

±800 kV直流输电线路带电作业的屏蔽防护

李庆峰, 廖蔚明, 丁玉剑, 范建斌

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100192)

Shielding Protection for Live Working on ±800 kV DC Transmission Line

LI Qing-feng, LIAO Wei-ming, DING Yu-jian, FAN Jian-bin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In the context of the fact that ±800 kV DC transmission line will be built and put into operation in China soon, and the electric field intensity in the surrounding space of ±800 kV DC line is stronger than that of 500 kV and lower voltage level line. To ensure the safety of live working on ±800 kV DC line, the levels which safety protection should meet were analyzed firstly, then the security measures with which people conduct live working on ±800 kV DC line were tested and studied, including measurements of the electrical field intensity inside and outside of screening clothes, the current flowing through both screening clothes and human body. Test results show that screening clothes are safe and feasible, which should be applied during live working on ±800 kV DC transmission lines.

KEY WORDS: ±800 kV DC transmission line; ultra high voltage power transmission; screening clothes; live working

摘要: ±800 kV直流输电线路即将在我国建成投运, 其空间场强要高于 500 kV及以下电压等级的输电线路。为保证±800 kV直流输电线路带电作业的安全可靠进行, 首先分析了带电作业屏蔽防护应达到的安全控制水平, 然后对±800 kV直流输电线路带电作业人员的安全防护措施进行了试验研究, 试验内容包括屏蔽服内外电场强度的测量、流过屏蔽服和人体的电流的测量。试验结果表明, 穿戴全套屏蔽用具进行±800 kV直流输电线路带电作业是安全可行的。

关键词: ±800 kV直流线路; 特高压输电; 屏蔽服; 带电作业

0 引言

由于直流输电线路电压及电晕的作用, 导线附近空间存在带电粒子, 带电粒子在直流电场作用下定向移动形成空间离子流, 直流输电线路周围的电场为直流静电场和空间离子流场的综合场。直流输电线路带电作业中, 影响作业人员安全的主要因素是强直流电场的作用和电晕产生离子流的作用^[1-7]。

目前 500 kV及以下电压等级线路的带电作业研究已比较成熟, 国网电力科学研究院对 1 000 kV交流线路开展了带电作业研究^[8-20], 文献[21]的作者对±800 kV直流输电线路的带电作业方式开展了试验研究。在±800 kV直流输电线路带电作业时, 由于所处的场强远高于 500 kV及以下电压等级, 作业人员安全所受的影响更大, 有必要对带电作业的屏蔽防护进行试验研究, 以限制流入人体的空间离子电流和屏蔽直流综合场, 从而保障直流电场中作业人员的安全。

1 屏蔽防护的安全控制水平

1.1 流经人体直流电流的安全值

关于带电作业时允许流过人体的安全电流限值, GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》^[22]规定流经人体的持续交流电流<50 μA。由于人体对直流电流的反应不如对交流电流的敏感, IEC推荐直流与交流有效值影响效应的等效比值为 2~4。为增大安全裕度和作业人员的身体舒适度, 本文将±800 kV带电作业时允许流经人体的持续直流电流限值也定为<50 μA。

1.2 人体直流电场控制值

直流暂态电击给人的感觉与电击电流的大小有关^[2]: 电击电流小于 1 mA时, 人无感觉; 电击电流达 5 mA时, 人有轻微的刺激感; 电击电流达 9 mA时, 人有不舒服的电击感, 肌肉未失控; 电击电流达 62 mA时, 人会感到疼痛的电击, 但肌肉未失控, 99.5%的人能摆脱。

关于人体在直流电场作用下的感受, 中国电力科学研究院在天广±500 kV直流工程调试期间, 曾进行过直流输电线下人的直接感受试验^[3]。试验结果表明: 毛发和皮肤对直流电场最敏感。在地面电场

