

高海拔地区特高压杆塔的合成电场和 电位转移电流实测研究

曲 辉^{1,2}, 林 涛¹, 陈鹤冲¹, 周 林³, 彭 勇⁴, 毛小虎⁵, 陈 波⁵

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;
3. 国家电网有限公司 西南分部, 四川 成都 610041; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430060;
5. 国家电网四川省公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要:针对2000 m高海拔地区 ± 800 kV特高压直流带电作业过程中,作业人员将承受特高压杆塔产生的合成电场和电位转移电流的问题,开展了特高压杆塔的合成电场和电位转移脉冲电流的实测研究。首先,从理论上分析了考虑离子流条件下特高压杆塔的合成电场计算方法和电位转移电流特性。然后,建立特高压杆塔带电作业和电位转移有限元仿真模型,并进行了仿真计算分析。最后,在高海拔特高压试验基地搭建了试验平台和测试系统,开展了特高压杆塔的合成电场和电位转移脉冲电流的现场实际测量工作,试验结果可以为高海拔地区特高压杆塔带电作业的安全防护标准提供制定依据。

关键词:高海拔;特高压输电;带电作业;合成电场;电位转移电流;现场试验

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005035

0 引言

我国存在负荷中心与能源中心地理分布不平衡的问题,发展高电压、远距离、大容量输电方式很有必要^[1]。特高压直流输电具备输送容量大、线路走廊窄、线路造价低、年电能损失小、控制方式快速灵活以及能够实现交流线路非同步并网等优势,更适用于高压大容量的远距离输电^[2]。另外,随着供电可靠性要求的不断提高,带电作业逐渐成为特高压输电运行维护的发展趋势。

由于特高压线路电压等级高,架空线附近场强高,人体的进入使电场畸变导致带电作业人员体表出现更高场强,而且在进行电位转移时会出现明显的脉冲电弧电流^[3],严重威胁带电作业人员的人身安全。带电作业过程中,工作人员的安全防护极为关键。近几十年来,国内外针对110~1000 kV电压等级的交流线路开展了大量的带电作业安全防护研究,且取得了诸多成果^[4-5]。对于交流电场中的人体感受,相关国家标准规定局部裸露部分最大交流场强不应超过240 kV/m、屏蔽服内交流场强不应超过15 kV/m^[6-7]。合成电场对带电作业人体的影响方面,相关研究指出人体处于直流中时没有处于交流中敏感^[8]。由于 ± 800 kV是直流线路中的最高电压等级,且若处于高海拔地区,线路附近的离子流场与静电场综合而成的合成电场强度以及电位转移时的电流特性比低海拔地区的交流线路对应的情况更复杂^[9-13]。

在我国西南地区的高海拔地带,架设的 ± 800 kV特高压直流输电线路海拔约为2000 m。随着海拔的升高,电力设备的绝缘水平下降,电场分布也将有所变化^[14-18],原有的特高压交流1000 kV线路带电作业安全防护工具及技术参数是否适用于高海拔地区(本文均指海拔2000 m)的特高压直流 ± 800 kV线路还需要进一步的研究确定。因此本文针对高海拔地区 ± 800 kV直流带电作业过程中,特高压杆塔的合成电场和电位转移脉冲电流开展实测研究:首先采用有限元仿真计算和现场实测相结合的方法,得到了海拔2000 m处5种不同典型工况位置下带电作业人员体表电场强度分布情况;然后,在对电位转移脉冲电流进行仿真建模分析的基础上,通过模拟人试验对电位转移时的脉冲电流进行实测。仿真计算和试验测量数据表明,高海拔地区特高压直流线路带电作业人员体表场强小于特高压交流线路带电作业人员体表场强,电位转移脉冲电流幅值小于交流线路对应情况下的脉冲电流幅值。最后参照交流线路标准,提出了适用于高海拔地区 ± 800 kV特高压杆塔带电作业的安全防护工具及其技术参数要求。

