

根据气体放电流注理论^[5],空气间隙放电分析模型耦合了流体力学连续性方程和电场泊松方程,前者描述的是电场作用下粒子的连续性变化;后者则用于体现粒子分布对整个间隙电场分布的影响,方程为:

$$\frac{\partial n_x}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_x = S_x \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_x &= n_x u_x E - D_x \nabla n_x \\ \nabla^2 \varphi &= -\frac{(n_+ - n_- - n_e) \cdot e}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (2) \quad (3)$$

式(1)–(3)中: x 是3种不同的带电粒子(正离子 $+$, 负离子 $-$, 电子 e); n_x 是3种粒子的体积分数; Γ_x 为粒子的通量; S_x 为源项; u_x 为各带电粒子在电场中的迁移率; D_x 为扩散系数; E 代表电场强度。式(3)中, φ 为间隙的电势, e 和 ϵ_0 分别为电子电量和真空介电常数。

对于不同粒子,源项 S_x 的计算公式为:

$$\begin{aligned} S_e &= \alpha n_e |V_e| - \eta n_e - \beta_{ep} n_e n_+ \\ S_+ &= \alpha n_+ |V_e| - \beta_{np} n_+ n_e - \beta_{ep} n_e n_+ \\ S_- &= \eta n_- |V_e| - \beta_{np} n_- n_+ \end{aligned} \quad (4) \quad (5) \quad (6)$$

式(4)–(6)中, V_e , α , β_{ep} , β_{np} , η 分别表示电子的漂移速度,电子碰撞电离系数,电子—正离子复合系数,正负离子复合系数和电子的附着系数。

上述连续性方程描述了带电粒子由于畸变电场的影响,在空间中的产生、扩散、复合过程。其中,式(1)等号左侧基于流体力学中漂移—扩散模型描述了带电粒子的漂移和扩散现象,等号右侧源项 S_x 描述的是带电粒子在空间中的产生、扩散、复合过程;式(3)描述了由带电粒子的浓度分布对间隙电场强度分布的影响。以上方程中各输运参数值的选取参考了Morrow等人的研究成果^[6–8],见表1。由于电子的扩散现象相对于电子在电场中的漂移完全可以忽略,因此计算中只考虑离子的扩散系数 D_x 和 D_- ^[9]。

表1 输运参数

参数	数值
$u_+/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2.0×10^{-4}
$u_-(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2.2×10^{-4}
$u_e/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2.0×10^{-2}
α/m^{-1}	$3.5 \times 10^5 \exp(-1.65 \times 10^3 E^1)$
η/m^{-1}	$1\,500 \exp(-2.50 \times 10^2 E^1)$
$\beta_{ep}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.0×10^{-13}
$\beta_{np}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.0×10^{-13}
$D_+/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.18
$D_-/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.18

1.4 边界条件

为得到确定的解,需设置相关的边界条件对方程组进行约束,从而在有限区域内得到近似解^[10–11]。对于本模型,边界条件的设置见表2。 φ_r 和 φ_p 分别表示棒极和板极的电势,计算模型定义棒极为正极,板极为负极,因此 φ_p 取值为 -800 kV ,而棒极电势的定义随转移距离的变化而不同; n 为边界法向量。

表2 边界条件

变量	B_3	B_5	B_1, B_2
φ	$\varphi = \varphi_r$	$\varphi = \varphi_p$	$n \nabla \varphi = 0$
n_x	$-n \cdot D_x \nabla n_x = 0$	$-n \cdot D_x \nabla n_x = 0$	$-n \cdot \Gamma_x = 0$

为了避免在求解对流—扩散问题过程中产生的局部数值振荡问题,本模型添加了仿真软件中提供的人工各向异性流线扩散和侧风扩散数值稳定方法,确保高浓度梯度区域计算稳定^[12]。

2 结果及分析

文中使用仿真软件中的偏微分方程模块进行求解,对计算区域进行自动网格剖分,并对放电发展区域进行了网格加密处理,总共剖分出190 840个三角形单元,最小单元质量为0.659 9,平均单元质量0.978 3。网格单元质量是衡量划分的网格好坏的评价参数,最好的质量是1。

2.1 空气间隙电场分布

由于棒极和板极存在较高电势差,棒极的曲率半径很小,棒极周围的电场发生畸变^[13],电极周围电离出大量的带电粒子,电子在电场的作用下沿电场反向运动,由于正离子的迁移率较电子低2个数量级,电离区域的正离子浓度升高,形成正流注放电并随时间向板极发展,间隙电场随此而变化。空气间隙的轴向电场强度分布二维截面图和曲线图见图3、4(以0.5 m的转移距离为例)。

