

# 特高压直流输电线下的直流离子流电场

邵超 秦松林 肖登明

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

**摘要** 针对特高压直流输电导线发生电晕的情况, 采取测量试验来探究直流导线产生电晕以后导线下方的离子流对地面电场的影响。通过试验, 得出直流导线产生电晕以后导线下方的合成场强、标称场强、空间电荷场强分别与导线电位成线性关系, 正、负极导线放电电晕情况有差异以及标称场强在合成场强中的比重随高度变化而改变等。

**关键词:** 特高压直流输电; 电晕; 离子流; 标称场强; 空间电荷

## DC Ion Flow Field under UHVDC Transmission Lines

Tai Chao Qin Songlin Xiao Dengming

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract** For the situation that the electric corona happens on UHVDC transmission lines, a measure experiment to study the effect of ion flow on the ground electric field under the DC-wire after the electric corona appearing is proposed. By the experiment, the linear relation between the total electric field strength, the nominal electric field strength, the electric field strength of space charges and wire potential separately under the DC-wire after the electric corona appearing, the differences between corona discharge of positive and negative wire, the proportion of nominal electric field strength changing in total field strength with its height are obtained.

**Key words:** UHVDC transmission; electric corona; ion flow; nominal electric field; space charges

与高压交流输电相比, 高压直流输电在长距离、大容量输送电力方面有明显优势, 采用特高压直流输电能够有效地节约线路走廊、有助于改善网络结构和实现大范围的资源优化配置, 经济和社会效益十分明显<sup>[1-3]</sup>。但我国的高压直流输电技术经验尚浅, 特高压直流示范工程<sup>[4-5]</sup>尚无实际运行经验可循。随着电压等级从 $\pm 500\text{kV}$ 提高到 $\pm 800\text{kV}$ , 面临的问题也将更加突出, 其中特高压直流输电线路产生的电磁环境问题受到了专家和学者的广泛关注。

目前国内已有一些学者对特高压直流输电线下的合成场强及其受电晕影响的情况进行了一定的理论计算研究<sup>[6-7]</sup>, 而鲜有定量的试验研究。

当直流导线表面的电场强度超过空气的击穿强度时, 导线表面会发生电晕放电<sup>[8-10]</sup>, 电晕放电会将空气分子电离成空间电荷。当发生电晕时, 直流电压极性固定, 在导线之间和导线与大地之间的整个空间将充满运动的带电离子, 在电场力的作用下向地面连续移动形成离子流。由于空间充满离子,

即空间电荷, 它们也产生电场, 所以特高压输电线下地面附近的场强是空间电荷产生的电场与标称场一起形成的合成场强。

在试验室环境中进行试验, 可以避免可预见的其他外力的影响。本文研究空间电荷对特高压输电线路下合成电场的影响, 对正确认识特高压输电线路下的电场性质具有重要意义。

## 1 试验装置及方法

试验装置连接示意图如图 1 所示。

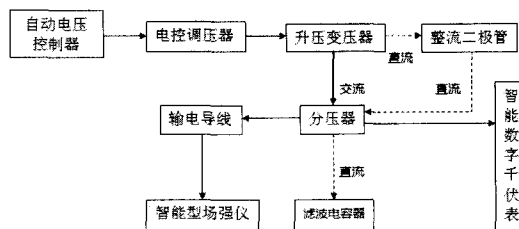


图 1 试验装置连接示意图

1) 试验导线: 试验一共用了 5 条导线, 每条导

线采用 3 组高度来测量场强，测量点分别选择在导线垂直下方和斜 45°角处。

表 1 试验导线的参数

导线参数/mm	0.5	1.78	2.3	3.08	3.92
结构	单芯裸线	单芯裸线	单芯裸线	单芯裸线	裸绞线
长度/m	6	6	6	6	
试验中导线的高度/cm	80, 90, 100.5	76, 86, 96	77, 86, 99	56, 67, 96	74.5, 84, 96

2) 场强测量装置: 将旋转伏特计式场强仪放在导线下方用于探测场强, 其输出与一台能读出直流场强与交流场强的仪器相连, 不用移动场强仪, 在显示仪器上便可读出同一地点的交流、直流场强的大小, 试验中的场强数值不会超过 100kV/m。