强度小于 30 kV/m 的地方, 皮肤感觉不明显; 在地面电场强度达到 30 kV/m 的地方, 外露皮肤有微弱刺激感; 在地面电场强度达到 35 kV/m 的地方, 外露皮肤有较明显的刺激感; 在地面电场强度达到 38 kV/m 的地方, 外露皮肤有很明显的刺激感; 在地面电场强度达到 44 kV/m 的地方, 外露皮肤有很强烈的刺激感。

GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》^[22]规定, 交流带电作业时人体裸露部分局部最大交流场强应 ≤ 240 kV/m, 屏蔽服内 ≤ 15 kV/m。由于人对同一电场值下直流的感知水平低于对交流的, 本文将 ± 800 kV 带电作业时人体裸露部分允许的最大直流场强限值也定为 ≤ 240 kV/m, 屏蔽服内 ≤ 15 kV/m。

1.3 屏蔽用具的防护性能

带电作业安全防护服装主要是带电作业用屏蔽服。对于 500 kV 电压等级以下的屏蔽服中国已有国家标准^[4], 对于 1 000 kV 交流和 ± 800 kV 直流带电作业用屏蔽服目前还没有国家标准可循, 但国内已有生产厂家试制了 1 000 kV 交流带电作业用屏蔽服。

在直流带电作业中, 屏蔽服的主要功能是屏蔽直流电场、旁路暂态电流、阻隔离子流、代替电位转移棒等。

成套的屏蔽服包括上衣、裤子、帽子、面罩、手套、短袜、鞋子以及相应的连接线和连接头。GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》^[22]规定, 屏蔽服应具有较好的屏蔽性能、较低的电阻、适当的载流容量、一定的阻燃性和较好的服用性能。整套屏蔽服各部件应经过 2 个可拆卸的连接头进行可靠的电气连接, 连接头在工作过程中不应脱开。屏蔽服各最远点间的电阻值应不大于 20 Ω , 各部分的电阻值要求详见表 1。

表 1 屏蔽服各部分电阻值的要求

Tab. 1 Resistance limit for each part of screening cloths for live working on ± 800 kV transmission lines

屏蔽服各部分	上衣	裤子	手套	短袜	鞋子
电阻值/ Ω	<15(最远端点之间)	<15(最远端点之间)	<15	<15	<500

由于 ± 800 kV 带电作业用屏蔽服所处的电压等级较高, 对其屏蔽效率的要求相应也较高。 ± 800 kV 带电作业研究中使用的屏蔽服型号与 1 000 kV 带电作业用屏蔽服相同, 该型号屏蔽服已经在国网电力科学研究院做过全面的检测试验, 认为已达到了 1 000 kV 带电作业对屏蔽服的技术要求^[5]。

屏蔽服各部分实测电阻值详见表 2, 可以看出, 本文试验所用屏蔽服各部分的电阻值均已达到

GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》^[22]规定的数值。

表 2 屏蔽服各部分电阻实测值

Tab. 2 Measured resistance of each part of screening clothes for live working on ± 800 kV transmission lines

屏蔽服各部分	上衣	裤子	手套	短袜
最小	13.5(最远端点之间)	14.5(最远端点之间)	13.5	14
电阻值/ Ω				

2 试验布置和试验设备

2.1 试验项目

为确定带电作业时屏蔽服在直流高电压下对电场的屏蔽效果, 分别在高压试验大厅和户外试验场, 用模拟人在不同作业方式下对屏蔽服的内、外直流电场强度以及流过屏蔽服和人体的电流进行了测量, 测量结果如表 3 所示。

表 3 ± 800 kV 直流带电作业屏蔽试验

Tab. 3 Shielding tests for live working on ± 800 kV transmission lines

试验项目	试验地点	试验方式
1	高压试验大厅	模拟人在地面上 模拟人在导线上
	户外试验场	模拟人从导线侧面接触导线 模拟人在导线上, 面向且离开均压环约 1 m 模拟人处于塔头立柱上与导线等高的位置
	高压试验大厅	模拟人在地面上
2	户外试验场	模拟人与导线等电位接触 模拟人与导线瞬时接触时的“拉弧”试验

