

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.032

±800 kV 输电线路带电作业电场仿真分析

潘俊文^{1,2}, 罗日成¹, 潘茜雯¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410004; 2. 国网湖北省电力公司随州供电公司, 湖北 随州 441330)

摘要: 为了确保±800 kV 特高压直流输电线路带电作业过程中线路和作业人员的安全。文中运用 Ansoft 软件建立了杆塔、绝缘子、线路以及人体的仿真模型,并用有限元分析法对带电作业人员以不同方式进入等电位过程中典型位置的体表场强进行了计算。计算结果表明:采用双人直立式沿绝缘子串进入等电位作业,人移动至绝缘子 1/4 处时的体表场强约为 5~15 kV/m,当人移动至绝缘子 1/2 处时的人体体表场强约为 10~30 kV/m;采用吊篮法进入等电位作业,带电作业人员位于杆塔上地电位作业时,作业人员较安全,吊篮移动至距屏蔽环 3 m 左右时,人体体表场强约为 41~195 kV/m,作业人员达到等电位后,作业人员体表场强超过了 510 kV/m,应采取特殊的屏蔽措施。

关键词: ±800 kV; 特高压直流; 带电作业; 体表场强; 屏蔽措施

Simulation Analysis of Electric Field on Live Working of ±800 kV Transmission Line

PAN Junwen^{1,2}, LUO Richeng¹, PAN Qianwen¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2. Suizhou Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Hubei Suizhou 441300, China)

Abstract: To ensure the safety of both lines and working staff when live working on ± 800 kV ultra-high voltage DC (UHVDC) transmission lines. The tower model, insulator model, transmission line model and human body model are established by Ansoft software. The finite element method is used to calculate and analyze the electric field intensity on different parts of the human body. The results show that when two people upright into electric field along the insulator, the surface field of human body, when moves to the 1/4 insulator, is about 5~15 kV/m. The surface field of human body, when moves to the 1/2 insulator, is about 10~30 kV/m. Hanging basket method is used to human body into electric field, human body at the tower cross, are safety. When the hanging basket moves to about 3 m away from the shielding ring, the body surface strength is about 41~195 kV/m, and when the operator reaches the equipotential, the surface strength of the operator exceeds 510 kV/m, and special shielding measures should be taken.

Key words: ±800 kV; ultra-high voltage DC; live working; body surface field strength; shielding measures

0 引言

随着经济的快速发展,带动国民电力需求的不断增长,建设具有远距离、大容量、低损耗输电能力的直流输电系统已成为中国能源和经济社会协调发展的必然要求。目前,复奉线、锦苏线、宾金线、哈郑线等±800 kV 特高压直流输电工程相继建成,大

幅提高了中国西电东送的能力。但特高压直流输电线路输送容量大,一旦投入运行,则很难进行停电检修,若发生非计划停运,将造成巨大经济损失。而开展特高压直流输电线路带电作业又面临着新的难题^[1]。

中国科研人员通过对超/特高压输电线路带电作业技术全面而系统的研究,在安全距离、作业方法、人体防护、作业工具等多方面有了新的突破^[2-19]。文[2,8]研究了±800 kV 特高压直流输电线路的电位

收稿日期:2016-03-19; 修回日期:2016-05-02

基金项目:国家自然科学基金资助课题(50977003);电力与交通安全监控及节能技术教育部工程研究中心基金(2010#03)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50977003),Power and Traffic Safety Monitoring and Energy Saving Engineering Research Center of Ministry of Education Fund Code(2010#03).

转移电流特性,分析了带电检修人员在进入等电位过程时,线路与人体间构成的电容瞬间被击穿时的放电情况。文[3-4]研究了 ± 800 kV 输电线路带电作业检修工具及其屏蔽防护措施,根据国标 GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》规定,对作业人员的屏蔽效果进行了对比分析。肖勇,樊灵孟等人以云—广 ± 800 kV 特高压交直流输电线路为背景,计算了带电作业人员典型作业位置的最小安全距离和最小组合距离。人体各个器官所耐受的电场强度不尽相同,文[3-19]只考虑了 ± 800 kV 输电线路带电检修作业人员处于等电位后的体表场强分布情况,没有对检修人员进入等电位过程进行研究。因此,研究检修人员进入等电位过程中体表场强分布对保证作业人员人身安全具有重要意义。