1 安全防理论分析

1.1 高海拔合成电场理论分析

在带电作业过程中,架空导线产生的电场和导线四周的离子流场将形成合成电场,共同作用于带电作业人体。随着海拔高度的提升,空气压强减小,电晕的起晕电压将减小,故电晕放电更易发生,导致电晕损耗增加,空间离子流场增强,所以作用于人体的合成电场也将增强。同时在带电作业人员进入合成电场时,由于人体为不规则导体,其将改变合成电

收稿日期:2020-03-24;修回日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177111)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177111)

场的分布情况,使得高海拔地区的合成电场分析更为复杂^[9-10]。

基于合成电场中离子流场的物理特性,建立适当的数学模型通过计算分析可以获得符合工程精度要求的结果。离子流场的求解为边值求解,数学模型应该包括泛定方程和定解条件2个方面。若忽略风速影响,则离子流场的控制方程为:

$$\nabla^2 \varphi = -(\rho^+ - \rho^-)/\varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{j}^+ = k^+ \rho^+ \mathbf{E}, \quad \mathbf{j}^- = k^- \rho^- \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^+ = -(R_{\text{ion}}/e)\rho^+ \rho^-, \quad \nabla \cdot \mathbf{j}^- = (R_{\text{ion}}/e)\rho^+ \rho^- \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

其中, ∇ 为哈密顿算子; $\mathbf{E}$ 为电场强度(V/m); $\rho^+、\rho^-$ 分别为正、负电荷密度(C/m³); ε_0 为空气介电常数; $\mathbf{j}^+、\mathbf{j}^-$ 分别为正、负离子流密度(A/m²); $k^+、k^-$ 分别为正、负离子迁移率(m²/(V·s)); e 为元电荷; φ 为电位(V); R_{ion} 为离子复合系数^[10]。

海拔高度以及进入的带电作业人体均会对离子流场控制方程中的参数产生影响。由于空间中正负离子复合仅存在于双极导线之间,而本节仅分析单极导线,故控制方程可写为:

$$-\nabla \cdot (\nabla \varphi) = \rho/\varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \nabla \varphi) = 0 \quad (6)$$

式(1)~(8)以电位 φ 或电荷密度 ρ 为求解变量。传统方法多采用以 ρ 为变量求解电流连续性方程,将通过泊松方程求解 φ 的过程称为正过程,通过电流连续性方程求解 ρ 的过程为逆过程,每次迭代都需要正、逆2个过程同时进行,直至收敛。但实际计算中发现,式(6)中存在一阶导数,导致求解过程的边界不确定。对此,可采用Galerkin法求解电位 φ ,其中材料参数定义为 $\rho^+、\rho^-$ 。采用Galerkin法时有:对于正常直流架空导线,其表面为dirichlet边界,其电位已知,即导线正常电压;在发生电晕的导体表面,电位梯度已知,即由导线表面电场起晕公式确定导体表面的电场强度;参考导体的电位为0。

1.2 高海拔电位转移脉冲电流理论分析

当人在高海拔地区进入等电位点时,相当于空气中存在的一个运动的导体,高海拔地区直流输电线路进入等电位过程中的等效电路如图1所示。图中, $C_{\text{eq1}}、R_{\text{eq1}}$ 分别为人与架空线间的等效电容、等效绝缘电阻; $C_{\text{eq2}}、R_{\text{eq2}}$ 分别为人与杆塔(接地)间的等效电容、

等效绝缘电阻; $C_1、R_1$ 分别为架空线对地等效电容、绝缘电阻。人与等电位点之间存在一定的间隙,进入等电位过程中间隙被击穿,形成电弧,这等效于电容 C_{eq1} 被短接,电容由短接点放电。

相较于普通海拔地区,高海拔地区的空气更稀薄,且带电作业人员进入时空气和人体的相对介电常数均会发生变化,造成人体对杆塔及地间的等效电容发生变化,最终将影响电位转移脉冲电流的幅值。