注: 试验项目 1 为屏蔽服内、外直流电场强度测量; 试验项目 2 为流过屏蔽服和人体的电流测量。

2.2 高压试验大厅试验

试验在中国电力科学研究院的高压试验大厅内进行。试验大厅长 30 m、宽 40 m、高 26 m。直流高电压由 $\pm 1 500$ kV/50 mA 直流电压发生器产生, 并通过大尺寸的金属波纹管引到模拟导线上。模拟导线为 6 分裂结构, 长 15 m。子导线由直径 30 mm 的铁管焊接而成, 分裂间距 450 mm。模拟导线悬挂高度离地面 10 m, 离周围墙壁等接地体最小距离约 8 m。

2.3 户外试验场试验

试验在新建的国家电网公司直流特高压试验基地的户外试验场进行。用 60 m 高门型塔(净空尺寸 50 m \times 60 m)悬挂 ± 800 kV 直流仿真用模拟塔头间隙, 模拟塔头为实际杆塔的一个极。直流高电压由 $\pm 1 500$ kV/50 mA 直流电压发生器产生。

模拟塔头采用 V 型绝缘子串悬挂模拟导线, V 型串夹角为 90°。模拟导线为 6 分裂结构, 分裂直径为 900 mm, 子导线直径为 36.2 mm(模拟 6 \times

720 mm²导线), 导线总长 25 m。绝缘子导线侧均压环的外径为 1 120 mm, 管径为 120 mm。导线与横梁间距约 9.6 m, 与立柱间距约 9.5 m, 导线对地高度约 18 m。

3 蔽服内外直流电场强度的测量

3.1 测量仪器

测量直流电场用场强仪的工作原理是, 通过旋转叶片探头将被测直流电场转换成可测量的交变电场, 再通过采样电阻将信号取出。这种场强仪通常用于测量地面的直流场强, 最高量程为 200 kV/m。

3.2 高压试验大厅模拟试验

试验针对模拟人身穿屏蔽服站在模拟高压导线下方和骑坐在模拟高压导线上 2 种作业方式, 分别测量模拟人身体不同部位屏蔽服外和屏蔽服内的直流电场强度。

试验布置情况如图 1 所示, 模拟导线上施加不同电压时实测的模拟人身体不同部位的场强值见表 4 和表 5。模拟人站在地面上时, 屏蔽服接地, 根据测量的要求, 分别在模拟人头部、胸部等部位固定安放了直流场强仪, 测量该部位的直流场强。模拟人骑在导线上时, 试验时模拟人身穿全套屏蔽服, 骑坐在固定在模拟导线上的椅子上, 屏蔽服和导线短接, 头顶内外和胸部外分别安放直流电场测量探头。



(a) 模拟人在地面上 (b) 模拟人在导线上

图 1 高压试验大厅内模拟试验布置

Fig. 1 Test configuration in high voltage laboratory hall

表 4 模拟人站在地面上时身体不同部位的电场强度值

Tab. 4 Results of electric field measurement at each part of simulating body on the ground kV/m

导线电压/kV	地面	头顶帽外	头部面罩内	肩膀外	胸部衣外	胸部衣内
0	—	—	-0.40	-0.14	-0.20	-0.13
-100	-5.00	-40.00	-0.42	-11.00	-13.00	-0.14
-300	-16.00	-145.00	-0.50	-40.00	-37.00	-0.18
-400	-23.00	-183.00	-0.52	-65.00	-64.00	-0.26
-600	-34.00	—	-0.62	-112.00	-87.00	-0.55
-800	-49.00	—	-0.70	-137.00	-109.00	-0.77

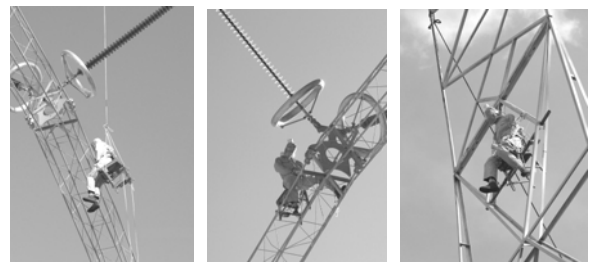
表 5 模拟人骑坐在导线上时身体不同部位的电场强度值
Tab. 5 Results of electric field measurement at each part of simulating body sitting on the line kV/m