文中通过 Ansoft 软件^[20]建立了 ± 800 kV 输电线路模型、部分杆塔模型以及人体模型,计算了检修人员以不同方式进入典型作业位置情况下的体表场强分布,计算结果可以为 ± 800 kV 输电线路带电检修提供技术指导。

1 计算模型的建立

1.1 杆塔模型

以 JC30103 型耐张塔为研究对象,见图 1。仿真模型见图 2。

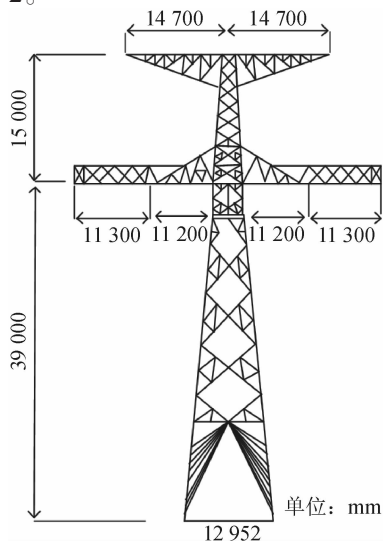


图 1 JC30103 型杆塔图

Fig. 1 The map of JC30103 type tower

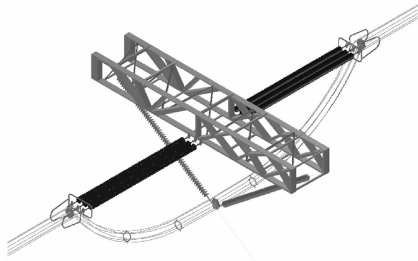


图 2 仿真模型

Fig. 2 The model of simulation

1.2 人体模型

人体计算模型各部分的参数为:头部为半径 10 cm 的圆球,颈部为半径 8 cm、高 7 cm 的圆柱;腰部为半径 16 cm、高 65 cm 的圆柱;腿部为半径 10 cm、高 80 cm 的圆柱。人体总高度为 170 cm。取人体的电导率为 0.1 S/m,相对介电常数为 106^[21],见图 3。人体在曝露电磁场下的限值^[22]见表 1。

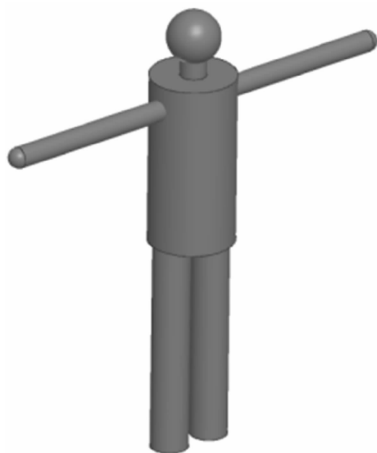


图 3 人体仿真模型

Fig. 3 The model of human body

表 1 工频电场及磁场限值对照

Table 1 Limit value comparison of power electric field and magnetic field

标准	电场强度/(kV·m ⁻¹)		磁感应强度/μT	
	职业	公众	职业	公众
ZCNIRP(50 Hz)	10	5	500	100
IEEE	20	5	2 710	904

2 作业人员在不同位置场强分析与计算

2.1 双人直立式沿绝缘子串进入等电位法

首先由一名带电作业人员采用专门研制的手杖式绝缘子钢帽固定卡具,以直立姿态,按“跨二短三”的方法沿绝缘子串进入作业位置,并将绝缘传递绳安装在合适部位,做起吊准备。然后,另一名带电作业人员按照同样方法沿另一串绝缘子进入作业位置,再开展带电更换耐张绝缘子任务。作业人员在绝缘子上爬行的过程中,主要分为以下 4 个典型的作业位置:

典型位置 I。一个人位于杆塔,另一个人位于绝缘子 1/4 处,见图 4(a);

典型位置 II。一个人位于杆塔,另一个人位于绝缘子 1/2 处,见图 4(b);

典型位置 III。一个人位于绝缘子 1/4 处,另一个人位于绝缘子 1/2 处,见图 4(c);