电场强度的变化反映出空气间隙流注发展的动态过程^[14–15]。由于流注头部电离区域正离子的聚集,电场强度在流注头部达到最大值,同时由于电离作用不断的发生,流注由棒极向板极发展。头部场强由于不断向板极堆积的正离子和电子形成的内部场而减小,场致电离作用因此减弱。当间隙快被击穿时,由于到达板极附近的正离子浓度逐渐增加,此处的正离子和板极形成的内部电场使得该区域的电场得到加强。根据电场强度变化可以看出流注头部的位置,经过约114 ns的时间发展到板极附近,此时可近似认为流注放电发展为贯穿整个间隙。不同间隙距离下,流注发展的时间和速率见表3。转移距离增加,流注发展到板极的时间略有增加,同时发展速率有所加快。

2.2 转移能量分析

电位转移过程中的间隙放电伴随着能量的释放,释放的能量大小是作业人员人身安全的一个重要评价因素,过高的能量可能烧蚀作业人员佩戴的

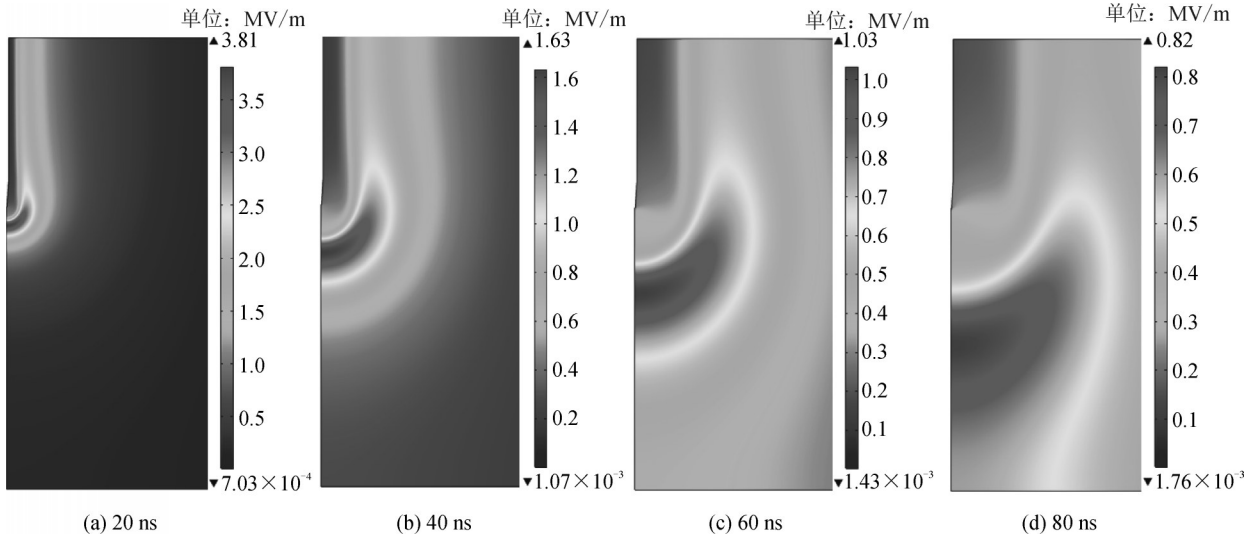


图3 轴截面电场强度分布

Fig. 3 Electric field distribution over axial cross-section

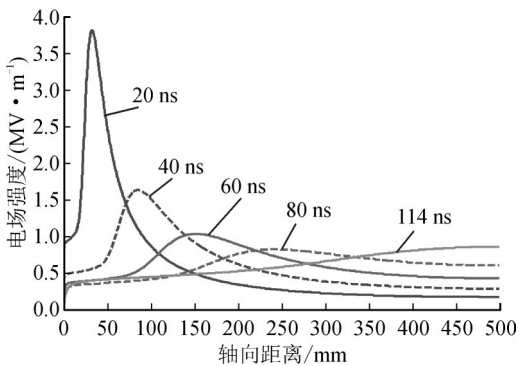


图4 轴向电场强度时间变化曲线

Fig. 4 Longitudinal electric field distribution

表3 不同空气间隙距离流注发展速率

Table 3 Streamer propagation average velocity of different air gap

间隙距离/m	贯穿间隙时间/ns	发展速率/(m·s ⁻¹)
0.3	94	3.19×10 ⁶
0.4	105	3.81×10 ⁶
0.5	114	4.38×10 ⁶
0.6	122	4.92×10 ⁶