导线电压/kV	头顶帽	头顶帽内	胸部外
0	-0.20	-0.83	-0.20
-100	-110.00	-0.83	-48.00
-200	-163.00	-0.83	-75.00
-300	<-200.00	-0.83	-88.00
-400	—	-0.83	-104.00
-600	—	-0.84	-125.00
-800	—	-0.86	-147.00

3.3 户外试验场模拟试验

模拟人身穿全套屏蔽服, 在导线上采取 2 种姿势测试: 一种姿势是模拟人取坐姿固定在木椅上通过绝缘绳悬吊从导线侧面接触导线(作业方式 1), 模拟人离开均压环约 1.5 m, 头部高出导线约 0.3 m, 背部离开导线约 0.5 m, 如图 2(a)所示; 另一种姿势是模拟人骑在导线上(作业方式 2), 面向均压环, 离开均压环约 1 m, 如图 2(b)所示。此外, 还在塔头立柱上与导线等高的位置(作业方式 3)对模拟人进行了测试, 如图 2(c)所示。测量结果参见表 6~8。

由表 4~8 可以看出, 在导线上施加直流高电压的情况下, 带电作业人员无论是站在高压导线下方, 位于杆塔立柱上或处于等电位作业时, 屏蔽服外表面均存在很高的直流场强, 尤其是头顶部突出部位的电场强度更高。等电位作业时屏蔽服外表面的电场强度要比地电位作业时的高。



(a) 作业方式 1 (b) 作业方式 2 (c) 作业方式 3

图 2 户外试验场内模拟试验布置情况

Fig. 2 Test configuration at outdoor test site

表 6 模拟人从导线侧面接触导线时的电场强度测量结果

Tab. 6 Results of electric field measurement at each part of simulating body by the side of the line kV/m

导线电压/kV	头顶帽内	后背衣外	导线电压/kV	头顶帽内	后背衣外
0	-0.24	—	0	-0.22	—
-400	-0.24~-0.25	-150.00	400	-0.22~-0.23	151.00
-500	-0.22~-0.25	-163.00	500	-0.20~-0.23	163.00
-600	-0.22~-0.25	-173.00	600	-0.20~-0.23	170.00
-700	-0.23~-0.26	-181.00	700	-0.19~-0.22	180.00
-800	-0.23~-0.27	-191.00	800	—	—

表 7 模拟人骑在导线上时的电场强度测量结果

Tab. 7 Results of electric field measurement at each part of simulating body sitting on the line kV/m

导线电压/kV	头顶帽外	头顶帽内	胸部衣内
0	—	-0.39	-0.63
-100	-106.00	-0.39	-0.63
-300	<-200.00	-0.39~0.40	-0.63~-0.64
-600	—	-0.39~0.42	-0.63~0.65
-800	—	-0.40~0.45	-0.64~0.67
0	—	-0.40	-0.65
100	97.00	-0.40	-0.65
300	>200.00	-0.39~0.40	-0.64~0.65
600	—	-0.38~0.40	-0.63~0.65
800	—	-0.36~0.40	-0.61~0.64

表 8 模拟人在塔头立柱上时的电场强度测量结果

Tab. 8 Results of electric field measurement at each part of simulating body by the side of tower kV/m

导线电压/kV	头顶帽外	膝盖外
0	—	—
-300	-40.00	-55.00
-500	-75.00	-104.00
-700	-102.00	-154.00
-800	-106.00	-162.00
0	—	—
300	32.00	41.00
500	65.00	83.00
700	99.00	126.00
800	104.00	143.00

在+800 kV和-800 kV直流电压下等电位作业时, 人体头部外表面电场强度的绝对值已远高于 200 kV/m, 超出了试验所用场强仪的测量范围。人体背部等较平坦部位的场强略低一些, 但也达到了很高的水平。因此带电作业时穿着全套屏蔽服是必须的防护措施。