典型位置 IV。一个人位于绝缘子 1/2 处,另一个人位于绝缘子 1/2 处,见图 4(d)。

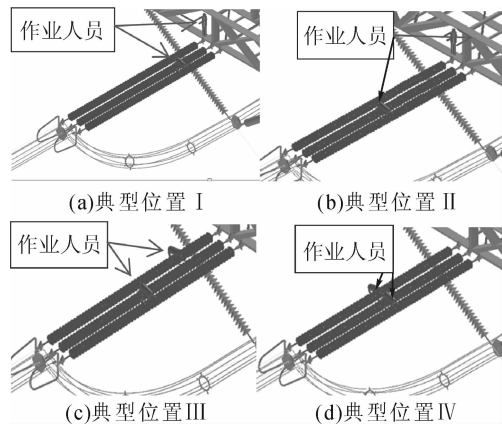


图 4 典型作业位置示意图

Fig. 4 The diagram of typical job positions

2.1.1 作业人员位于典型位置 I 时的体表场强

此作业方式下, 一名作业人员站立于杆塔上, 另一名作业人员位于绝缘子 1/4 处, 人体周围场强分布见图 5, 场强计算值详见表 2、3。

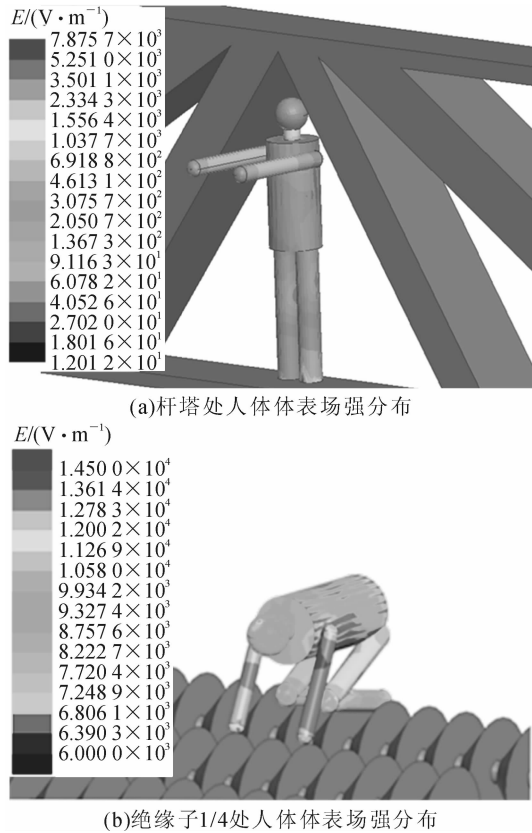


图 5 典型作业位置 I 处的人体周围场强分布

Fig. 5 Electric field intensity of human body in case of I typical job position

表 2 杆塔处人体体表场强计算值

Table 2 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the tower cross					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	8	2	4	1	3

2.1.2 作业人员位于典型位置 II 时体表场强

此种作业方式下, 一名作业人员站立在杆塔

表 3 绝缘子 1/4 处的作业人员体表场强计算值

Table 3 Electric field intensity of different part of human body who is standing on a quarter of insulator					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	15	8	4	5	9

上, 另一名作业人员利用软梯滑行至绝缘子中央, 人体体表场强见表 4、5。

表 4 杆塔处的作业人员体表场强计算值

Table 4 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the tower cross					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	8	2	4	1	3

表 5 绝缘子 1/2 处的作业人员体表场强计算值

Table 5 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the middle of insulator					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	30	16	10	10	16

2.1.3 作业人员位于典型位置 III 时体表场强

此作业位置方式下, 一名作业人员位于绝缘子 1/4 处, 另一名作业人员位于绝缘子 1/2 处, 作业人员体表场强计算结果见表 6、7。

表 6 绝缘子 1/4 处的作业人员体表场强计算值

Table 6 Electric field intensity of different part of human body who is standing on a quarter of insulator					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	14	7	5	5	9

表 7 绝缘子 1/2 处的作业人员体表场强计算值

Table 7 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the middle of insulator					
位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	28	14	9	10	15

2.1.4 作业人员位于典型位置 IV 时体表场强

此作业方式下, 一名作业人员位于绝缘子 1/2 处, 另一名作业人员也位于绝缘子 1/2 外, 该位置电场分布见图 6, 而场强计算结果见表 8、9。

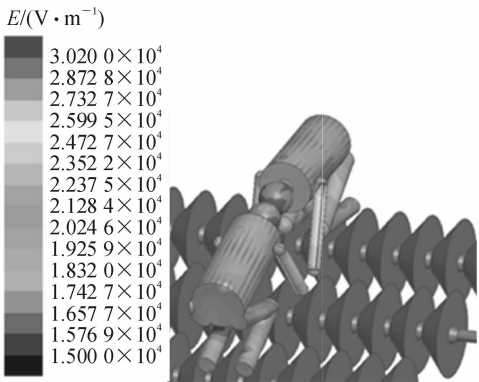


图 6 绝缘子 1/2 处人体体表场强分布

Fig. 6 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the middle of insulator