3) 测量点的选取: 选择两个测量点, 一个是导线正下方垂直位置, 另一个是偏移垂直位置  $h$  距离,  $h$  为当时的导线高度。

4) 高压电源装置: 交流电源电压有效值最高可升到 60kV; 直流电源由交流电源整流获得, 最高可达 80kV。

试验在试验室中进行, 避免了受到自然外力如风力、雨水等以及其他电磁信号干扰对测量信号的影响; 实时温度为 26~32℃左右, 天气以晴好天气为主。

接通电源后, 通过自动电压控制器的控制按钮, 可以把调节电源电压的信号输入给电控调压器; 电控调压器再将电压信号传送给变压器, 电压等级经过变压器放大后, 经二极管(直流时)或直接(交流时)输入至分压器, 在此处连接智能的数字千伏表可显示出导线的输入电压数值; 在导线通电后, 会在周围产生电场, 使用场强仪就可以进行场强的测量了。

交流时, 测得的场强既是合成场强, 也是导线场强; 直流时, 测得的是合成场强, 即导线场强与空间电荷场强之和。

## 2 试验结果及分析

1) 导线直径为 0.5mm, 距地高度为 90cm, 场强仪在导线垂直下方, 在交流、直流情况下获得的场强-电压关系图(横轴-电压, 单位为 kV; 纵轴-场强, 单位为 kV/m)如图 2、图 3 所示。

由于直流输电线路下的离子流电场是在导线起晕后产生的, 所以本试验所有试验数据均记录导线起晕后的试验数据用于分析。因此, 场强-电压曲线都是以起晕电压为起点, 而不是从零点开始。

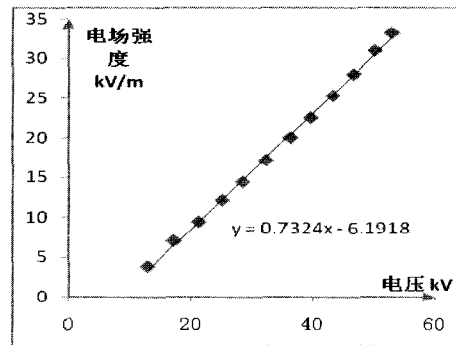


图 2 0.5mm、90cm 的交流导线在电压不同时的电场强度

标称场, 即由输电导线电位产生的电场属于静电场的一种; 又由于在试验过程中, 我们只测量导线中间一小段的场强, 所以可以把导线当成无限长直导线来处理, 因此, 可以用高斯定理来计算标称场强数值。

设导线半径为  $r_0$ , 距离地面高度为  $h$ , 距离导线  $r$  处的电场强度  $E$  与导线电压  $U$  的关系如式(1)所示。

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{h}{r_0}} \quad (1)$$

因此, 当导线高度一定时, 在导线外某一点,  $E \propto U$ , 即导线电位与其在地面固定点的电场强度是一个线性关系, 电场的极性取决于导线电位的极性。图 2 中的线性关系式是对试验数据采用线性回归方法得到的, 用交流电压获得的导线电位对地面场强的线性回归公式可以用于直流电压下地面场强的计算。交流电压试验的数据用于计算统一几何参数下的场强-电压的线性回归表达式, 而直流电压试验中标称场强数值是用上述线性回归表达式计算出来。对于每一条导线, 在每一个高度下都需要先求出场强-导线电压的线性关系式, 然后计算得到直流导线在不同电压值处的场强值。

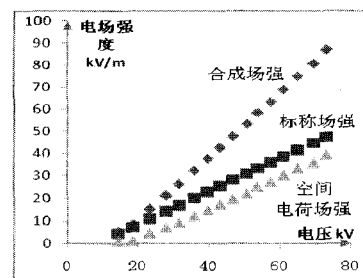


图 3 0.5mm、90cm 的直流导线在电压不同时的合成场强、标称场强和空间电荷场强

图3中,从上到下,三条曲线依次为合成场强、标称场强和空间电荷场强,试验中合成场强与标称场强的比例大小与文献[11]相符合。

2) 导线直径为 0.5mm, 距地高度为 80cm, 场强仪分别位于直流导线垂直下方和偏离垂直位置 80cm, 直流导线下方获得的场强-电压关系图(横轴-电压, 单位为 kV; 纵轴-场强, 单位为 kV/m) 如图 4 所示。