在进入等电位的暂态过程中,初期的人体电位由等效电容分配决定;进入等电位过程处于稳态时,人体电位由绝缘电阻分配决定。

$$v_1 = UC_{\text{eq2}}/(C_{\text{eq1}} + C_{\text{eq2}}) \quad (7)$$

$$v_2 = UR_{\text{eq2}}/(R_{\text{eq1}} + R_{\text{eq2}}) \quad (8)$$

其中, $v_1、v_2$ 分别为人体进入等电位的暂态过程和稳态过程中的电位; U 为架空导线对地电位。

2 计算与试验模型

2.1 人体模型

为便于计算高海拔地区带电作业人员的体表场强,本文主要考虑人体各部位的电导率 σ 及相对介电常数 ε_r ,频率为60 Hz时人体内活组织的 ε_r 为 $10^5 \sim 2 \times 10^6$ ^[14-15]。本文假设人体为均匀介质,各部位的尺寸参考《中国成年人人体尺寸》中的推荐数值^[14-15],设置人体参数如表1所示,表中 $r、h$ 分别为半径和高度。

表1 人体参数设置

Table 1 Setting of human body parameters

人体部位	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	ε_r	形状(尺寸)
头部	0.1	10^5	球体($r=10$ cm)
颈部	0.1	10^5	圆柱($r=8$ cm, $h=7$ cm)
腰部	0.1	10^5	圆柱($r=16$ cm, $h=65$ cm)
腿部	0.1	10^5	圆柱($r=10$ cm, $h=80$ cm)

2.2 典型线路模型

通过调研海拔2000 m处的 ± 800 kV特高压直流输电线路,选取某处一典型杆塔,杆塔结构见附录中的图A1。该杆塔采用的架空导线为6×LGJ-630/45型钢芯铝绞线^[16-17],导线外径为3.36 cm,单位直流电阻为0.046 33 Ω /km,分裂间距为450 mm,极间距离为24 m,悬挂高度为67 m。为简化计算,本文仅考虑杆塔的影响,忽略其上绝缘子串对电场分布情况的影响。

带电作业人员进入等电位点作业的流程见附录中的图A2。考虑带电作业人员从爬上扶梯到乘坐吊篮,再到进入等电位点作业的全部运行路线,选取带电作业人员在带电作业过程中的5个典型工况位置(见附录中的图A3)实地测量和计算合成电场强度。

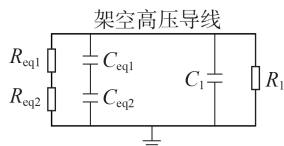


图1 直线路进入等电位的等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of DC line entering equipotential

3 带电作业人员体表合成电场仿真与实测

3.1 合成电场的仿真计算

相较于交流线路,高海拔地区 ± 800 kV特高压杆塔附近的电荷电场与静电场综合而成的合成电场强度以及电位转移时的电流特性更复杂^[12]。本文为全面分析 ± 800 kV特高压杆塔周围的合成电场,选取高海拔地区带电作业的典型杆塔模型以及典型工况位置,利用有限元仿真软件ANSYS计算带电作业人员承受的合成电场强度。考虑到现阶段合成电场在铁塔附近很难进行离子流场建模计算,本文采用不考虑离子流场的有限元模型进行仿真计算。通过仿真计算得到考虑了杆塔后 ± 800 kV特高压直流线路杆塔周围的电场强度分布特性见附录中的图A4。选取位于杆塔上的典型工况位置1、2,并针对各位置中的杆塔内部固定站立范围以及杆塔外部悬浮范围计算合成电场,结果见表2。根据线路周围电场强度分布特性,得到在空中的3个典型工况位置处,带电作业人员体表电场强度分布如附录中的图A5所示,各部位合成电场计算结果如表3所示。

表2 塔身周围合成电场计算结果

Table 2 Calculative results of synthetic electric field around tower body

测量位置	计算结果/(kV·m ⁻¹)	测量位置	计算结果/(kV·m ⁻¹)
1(塔内)	9.1	2(塔内)	13.6
1(塔外)	54.1	2(塔外)	27.3