地电位作业时人体表面的场强与人体到导线的距离有关, 距离越远场强越低; 同时朝向导线方向的突出部位表面场强会相对高一些, 而受突出部位屏蔽、侧向或背向导线的部位其表面场强会相对低一些。因此作业人员在导线下方时由于离导线的距离较远, 身体表面的场强相对较低些, 而当沿着塔身立柱向上爬升时, 身体表面的场强将逐渐升高, 直至到达与导线水平位置时, 与导线间的距离最小, 身体表面的场强达到相对最高值, 如导线电压为-800 kV时, 人体突出部位的表面场强可达到-160kV/m的水平。

尽管在高电压下人体外表面场强达到了很高数值, 如等电位作业时人体头部外表面场强远高于 200 kV/m, 但屏蔽服内测量到的场强很低。如在导线上施加+800 kV或-800 kV直流试验电压的情况下, 屏蔽服内的场强值远低于带电作业允许的场强值 15 kV/m, 表明试验使用的屏蔽服具有良好的屏蔽效

果, 完全能满足±800kV级直流输电线路带电作业的要求。

4 流过屏蔽服和人体电流的测量

4.1 测量原理

屏蔽服内流经人体的电流测量回路如图 3 所示。图中: C_1 为人体与屏蔽服间的电容; C_2 为屏蔽服与大地间电容; I_1 为流经屏蔽服和人体的总电流; I_2 为流经人体的电流。

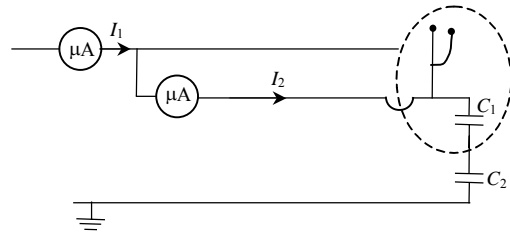


图 3 流经屏蔽服及人体电流的测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of measurements of current flowing through screening clothes and human body

测量流过人体的电流时, 试验人员身穿的屏蔽服在裤脚处通过裸铜线直接接地, 试验人员手握屏蔽测量线一端, 屏蔽测量线另一端与电流表测量端连接, 屏蔽线的屏蔽层和电流表的接地端与地连接。模拟导线施加直流高压后, 空间离子电流向地面流动, 部分离子电流流过试验人员穿的屏蔽服入地, 同时少量穿透屏蔽服的电流流过人体经测量线和电流表入地。此时测到的电流即是流经人体的电流。

4.2 高压试验大厅模拟试验

试验中真人身穿全套屏蔽服站在模拟导线下方, 分别测量流过屏蔽服和人体的电流。试验现场照片和测试结果分别如图 4 及表 9 所示。

从试验结果可以看出, 由于没有风的影响, 模拟导线产生的离子竖直飘向地面。作业人员身穿屏蔽服站在模拟导线下方时, 会有较多的离子流通过屏蔽服表面。当导线电压为-800 kV时, 流过屏蔽



(a) 流过屏蔽服的电流测量

(b) 流经人体的电流测量

图 4 流过屏蔽服和人体电流的测量试验照片

Fig. 4 Photos of measurements of current flowing through screening clothes and human body

表9 流过屏蔽服和人体电流的测量结果

Tab. 9 Results of measurements of current flowing through screening clothes and human body

导线电压/kV	流过屏蔽服电流/ μA	流过人体电流/ μA
-100	-0.04	-0.01
-300	-2.10	-0.07
-500	-11.30	-0.41
-700	-34.00	-0.72
-800	-51.00	-0.82

服的离子电流可超过 $50 \mu\text{A}$ ，而此时流过人体的电流不足 $1 \mu\text{A}$ ，远低于规定的 $<50 \mu\text{A}$ 的水平。