在图 4、图 5 中, 从上到下, 3 条曲线依次为总场强、导线场强和空间电荷场强(三角)。在较细导线的合成场强中, 标称场强与空间电荷产生的场强基本相等, 试验中合成场强与标称场强的比例大小与文献[11]相符合。

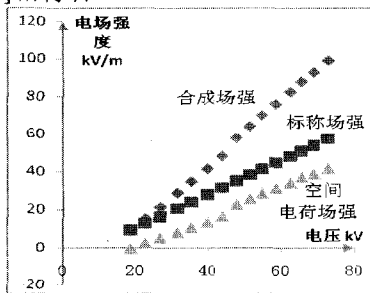


图 4 0.5mm、80cm 直流导线在电压不同时的合成场强、标称场强和空间电荷场强(场强仪在导线垂直下方)

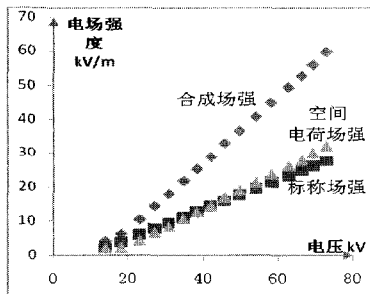


图 5 0.5mm、80cm 的直流导线在电压不同时的合成场强、标称场强和空间电荷场强(场强仪在导线下方距离垂直位置 80cm)

从场强仪位于导线正下方的试验数据可见, 导线电位分别与标称场强、空间电荷场强的关系直线近乎平行, 如图 3、图 4、图 6 所示。

在导线较细时, 如 1mm 左右, 空间电荷产生的场强数值比标称场强值小平均 30%左右; 随着线径的增大, 二者相差增大, 即标称场强占合成场强中的比重增大。

3) 导线直径为 1.78mm, 距地高度为 96cm, 场强仪在导线垂直下方和偏移下方垂直位置 96cm, 在直流情况下获得的场强-电压图(横轴-电压, 单位为 kV; 纵轴-场强, 单位为 kV/m) 如图 6、图 7 所示。

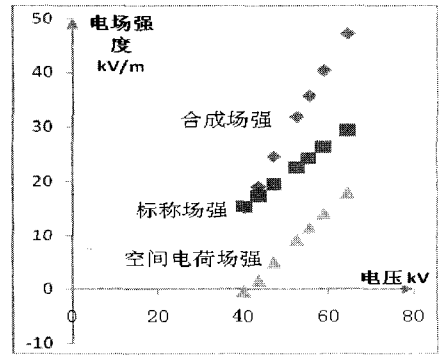


图 6 1.78mm、96cm 的直流导线在电压不同时的合成场强、标称场强和空间电荷场强(场强仪在导线垂直下方)

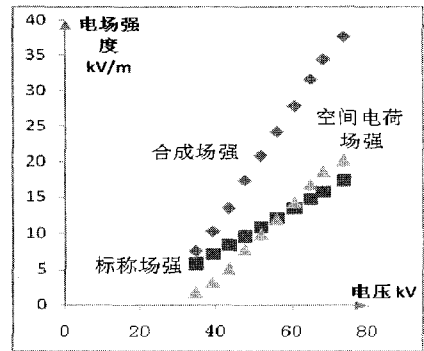


图 7 1.78mm、96cm 的直流导线在电压不同时的合成场强、标称场强和空间电荷场强(场强仪在导线下方距离垂直位置 96cm)

在图 6、图 7 中, 从上到下, 3 条曲线依次为总场强、导线场强和空间电荷场强(三角)。从场强仪位于导线斜下方(45°)的试验数据可见, 导线电位与标称场强、空间电荷产生场强的关系直线有交叉, 如图 5、图 7 所示。即低电场时, 空间电荷产生的场强要小于标称场强; 而高场强时, 空间电荷产生的场强要大于标称场强。在线径较小时相差不是很大, 一般相差值为标称场强的 10%~20%; 随着线径的增大, 差值也会增大。