表3 人体体表合成电场计算结果

Table 3 Calculative results of synthetic electric field on human body surface

测量位置	计算结果/(kV·m ⁻¹)	测量位置	计算结果/(kV·m ⁻¹)
3(头顶)	162.4	4(手部)	1650.0
3(胸前)	44.6	4(脚下)	406.0
3(手部)	52.9	5(头顶)	1690.0
3(脚尖)	184.2	5(胸前)	24.5
4(头顶)	1710.0	5(手部)	1640.0
4(胸前)	24.8	5(脚下)	661.0

3.2 合成电场的实际现场测量

为研究高海拔地区带电作业人员承受的实际合成电场强度,本文于某特高压试验基地,在国内外首次进行了实际作业人员进入高海拔地区 ± 800 kV直流线路等电位试验,并对各典型工况位置的作业人员体表合成电场强度进行了测量。本文采用国网电力科学研究院开发的合成场强仪作为测量工具,该仪器基于文献[13]中的“场磨”原理研发,由下位机单元、上位机单元和PC机三部分组成,其中下位机单元由合成场传感器、信号处理电路、单片机、通信模块、AD芯片和电源模块等组成。合成场强仪原理及装置实物图如附录中的图A6—A8所示。

测量过程中,测量人员着屏蔽服从地面登塔,通

过吊篮法与辅助测量人员配合,使主测量人员到达塔上各典型工况位置测量合成电场强度。测量现场如附录中的图A9所示,现场海拔高度为2100 m,气温为23.6℃,相对湿度为49.5%,气压为79.3 kPa,风速为2.3 m/s。得到的实际合成电场测量结果如表4所示,表中同时列出仿真结果进行对比。

表4 合成电场实际测量结果

Table 4 Actual measurement results of synthetic electric field

测量位置	合成电场/(kV·m ⁻¹)		测量位置	合成电场/(kV·m ⁻¹)	
	仿真结果	测量结果		仿真结果	测量结果
1(塔内)	9.1	4.0	4(头顶)	1710.0	404.2
1(塔外)	54.1	26.0	4(胸前)	24.8	39.1
2(塔内)	13.6	6.0	4(手部)	1650.0	529.0
2(塔外)	27.3	48.4	4(脚下)	406.0	145.3
3(头顶)	162.4	132.0	5(头顶)	1690.0	400.6
3(胸前)	44.6	96.2	5(胸前)	24.5	37.7
3(手部)	52.9	241.5	5(手部)	1640.0	560.5
3(脚尖)	184.2	150.0	5(脚下)	661.0	250.4

对比仿真计算值和现场测量值可以发现,本文的仿真计算值大于现场实际测量值。这是因为仿真计算中并未考虑单极性导线的电晕放电以及空间离子流场的作用,而实际中特高压直流的各单极导线上均存在较为严重的电晕放电现象,电晕放电将改善电场畸变处的电场不均匀分布,且空间离子流场亦会削弱导线附近的畸变电场^[16-18]。在带电作业过程中,人体中如手、脚、头等各尖端部位将会使电场发生畸变,而电晕放电以及离子流场均将改善这附近的电场不均匀分布,所以仿真值要大于实测值。

3.3 合成电场特性分析

通过仿真计算和现场测量的分析,明确了2000 m高海拔地区 ± 800 kV特高压直流线路带电作业人员体表场强分布具有如下特点:

(1)带电作业人员处于地电位时,其体表场强较小,均小于240 kV/m的预警值;

(2)在作业人员进入等电位过程中位于等电位时,一些部位的体表场强将大于500 kV/m,从而超过预警值,应当重点防护。

4 电位转移脉冲电流仿真与实测

4.1 高海拔直流线路电位转移脉冲电流仿真

在2000 m高海拔地区进入直流等电位的过程中,忽略电晕对人体与架空导线间形成的等效电容的影响,在进入等电位过程中的电容暂态放电电流可以采用图2所示的电路进行模拟。图中, R_0 为架空线路等效电阻; $U=800$ kV; $C_{eq1}=28.8$ pF; $C_{eq2}=19.2$ pF;人体接触等电位点时连同接触保护工具的等效电阻 $R=300$ Ω、等效电感 $L=0.01$ mH。放电电流的峰值为1000 A,半峰值时间为0.01 ms。放电通