4.3 户外试验场模拟试验

试验包括2项内容：一项是模拟人与导线等电位接触时流过人体电流的测量；另一项是模拟人与导线瞬时接触时的“拉弧”试验。试验布置分别如图5和图6所示，测试结果分别如表10和表11所示。



图5 模拟人与导线等电位接触时流过屏蔽服电流的测量布置照片

Fig. 5 Photo of measurement of current flowing through screening clothes and simulating body by the side of line



图6 拉弧试验的布置照片

Fig. 6 Photo of measurement of creature equipotentialing

表10 模拟人与导线等电位接触时流过屏蔽服电流的测量结果

Tab. 10 Results of measurement of current flowing through screening clothes and simulating body by the side of line

导线电压/kV	流经屏蔽服电流/ μA	导线电压/kV	流经屏蔽服电流/ μA
700	75	-700	-65
750	100	-750	-90
800	117	-800	-106

表11 拉弧试验结果

Tab. 11 Results of measurement of creature equipotentialing

导线电压/kV	拉弧电流绝对值/A	导线电压/kV	拉弧电流绝对值/A
500	<30	-500	<32
700	<54	-700	<46
800	<77	-800	<72

从户外试验场上模拟人等电位与导线接触时流过屏蔽服的电流测量结果可知，在 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路上等电位作业时，流过作业人员屏蔽服的电流约为 $120 \mu\text{A}$ 。根据高压试验大厅内测得的作业人员站在模拟导线下方流过屏蔽服和人体的电流值推算，在 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路上等电位作业时流过作业人员身体的电流约为 $2.4 \mu\text{A}$ ，远低于规定值 $50 \mu\text{A}$ ，表明试验使用的屏蔽服对离子电流有良好的屏蔽效果，能满足 $\pm 800 \text{ kV}$ 级直流线路带电作业的要求。

从户外试验场模拟人与导线接触时的拉弧试验结果可知，带电作业人员由地电位进入等电位过程中，与 $\pm 800 \text{ kV}$ 导线相距 $10\sim 20 \text{ mm}$ 时才会出现拉弧放电，放电时测到的最大瞬时电流小于 77 A ，因此没有必要采用电位转移棒等措施减小接触电流或避免电弧灼伤。

5 结论

1) 在 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流电压下等电位作业时，屏蔽服外表面将存在很高的直流场强，远高于 200 kV/m ，尤其是头顶部突出部位的电场更高，带电作业时穿着全套屏蔽服是必须的防护措施。

2) 屏蔽服内的场强值远低于带电作业允许的场强值 15 kV/m ，表明试验使用的屏蔽服具有良好的屏蔽效果，完全能满足 $\pm 800 \text{ kV}$ 级直流输电线路带电作业的要求。

3) 无论是地电位作业还是等电位作业，作业人员必须穿着全套屏蔽服。屏蔽服衣内的最高直流场强可保证低于 $0.5\sim 1 \text{ kV/m}$ ，远小于 15 kV/m 的规定值。

4) $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路等电位作业时，流经作业人员屏蔽服的电流约 $120 \mu\text{A}$ ，经屏蔽服衰减后流经人体的电流仅数 μA ，远小于 $50 \mu\text{A}$ 的规定值，因此屏蔽服可有效地对流经人体的电流起到防护作用。

5) 从拉弧试验结果可知，带电作业人员由地电位进入等电位过程中，与 $\pm 800 \text{ kV}$ 导线相距 $10\sim 20 \text{ mm}$ 时才会出现拉弧放电，拉弧时测到的最大瞬时电流小于 77 A ，因此没有必要采用电位转移棒等措施减小接触电流或避免电弧灼伤。

参考文献

- [1] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [2] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程