表8 绝缘子1/2处的作业人员体表场强计算值

Table 8 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the middle of insulator

位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	30	15	7	11	15

表 9 绝缘子 1/2 处的作业人员体表场强计算值

Table 9 Electric field intensity of different part of human body who is standing on the middle of insulator

位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	30	12	8	11	14

整个 2.1 节计算结果表明,当人处于地电位时,人体体表的场强一般低于 10 kV/m,但是在头部、指尖等尖端部位的体表场强较大。当人移动至绝缘子 1/4 处时,体表场强约为 5~15 kV/m,当人移动至绝缘子 1/2 处时,人体体表场强约为 10~30 kV/m。

通过计算分析可确定±800 kV 特高压直流输电线路自由式带电作业人员体表场强分布如下:

1)带电作业人员位于杆塔上地电位作业时,其体表场强较小,在塔身架构内时人员体表场强不大于 10 kV/m,作业人员较安全。

2)当人移动至绝缘子 1/4 处时,体表场强约为 5~15 kV/m,当人移动至绝缘子 1/2 处时,人体体表场强约为 10~30 kV/m。

2.2 吊篮法

绝缘吊篮法分为塔上绝缘吊篮法、地面绝缘吊篮法,地电位电工控制吊篮升降,等电位电工乘坐吊篮进入等电位。不同的是塔上绝缘吊篮法是从塔身出发,相关工器具要逐件运至塔上,而地面绝缘吊篮法是从地面出发,由下向上进入等电位。