道内的电感对电容暂态放电特性影响不大,故可以忽略。计算得到的电位转移脉冲电流如图3所示,由图可见,2000 m高海拔地区 ± 800 kV直流线路电位转移电流峰值为180 A。

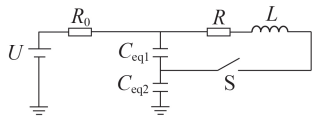


图2 进入直流等电位过程中的放电电流模拟电路

Fig.2 Simulation circuit of discharging current when entering DC equipotential

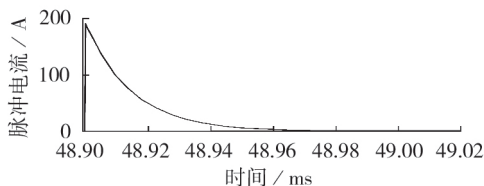


图3 电位转移脉冲电流计算结果

Fig.3 Calculative result of potential transfer pulse current

4.2 模拟人高海拔地区现场试验

为在仿真计算的基础上对高海拔地区 ± 800 kV直流线路电位转移电流特性进行更深入的研究,本文于某特高压试验基地进行了作业人员进入高海拔地区 ± 800 kV直流特高压线路等电位试验,并对各典型工况位置处作业人员体表的电位转移脉冲电流进行了测量。在1:1的模拟人模型上加装电流传感器(原理图见附录中的图A10),由牵引绳配合将模拟人吊入电场中测量电位转移脉冲电流,试验现场如附录中的图A11所示。统计传感器采集的电位转移脉冲电流数据,结果如表5所示。

表5 正负极性电位转移脉冲电流测量结果

Table 5 Measurement results of positive and negative potential transfer pulse currents

试验序号	脉冲数量		峰值电流/A	
	正极性	负极性	正极性	负极性
1	0	4	0.32	-9.521
2	20	19	38.62	-53.320
3	14	17	39.84	-51.600
4	1	8	2.59	-2.411
5	2	3	2.41	-12.880
6	3	2	106.55	-7.119
平均值	6.63	8.83	31.72	-22.810

由试验数据可见,模拟人每次进入等电位时存在多个电位转移脉冲电流,且其峰值分散性极大。这是由于模拟人在进入等电位的过程中,人与导线间的间隙会被击穿,产生电弧。电弧能量耗散后,间隙重新恢复绝缘,但随着间隙距离缩小,间隙又将击穿,依此规律间隙间将产生电弧脉冲放电,直至模拟人与架空线完全接触。同时峰值分散性还与模拟人的进入速度、方式、进入路径相关,且人体上多处突出的

尖端部位会造成电场分布的畸变,从而形成多个电弧放电通道。正、负极性的交替出现是由于模拟人处于一浮动电位,其与目标架空线的电位的相对大小处于动态变化的过程,从而造成了脉冲电流极性的变化。实际试验数据相较于仿真数据要小74 A,这是由于现场试验采用模拟人进入的方式,其进入过程中可能受现场风速影响导致模拟人进入电位时与理想情况存在一定的差距。同时,仿真并没有考虑模拟人进入前预放电和空间离子流场的情况,现场的空气温湿度也会影响测量结果,并且仿真计算是在理想情况下进行的,可能产生最大电位转移电流值,因而造成了测量值小于仿真值。而高海拔地区 ± 800 kV直流线路电位转移时实测脉冲电流的最大幅值在100 A左右,这也与仿真结果相符。因此电位转移装置应能满足该脉冲转移电流的防护要求。

5 结论

(1)2000 m高海拔地区 ± 800 kV直流特高压杆塔带电作业过程中,作业人员处于地电位时,其体表所受最大场强为50~60 kV/m;若作业人员进入800 kV等电位点进行作业,其体表承受最大场强将高于240 kV/m的预警值,应当采取防护措施。