- 学报, 2007, 27(31): 3-8.
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 3-8(in Chinese).
- [3] 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 3-8.
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, Zhou Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 3-8(in Chinese).
- [4] 张文亮, 陆家榆, 鞠勇, 等. ± 800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 3-8.
Zhang Wenliang, Lu Jiayu, Ju Yong, et al. Design consideration of conductor bundles of ± 800 kV DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(27): 3-8(in Chinese).
- [5] 杨勇, 鞠勇, 陆家榆, 等. 极导线垂直和水平排列 ± 500 kV 直流输电线路的电磁环境比较分析[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 71-75.
Yang Yong, Ju Yong, Lu Jiayu, et al. Comparative analysis on electromagnetic environment of ± 500 kV DC transmission lines with vertical and horizontal pole arrangements[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 71-75(in Chinese).
- [6] ESMOL Subcommittee. Minimum number of good (healthy) porcelain or glass in sulator units in a string for live work[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(3): 806-814.
- [7] 陆家榆, 鞠勇. ± 800 kV 直流输电线路电磁环境限值研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 37-42.
Lu Jiayu, Ju Yong. Study on the limits of electromagnetic environment of ± 800 kV DC transmission lines[J]. Electric Power, 2006, 39(10): 37-42(in Chinese).
- [8] 邵瑰玮, 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(in Chinese).
- [9] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 1 000 kV 级交流输电线路带电作业的试验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 8-13.
Hu Yi, Wang Linong, Shao Guiwei, et al. Experimental investigation on live working for 1000 kV AC transmission Line[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 8-13(in Chinese).
- [10] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 1 000 kV 交流特高压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(in Chinese).
- [11] 王力农, 胡毅, 邵瑰玮, 等. 1 000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 78-82.
Wang Linong, Hu Yi, Shao Guiwei, et al. Research on minimum approach distance for live working on 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 78-82(in Chinese).
- [12] 刘凯, 胡毅, 王力农, 等. 1 000 kV 输电线路带电作业保护间隙的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 83-88.
Liu Kai, Hu Yi, Wang Linong, et al. Research on portable protective gaps for live working on 1000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 83-88(in Chinese).
- [13] 张仁豫. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 79-132.
- [14] 蒋兴良, 苑吉河, 孙才新, 等. 我国 ± 800 kV 特高压直流输电线路外绝缘问题[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 1-9.
Jiang Xingliang, Yuan Jihe, Sun Caixin, et al. External insulation of ± 800 kV UHV DC power transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 1-9(in Chinese).
- [15] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of UHV DC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [16] 于永清, 李光范, 宿志一, 等. 特高压直流试验基地建设[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 10-14.
Yu Yongqing, Li Guangfan, Su Zhiyi, et al. Construction of UHV DC test base station[J]. Electric Power, 2006, 39(10): 10-14(in Chinese).
- [17] 马为民, 李亚男, 周静. 特高压直流输电系统可靠性和可用率指标研究[J]. 电力设备, 2007, 8(3): 85-88.
Ma Weimin, Li Yanan, Zhou Jing. Reliability and availability index study of UHVDC system[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 85-88(in Chinese).
- [18] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
Shu Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8(in Chinese).
- [19] 赵杰. 高压直流输电的前沿技术[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 1-6.
Zhao Jie. HVDC transmission technologies at the frontier[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 1-6(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 范建斌, 廖蔚明, 李庆峰, 等. ± 800 kV 直流输电线路带电作业方式的试验研究[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 7-12.
Fan Jianbin, Liao Weiming, Li Qingfeng, et al. Experimental research on live-line operation for ± 800 kV DC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(7): 7-12(in Chinese).
- [22] 全国带电作业标准化技术委员会. GB/T 6568—2008 带电作业用屏蔽服装[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.



李庆峰

收稿日期: 2009-09-30.

作者简介:

李庆峰(1977—), 男, 主要从事高电压试验技术、绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作, liqf@epri.sgcc.com.cn;

廖蔚明(1951—), 男, 教授级高级工程师, 从事高电压外绝缘方面的试验研究工作, liaowm@epri.sgcc.com.cn;

丁玉剑(1982—), 男, 工程师, 主要从事高电压输电技术和输变电外绝缘技术、带电作业等方面的研究, dingyj@epri.sgcc.com.cn;

范建斌(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和输变电设备外绝缘方面的研究工作, fanjb@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)