吊篮法作业过程中 3 个典型作业位置及其仿真模型见图 7。

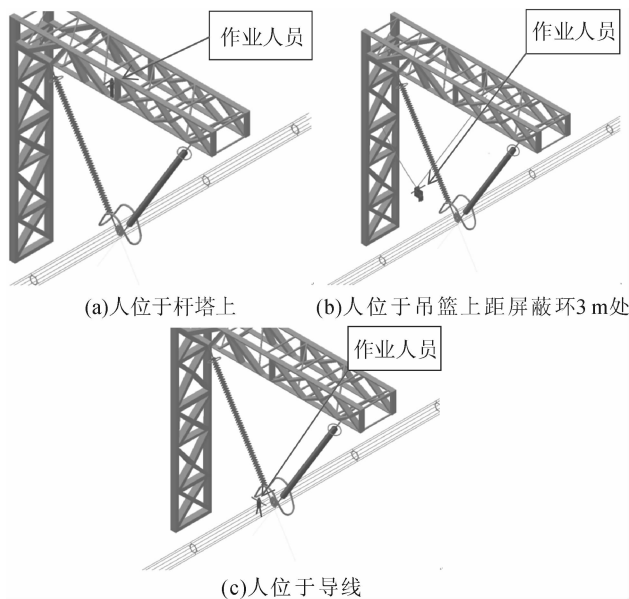


图 7 吊篮法典型作业位置

Fig. 7 The typical working position of hanging basket method

2.2.1 人在杆塔上体表场强

此作业方式下,作业人员站立于杆塔上,人体体表场强计算值详见表 10。

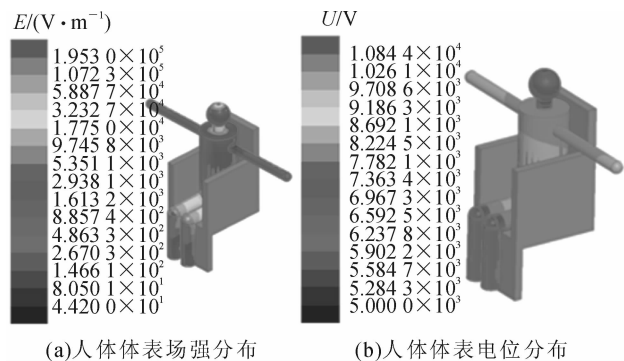
表10 人体体表场强计算值

Table 10 Electric field intensity of different part of human body

位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	27	32	4	5	32

2.2.2 人位于吊篮上距屏蔽环 3 m 体表场强

此作业方式下,作业人员距离屏蔽环 3 m 时,人体体表场强及电位分布见图 8,场强计算值详见表 11。



(a)人体体表场强分布

(b)人体体表电位分布

图 8 人体周围场强和电势分布

Fig. 8 Electric field intensity and potential of different part of human body

表11 人体体表场强计算值

Table 11 Electric field intensity of different part of human body

位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	195	72	168	41	64

2.2.3 人体位于导线上体表场强

此时,作业人员站立在导线上,作业人员腰部以上部位在分列导线外部。作业人员重要部位的电场计算结果见表 12 所示。

表12 人体体表场强计算值

Table 12 Electric field intensity of different part of human body

位置	头顶	左手	脚	胸	右手
场强/(kV·m ⁻¹)	1 826	1 543	652	510	1 544

整个 2.2 节计算结果表明,地电位作业人员体表场强低于 32 kV/m,头部、指尖等尖端部位的体表场强较高;作业人员距屏蔽环 3 m 的距离时,其头部电场强度约为 195 kV/m,胸部电场强度约为 41 kV/m;作业人员进入等电位后,双手和头部的电场强度超过了 1 500 kV/m,等电位作业人员需要穿戴屏蔽服。

通过计算分析可确定在±800 kV 特高压直流输电线路中,采用吊篮法带电作业人员体表场强分布

如下:

1) 处于杆塔上的作业人员较安全, 其体表场强最大值位于手部, 仅为 32 kV/m。

2) 作业人员距屏蔽环 3 m 左右时, 其体表场强最大值位于头部, 最大场强值约为 195 kV/m, 为安全起见, 可适当采取相应的防护措施。

3) 位于导线上等电位的作业人员, 其体表场强最大值位于头部, 最大电场强度约为 1 826 kV/m, 作业人员必须采用屏蔽措施才能确保安全^[23-24]。

3 结论

通过对 ± 800 kV 特高压直流带电作业人员体表场强计算, 得出以下结论:

1) 若采用双人直立式沿绝缘子进入等电位, 带电作业人员位于杆塔上地电位作业时, 其体表场强较小, 在塔身架构内时人员体表场强不大于 10 kV/m, 作业人员较安全; 当人移动至绝缘子 1/4 处时, 体表场强约为 5~15 kV/m; 当人移动至绝缘子 1/2 处时, 人体体表场强约为 10~30 kV/m。

2) 采用吊篮法进入等电位时, 带电作业人员位于杆塔上地电位作业时, 其体表场强较小, 在塔身架构内时人员体表场强不大于 32 kV/m, 作业人员较安全。当吊篮移动至距屏蔽环 3 m 左右时和作业人员达到等电位后站立在分裂导线上时, 作业人员应采取屏蔽措施。

参考文献:

- [1] 罗日成, 唐祥盛, 李志前, 等. 500/220 kV 同塔四回输电线路带电作业电场仿真分析[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 164-170.
LUO Richeng, TANG Xiangsheng, LI Zhiqian, et al. Simulation analysis on electric field intensity of 500/220 kV four-circuit-on-one-tower transmission line for live working [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 164-170.
- [2] 刘凯, 吴田, 刘庭, 等. ± 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, et al. Characteristics of potential transfer current of ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 568-576.
- [3] 胡毅, 刘凯, 胡建勋, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业安全防护用具的分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2357-2361.
HU Yi, LIU Kai, HU Jianxun, et al. Analysis on safety protective equipments for live working on ± 800 kV UHV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2357-2361.
- [4] 李庆峰, 廖蔚明, 丁玉剑, 等. ± 800 kV 输电线路带电作业的屏蔽防护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 93-101.
LI Qingfeng, LIAO Weiming, DING Yujian, et al. Shielding protection for live working on analysis on ± 800 kV DC transmission line[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(34): 93-101.
- [5] 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. Live working on EHV/UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1809-1820.
- [6] 肖勇, 樊灵孟. 云广 ± 800 kV 特高压交直流输电线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.
XIAO Yong, FAN Lingmeng. Analysis of live working on Yun-Guang ± 800 kV UHV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2206-2211.
- [7] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 带电作业技术与标准制定[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3015-3024.
HU Yi, LIU Kai, LIU Ting, et al. Live working technology research and standards formulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3015-3024.
- [8] 蔡焕青, 绍瑰玮, 文志科, 等. 带电作业中点位转移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 living working[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3479-3483.
- [9] 郭雄, 万保权, 路遥. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 55-58.
WU Xiong, WAN Baoquan, LU Yao. Study on electromagnetic environment for 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58.
- [10] 金逸, 肖匀, 刘庭, 等. 500 kV 同塔四回线路不全停运检修作业方式研究[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 29-34.
JIN Yi, XIAO Yun, LIU Ting, et al. Study on circuit service without total outage of 500 kV transmission line of four circuits on one tower[J]. Electrical Power, 2012, 45(9): 29-34.
- [11] 胡毅, 胡建勋, 刘凯, 等. 特高压交直流线路带电作业人员的体表场强[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 13-18.
HU Yi, HU Jianxun, LIU Kai, et al. Field strength of body surface during the live working on the UHV AC and DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 13-18.
- [12] 苏梓铭, 彭勇, 刘凯, 等. 1 000 kV 与 500 kV 交流同塔四回线路带电作业电场防护仿真计算分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 78-83.
SU Ziming, PENG Yong, LIU Kai, et al. 1 000 kV and 500 kV AC four circuits on the same tower line electric protection