(2)2000 m高海拔地区 ± 800 kV直流特高压杆塔带电作业电位转移时实测脉冲电流的最大幅值在100 A左右,需加强防护。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘静佳,梅红明,刘树,等. 特高压多端混合直流输电系统阀组计划投/退控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):158-165.
LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, et al. Planned valve group entry/exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(9):158-165.
- [2] 罗汉武,乐健,毛涛,等. 扎鲁特—青州 ± 800 kV特高压直流输电工程运行特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):53-59.
LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Analysis of operation characteristics of Zhazhute-Qingzhou ± 800 kV UHVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(1):53-59.
- [3] 胡毅,王力农,邵瑰玮,等. 紧凑型输电线路带电作业方式及安全防护[J]. 电网技术,2007,31(23):6-10.
HU Yi, WANG Linong, SHAO Guiwei, et al. Live working ways for compact transmission lines and relevant safety protection [J]. Power System Technology, 2007,31(23):6-10.
- [4] 刘超,阮江军,杜志叶,等. 不同导线排列下500 kV输电线路直升机带电作业平台侵入路径[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):151-156.
LIU Chao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Approaching paths of helicopter live-line work platform to 500 kV UHV AC transmission lines for different conductor arrangements [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(1):151-156.
- [5] 刘超,阮江军,廖才波,等. 1000 kV特高压交流输电线路直升机平台带电作业侵入路径[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):64-70.
LIU Chao, RUAN Jiangjun, LIAO Caibo, et al. Approaching

- paths of helicopter live-line work platform to 1000 kV UHV AC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 64-70.
- [6] 肖宾, 刘凯, 陈磊, 等. 1000 kV 特高压变电站带电作业绝缘平台研制[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 1-5.
XIAO Bin, LIU Kai, CHEN Lei, et al. Investigation on insulating platform for live working in 1000 kV UHV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 1-5.
- [7] 黄道春, 阮江军, 刘守豹. 特高压交流复合绝缘子电位和均压环表面电场分布计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1442-1447.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, LIU Shoubao. Potential distribution along UHV AC transmission line composite insulator and electric field distribution on the surface of grading ring[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1442-1447.
- [8] 吴东, 潘俊文, 邹明, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 157-164.
WU Dong, PAN Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on ± 800 kV DC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 157-164.
- [9] COMBER M, JOHNSON G. HVDC field and ion effects research at project UHV: results of electric field and ion current measurements[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(7): 1998-2006.
- [10] 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.
- [11] REDDY C, RAMU T. On the computation of electric field and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1236-1244.
- [12] 李庆峰, 廖蔚明, 丁玉剑, 等. ± 800 kV 直流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): 96-101.
LI Qingfeng, LIAO Weiming, DING Yujian, et al. Shielding protection for live working on ± 800 kV DC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 96-101.
- [13] IEEE. IEEE guide for the measurement of DC electric-field strength and ion related quantities: IEEE Std 1227TM-1990 (R2010)[S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1990.
- [14] 中国标准化与信息分类编码研究所. 中国成年人人体尺寸: GB 10000—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [15] 中国标准化与信息分类编码研究所. 带电作业用屏蔽服装: GB/T 6568—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 国家能源局. ± 800 kV 直流线路带电作业技术规范: DL/T 1242—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [17] 胡毅, 刘凯. 超/特高压交直流输电线路带电作业[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 98-101.
- [18] 张亚迪, 车彬, 邱中华, 等. 基于人体体表场强的 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业进入等电位的路径研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1131-1136.
ZHANG Yadi, CHE Bin, QIU Zhonghua, et al. Research of entering path for live work on ± 800 kV UHV DC transmission lines by body surface electric field strength[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1131-1136.