### 3 结论

通过本次试验室中单导线试验所得试验数据, 可以得出以下直流导线产生电晕以后导线下方的合成场强、标称场强与空间电荷场强之间的一些关系。

1) 试验表明起晕后导线上的直流电位与导线下方地面上的合成场强、标称场强和空间电荷产生的场强成线性关系。

2) 试验表明正、负极导线放电电晕情况有差异。负极导线比正极导线的起晕电压、起晕场强低一些; 负极导线下的空间电荷场强平均值要比正极导线下

的略高；负极导线比正极导线的标称场强与空间电荷场强相差值占标称场强的比重略低。

3) 通过试验,可以发现随着高度的增加,总体上标称场强在合成场强中所占比重减小,合成场强最大值可达标称场强的 1.8~2.2 倍。

### 参考文献

- [1] 文亮,于永清,李光范,范建斌,宿志一,陆家榆,李博.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-2.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [3] 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).
- [4] 张文亮,吴维宁,胡毅.特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J].高电压技术,2003,29(9):20-22.
- [5] 刘振亚.特高压直流输电技术研究成果专辑[C].北京:中国电力出版社,2005.
- [6] 王毅,孙成秋,汤涛,郎需军,罗栋梁.不同运行方式下特高压直流输电线路的地面电场与离子流分布[J].电网技术,2008,32(2).
- [7] 林秀丽,徐新华,汪大攀.高压直流输电线路电场强度计算方法[J].浙江大学学报(工学版),2007,41(8).
- [8] Sanna M P. Corona performance of high-voltage transmission lines[M]. Hertfordshire, UK: Research Studies Press LTD, 2000.
- [9] 吴桂芳.我国±500kV 直流输电工程的电磁环境问题[J].电网技术,2005,29(11):5-8.
- [10] 冀焕,邹军,刘杰,等.高压直流双回输电线路合成电场和离子流的计算[J].电网技术,2008,32(2).
- [11] 铁兵,冯晗,王琦,崔翔.特高压直流输电线下合成电场分布的影响因素[J].高电压技术,2009,35(9).

### 作者简介

邵超(1987-),男,硕士生,专业为高电压与绝缘技术。

秦松林(1949-),男,高级工程师,上海电机工程学会会员,主要从事管理和指导高电压试验和高电压试验设备;研究和开发新型试验技术和试验设备。

肖登明(1953-),男,博士,教授,主要研究方向为气体放电与气体绝缘、电力设备在线监测与故障诊断、电工新技术与新能源。

## News 新闻与动态

### 台达模块化 UPS 入选中国电信集中采购项目

日前,台达模块化 UPS 再传捷报。在 2011 年年底开始的中国电信模块化 UPS 集中采购项目中,台达模块化 UPS 经过多项严格的产品测试,在与多家国内外知名品牌厂商的激烈竞争中,争取到标段一 5 个项目的中标资格,凭借良好的品质和优质的服务,获得中国电信全体评委的青睐和认可,最终顺利成为 2011~2012 年度中国电信集团模块化 UPS 核心合作伙伴。

此次中国电信模块化集中采购在通信业内首开先河,前期考察慎之又慎,要求十分严格。特别是在 3G 时代下,云计算、三网融合、大集中管理等让中国电信的网络系统面临巨大的挑战,电源系统作为整个网络的核心基础动力保障和支撑系统,承担保障通信网络全网稳定运行的重要职责。不仅仅对可靠性提出了更高的要求,同时对可维护性、效率方面也比过往项目的需求更严苛。中国电信对主流厂商的研发、产品、供货、服务支撑能力等因素进行了综合考评,从中遴选出优秀合作伙伴,作为集采选型认证供应商。

台达作为全球领先的高端 UPS 制造商,成功中标有几

个关键因素:核心的技术研发实力,严谨的品质管控和标准化的批量生产,展现给客户高可靠、高性价比的产品。这次对模块化 UPS 各项要求特别高,如模块化的热插拔功能、逻辑控制功能、监控功能、过载能力等,台达模块化 UPS 不仅全部满足,部分指标表现优异更甚中国电信的要求。

在评标阶段,中国电信模块化集中采购项目组综合考量评估各大厂商的产品、技术、价格、服务等指标,并作出综合排名。台达 UPS 除产品表现出色外,优秀的客户售后服务也为本次成功入选加分不少。中达电通始终关注客户最急迫的需求,通过全国 41 个分公司及服务网点为中国电信提供全天候、专业化技术支持和快速服务。并且,中达电通还定期为中国电信提供多层次的技术培训,为其培养专业的本地维护人员,使其提前了解产品升级知识,并加强排除设备的能力,如此周密的服务体系给中国电信提供了有力保障,解除了后顾之忧。

(台达公司 UPS 产品开发处 叶新平 供稿)