- simulation analysis[J]. Electric Power, 2014, 47(2): 78-83.
- [13] 胡毅, 刘凯, 王力农, 等. 1 000 kV 同塔双回输电线路带电作业技术试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2668-2673.
HU Yi, LIU Kai, WANG Linong, et al. Experimental research of live working on 1 000 kV double circuit AC transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2668-2673.
- [14] 舒印彪, 胡毅, 李雪. 特高压交流输电线路的运行维护与带电作业[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 1-5.
SHU Yinbiao, HU Yi, LI Xue. Maintenance and live working technology for ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 1-5.
- [15] 绍瑰玮, 胡毅, 王力农, 等. 1 000 kV 交流输电线路带电作业场强测量[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 89-91.
SHAO Guiwei, HU Yi, WANG Linong, et al. Measurement of electric field intensity on human-body surface at live working for 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 89-91.
- [16] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 1 000 kV 交流特高压输电线路带电作业安全防护研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 74-77.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research of safety protection for live working on 1 000 kV ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 74-77.
- [17] 张刘春, 殷禹, 葛栋, 等. ± 800 kV 同塔双回直流输电工程绝缘配合研究[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 36-39.
ZHANG Liuchun, YAN Yu, GE Dong, et al. Research on insulation coordination for ± 800 kV UHVDC double-circuit transmission lines[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 36-39.
- [18] 张文杰, 张弓达, 岳灵平, 等. 并行多回交流输电线路检修作业时稳态感应电压技术与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2310-2314.
ZHANG Wenjie, ZHANG Gongda, YUE Lingping, et al. Calculation and analysis on steady-state induced voltage during maintenance operation of multi parallel circuits of E-HV/UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2310-2314.
- [19] 毛艳, 丁玉剑, 王晰, 等. 特高压直流 V 型符合绝缘子串悬挂点伸入塔身应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4717-4723.
MAO Yan, DING Yujian, WANG Xi, et al. Research on application of UHVDC V-type composite insulator string extended to tower body[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4717-4723.
- [20] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国, 译. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998: 15-22.
JIN Jianming. Finit element method of electromagnetic field [M]. WANG Jianguo, Translate. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 1998: 15-22.
- [21] GB 10000—88 中国成年人人体尺寸[S]. 1989.
GB 10000—88 Human dimensions of chinese adults[S]. 1989.
- [22] 卢刚. ± 660 kV 直流输电线路带电作业技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
LU Gang. Live working technology of ± 660 kV DC transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [23] GB 18136—2000 高压静电防护服装及试验方法[S]. 2000.
GB 18136—2000 High voltage electrostatic shielding clothes and test procedure[S]. 2000.
- [24] 方年案. 带电作业安全技术[J]. 东北电力技术, 1994, 15(7): 51-59.
FANG Nian'an. The live working safety technology[J]. North-eastern Electric Power, 1994, 15(7): 51-59.
- 潘俊文(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路覆冰及其防护、电力系统过电压及其防护等方面。
- 罗日成(1969—), 男, 副教授, 博士后, 研究方向为电力系统过电压、电力设备绝缘在线监测与故障诊断、电力设备状态评价与风险评估等。