作者简介:



曲 辉

曲 辉(1976—),男,山东烟台人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为特高压建设与运行技术(E-mail: chc61663@163.com);

林 涛(1969—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、分布式电力系统等(E-mail: 422231353@qq.com);

陈鹤冲(1994—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电线路带电作业方法等(E-mail: 616639023@qq.com)。

(编辑 任思思)

Study on synthetic electric field and potential transfer current of UHV tower in high altitude area

QU Hui^{1,2}, LIN Tao¹, CHEN Hechong¹, ZHOU Lin³, PENG Yong⁴, MAO Xiaohu⁵, CHEN Bo⁵

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Southwest Branch, State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China;

4. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430060, China;

5. State Grid Sichuan Company Maintenance Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In view of the problem that the workers will bear the synthetic electric field and potential transfer current produced by UHV(Ultra-High Voltage) tower in the process of ± 800 kV UHV DC live working in high altitude area(2 000 meters), the actual measurement and research on the synthetic electric field and potential transfer pulse current of UHV tower are carried out. Firstly, the calculation method of the synthetic electric field and the characteristics of the potential transfer current of UHV tower considering the ion current are analyzed theoretically. Then, the finite element simulation model of UHV tower live working and potential transfer is established, and the simulation analysis is carried out. Finally, the test platform and test system are built in the high altitude UHV test base to carry out the field measurement of the synthetic electric field and potential transfer pulse current of UHV tower. The testing results can provide a basis for the safety protection standard of UHV tower live working in high altitude area.

Key words: high altitude; UHV power transmission; live working; synthetic electric field; potential transfer current; field experiment