导电手套或屏蔽服^[4]。适用于带电作业电位转移过程中放电系统产生的能量计算公式可用式(7)得出

$$W = \int_0^T ui(t)dt \tag{7}$$

式(7)中: u 为棒极和板极间的电势差; $i(t)$ 为流入棒极的电流,与棒极表面的电流密度有关,电流密度与电场强度的大小有关,并由软件自带的积分计算模块自动计算得到,计算公式为:

$$J(t) = e(n_+u_+ - n_-u_- - n_eu_e)E \tag{8}$$

$$i(t) = \iint_S J(t)ds \tag{9}$$

式(8)、(9)中: $J(t)$ 为棒极表面电流密度; E 为棒极

表面电场强度; S 为棒极表面有效计算面积。

电位转移点距离输电导线的位置不同,产生的脉冲电流和暂态能量的大小也不同。电位转移距离的选取一般视综合情况而定,通常取0.4~0.5 m^[16-18]。文中计算了0.3~0.6 m不同转移距离下的能量大小,计算结果见图5。

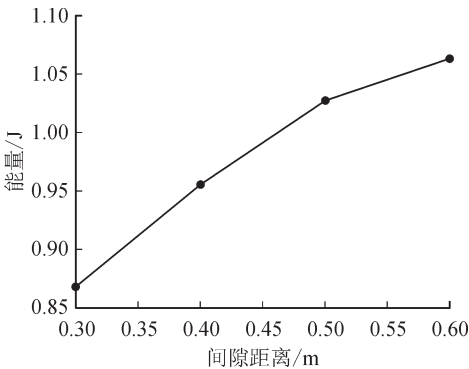


图5 不同转移距离下的能量

Fig. 5 Energy of different transfer distance

由图5可知,本模型计算得到的不同转移距离下释放的能量均在1.0 J附近,随着转移距离的增大,释放的能量有所增加。当转移距离大于0.5 m时,转移能量已大于1.0 J。由于转移距离的增加,间隙间的电势差越大,因此计算得到的能量越高。而流注放电贯穿间隙时,转移至等电位过程仍未完全完成,转移能量势必增加,大于图5的计算结果。

文[4]中的试验结果表明,当电位转移时作用于导电手套的暂态能量达到1.0 J,导电手套可能会被烧蚀,转移电流由此流入人体,会危害作业人员的安全。在电位转移过程中,手持电位转移棒进行电位转移时,放电发展形成的弧根在转移棒上,避免了导电手套被烧蚀。因此,在 ± 800 kV 输电线

路上进行带电作业时,作业人员宜持电位转移棒进行电位转移,防止导电手套被烧蚀,导致转移电流流入人体造成伤害^[19~20]。

3 结论

文中构建出一种应用于特高压直流输电线路带电作业电位转移过程的空气间隙放电模型,运用有限元软件进行仿真,计算了相关参数值,分析了带电作业过程中的电位转移特性,得到了以下结论:

1)不同转移距离下,流注放电过程中空气间隙轴向电场基本在 10^6 V/m附近变化,流注头部电场强度在发展过程中减小,发展到板极时小幅增加,放电的发展速率随间隙距离的增加有所增大。

2)在距离输电导线水平距离0.3~0.6 m处进行电位转移时,本模型计算得到的暂态能量数值在1.0 J附近,且随着转移距离的增大而增加。由于放电发展为电弧形式以后,作业人员转移至等电位过程仍未完成,转移能量会进一步增加,因此 ± 800 kV特高压直流输电线路带电作业时宜使用电位转移棒进行电位转移。

参考文献:

- [1] 刘凯,吴田,刘庭. ± 800 kV特高压直流输电线路的电位转移电流特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 568-576.
LIU Kai, WU Tian, LIU Ting. Characteristics of potential transfer current of ± 800 kV UHVDC Transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 568-576.
- [2] 胡毅,刘凯,彭勇,等.带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7):1921-1931.
HU Yi, LIU Kai, PENG Yong, et al. Research status and development trend of live working key technology[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7):1921-1931.
- [3] 刘夏清,李稳,姜赤龙,等. ± 1100 kV特高压直流输电线路带电作业电位转移特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(10):3149-3153.
LIU Xiaqing, LI Wen, JIANG Chulong, et al. Transient characteristics of potential transfer of living working on ± 1100 kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10):3149-3153.
- [4] 蔡焕青,邵瑰玮,文志科,等.带电作业中电位转移能量对人身安全的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(10):3479-3483.
CAI Huanqing, SHAO Guiwei, WEN Zhike, et al. Influence of potential shift transient energy on personnel safety during live working[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10):3479-3483.
- [5] 伍飞飞.直流输电线路电晕放电的微观物理过程及离子流场分析[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
WU Feifei. Numerical analysis on microscopic process of corona discharge and ionized field of HVDC transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [6] 彭庆军,司马文霞,杨庆,等.初始电子浓度对空气中针板间隙正极性流注放电的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(1):37-43.
PENG Qingjun, SIMA Wenxia, YANG Qing, et al. Influence of initial electron concentration on positive streamer discharge in pin-plate air gap[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1):37-43.
- [7] SERDYUK Y V. Propagation of cathode-directed streamer discharges in air[C]//Proceedings of the 2013 COMSOL Conference. Rotterdam:[s.n.], 2013: 1-5.
- [8] VIDAL F, GALLIMBERTI I, RIZK F A M, et al. Modeling of the air plasma near the tip of the positive leader[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(3):1339-1349.
- [9] MORROW R, LOWKE J J. Streamer propagation in air[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1997, 30(4):614-627.
- [10] 洪川. 冲击电压下棒-板长空气间隙放电中空间电场的计算研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
HONG Chuan. Calculation and study of the space electric field in long rod - plane gap discharge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [11] ZHANG L, HUI J F, MENG X B, et al. The simulation of streamer dynamics in the air gap[C]//Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]:IEEE, 2012:728-731.
- [12] 胡建林,洪川,杜林,等.基于有限元弱解式的棒-板长空气间隙先导放电空间电场仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10):148-154.
HU Jianlin, HONG Chuan, DU Lin, et al. Simulation study on electric field of a long rod-plane air gap during leader discharge based on weak form of finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10):148-154.
- [13] SIMA W, PENG Q, YANG Q, et al. Study of the characteristics of a streamer discharge in air based on a plasma chemical model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(2):660-670.
- [14] 陈维江,曾嵘,贺恒鑫.长空气间隙放电研究进展[J]. 高电压技术, 2013, 39(6):1281-1295.
CHEN Weijiang, ZENG Rong, HE Hengxin. Research progress of long air gap discharges[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1281-1295.
- [15] 詹花茂,刘波,师伟,等.操作冲击电压下空间电荷对棒-线间隙放电的影响[J]. 高压电器, 2014, 50(2):92-98.
ZHAN Huamao, LIU Bo, SHI Wei, et al. Influence of space charge on air gap discharge under switching impulse[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2):92-98.

(下转第175页)

- [15] 杨新村. 限制工频电场与磁场暴露的ICNIRP导则研究[J]. 华东电力, 2002, 2(1): 13-16.
YANG Xincun. ICNIRP guidelines for restricting exposure to power frequency electric and magnetic fields[J]. East China Electric Power, 2002, 2(1): 13-16.
- [16] 姚继明, 郭经红. 一种电力无线频谱监测系统设计方案[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 11(3): 29-34.
YAO Jiming, GUO Jinghong. A design scheme of power wireless spectrum monitoring system[J]. Power Information and Communication Technology, 2018, 11(3): 29-34.
- [17] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)[J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.
- [18] 陈 浩, 倪大成. 单环磁通门传感器的设计与仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 11(13): 123-127.
CHEN Hao, NI Dacheng. Design and Simulation of single-loop fluxgate sensor [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 11(13): 123-127.
- [19] 黄 欢, 郭 洁, 魏 琪, 等. 杆塔冲击接地阻抗的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55 (4): 217-222.
HUANG Huan, GUO Jie, WEI Qi, et al. Analysis of tower grounding impedance under lightning impulse by finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 217-222.
- [20] 刘 英, 肖 阳, 刘松华. 隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 123-130.
LIU Ying, XIAO Yang, LIU Songhua. Influence of cluster laying on permitted current rating of power cables in tunnels [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 123-130.
- 同 嘉(1985—), 男, 工程师, 本科, 主要从事电力工程方向研究。
-
- (上接第 168 页)
- [16] 胡 京, 文习山, 蓝 磊, 等. 棒-板长间隙正极性放电仿真模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1392-1397.
HU Jing, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Simulation model of rod-plane gap positive discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1392-1397.
- [17] 阮江军, 唐烈峥, 邱志斌, 等. 基于流注起始判据的球—板—球短空气间隙击穿电压计算[J]. 高压电器, 2017, 53 (7): 38-44.
RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, QIU Zhibin, et al. Breakdown voltage calculation of short sphere-plane-sphere air gap based on streamer inception criteria[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 38-44.
- [18] 胡 毅, 刘 凯, 刘 庭, 等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1809-1820.
HU Yi, LIU Kai, LIU Ting, et al. Living working on EHV/UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1809-1820.
- [19] 石 凯, 徐文洋, 雷东云, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业方式[J]. 电瓷避雷器, 2016 (4): 6-11.
SHI Kai, XU Wenyang, LEI Dongyun, et al. Live working ways for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Insulator and Surge Arresters, 2016 (4): 6-11.
- [20] 肖 勇, 樊灵孟. 云广 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.
XIAO Yong, FANG Lingmeng. Yun-Guang ± 800 kV HVDC live working analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (9): 2206-2211.
- 李智琦(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路带电作业技术等。