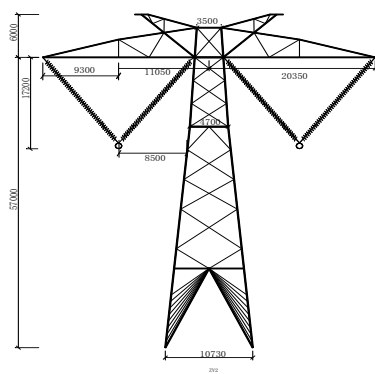


Fig.A1 Schematic diagram of typical tower's structure

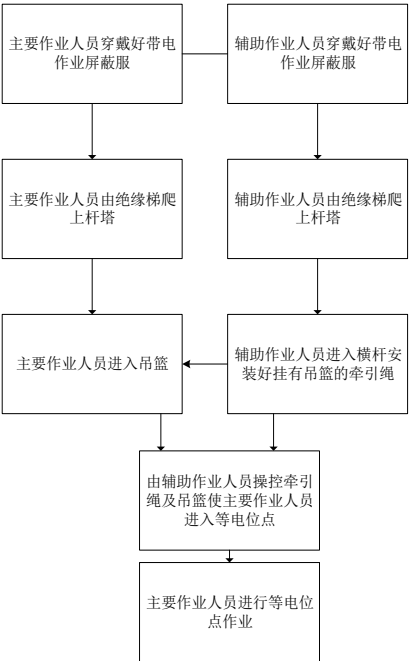


Fig.A2 Flowchart of live working when entering equipotential point

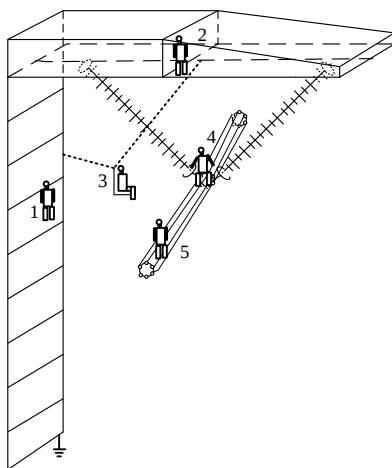


图 A3 带电作业的典型位置

Fig.A3 Typical locations in live working

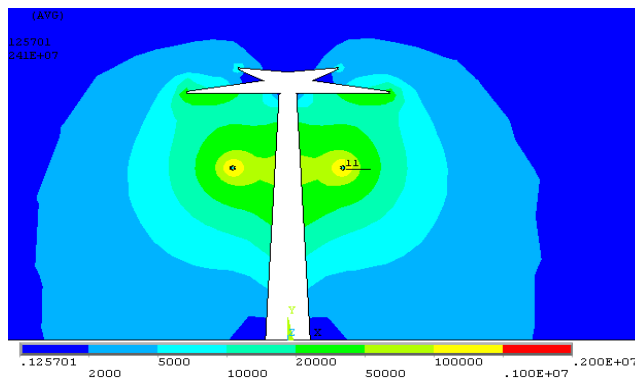


图 A4 杆塔周围电场强度分布特性云图

Fig.A4 Cloud diagram of electric field distribution around tower

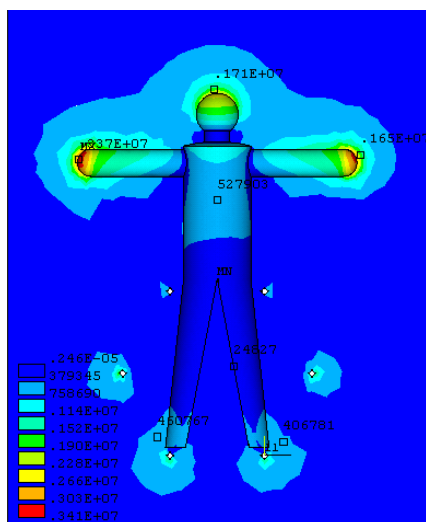


图 A5 人体体表电场分布图

Fig.A5 Electric field distribution on human body surface

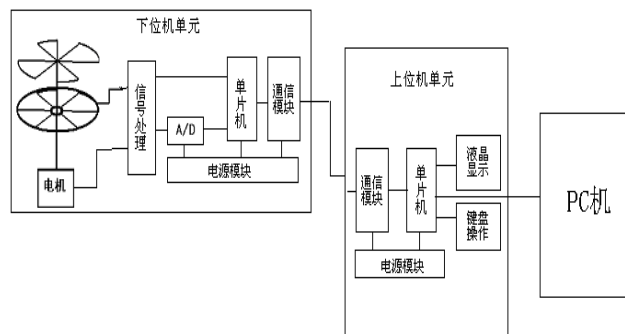


图 A6 直流合成场测量装置的原理图
Fig.A6 Principle diagram of DC synthetic field measuring device

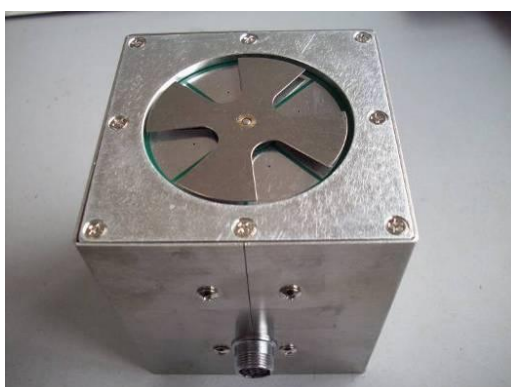


图 A7 下位机单元
Fig.A7 Schematic diagram of lower computer



图 A8 装置整体连接图
Fig. A8 Overall connection diagram of device



图 A9 电场实地测量图

Fig.A9 Field measurement of electric field

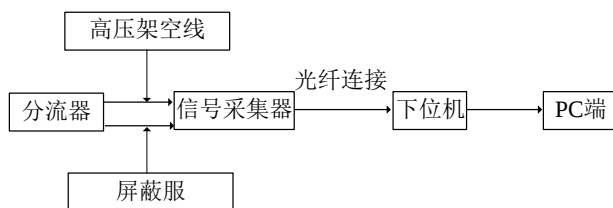


图 A10 电流传感器原理图

Fig.A10 Schematic diagram of current sensor

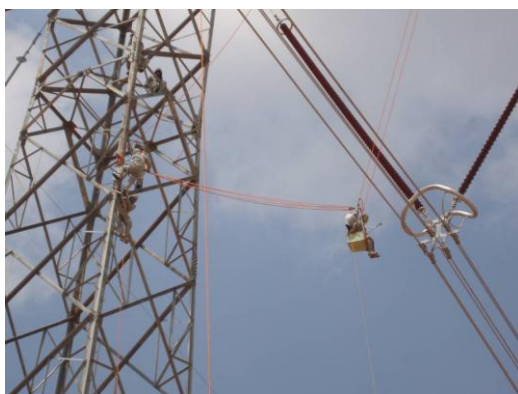


图 A11 模拟人实验

Fig.A11 Simulated human experiment