

# ±1100 kV 换流站户内直流场巡检方案研究

包维瀚<sup>1</sup> 郭贤珊<sup>2</sup> 丁晓飞<sup>1</sup> 骆玲<sup>1</sup> 付颖<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 2. 国家电网公司, 北京 100031)

**摘要:** ±1100 kV 是特高压直流输电工程中的全新电压等级, 伴随电压等级的提升, 系统过电压水平也相应有了显著的提高, 空气净距大幅增加。出于对运检人员人身安全的考虑, ±1100 kV 带电设备对人的安全净距应按照理论放电概率为0的距离校核, 即33 m。如果考虑户内直流场允许运检人员进入, 则会极大地增加建筑物的尺寸, 造价高昂, 同时由于巨大的空气净距要求使得运检人员无法靠近带电设备。为了解决这一矛盾, 提出了一种双层屏蔽的护笼并阐述了其设计方案, 基于这种护笼继而提出了地面巡视走道、地面巡视小车等两种巡检方案, 通过这些方案, 使得运行人员的安全要求得以满足, 同时大幅节省了±1100 kV 户内直流场的建造费用。

**关键词:** ±1100 kV; 户内直流场; 安全净距; 双层屏蔽笼; 巡检方案

**Abstract:** ±1100 kV is a new voltage level for HVDC transmission projects. Along with the rising of voltage level, overvoltage level is increased significantly, which brings a sharp rise of air clearance. For the sake of the operators' safety, the air clearance between the electrode and human body should be guaranteed to be 0 according to the theoretical discharge probability, that is, 33m. Therefore, if operators are admitted to enter the indoor DC field, a tremendous dimension is required for the building, which brings huge cost, and meanwhile, it is not convenient to observe the equipment from far away. In order to solve this problem, a double layer shielding cage is proposed, and its design structure is illustrated. Based on this cage, two inspection schemes are proposed, namely the aisle scheme and rail car scheme. The application of these schemes satisfies the work requirements of the operators and spares the cost of the construction.

**Key words:** ±1100 kV; indoor DC field; air clearance; double layer shielding cage; inspection scheme

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0026-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.006

## 0 引言

±800 kV 是迄今为止世界上已经投运的直流输电工程的最高电压等级。由于西电东送的实际需求, 从西北的能源基地送电到东部负荷中心的距离已经超过3000 km, 需要建设更高电压等级的直流输电工程, ±1100 kV 直流工程应运而生。

±1100 kV 是直流输电工程中的全新电压等级, 电压等级的提高随之而来的便是过电压的大幅提高, 针对过电压的抑制与绝缘配合的优化国内已经做过很多研究<sup>[1-5]</sup>, 设备的绝缘水平基本确定。绝缘水平的提高带来的是空气净距的增大, 而空气净距的增大使得电极与大地之间的间隙更加趋近于棒-板间隙, 而棒-板型的长间隙在操作波作用下显现出非常显著的饱和特性<sup>[7-10]</sup>, 使得通过增大间

隙长度获得绝缘强度的效果减小。上述问题导致±1100 kV 换流站的直流空气净距很大。

考虑到所述的这些不利影响, 将±1100 kV 换流站的直流场建设在户内, 排除淋雨等不利环境的影响, 通过优化电极形状, 提高间隙系数, 可以较大幅度地减小设备空气净距, 从而减轻设备制造难度, 提高设备可靠性。但是建设户内直流场会带来土建费用的大幅增加, 并增加额外的穿墙套管等设备投入, 因此必须优化户内直流场的设计。

下面依托准东—华东±1100 kV 特高压直流输电工程进行研究。该工程采用户内直流场, 户内直流场设计从经济性出发必须压缩建筑物的尺寸。根据工程成套设计研究结论, 户内直流场设备带电部分对直流场钢结构净距按15 m考虑; 但若考虑户内直流场允许运行人员在带电时进入巡检, 则带电部分对人应满足33 m的净距要求, 这将极大地增加户内直流场建筑物的尺寸, 投资将大幅增加。针对这

科技项目: 国家电网公司科技项目(GWJYKJXM[2014]002)

一矛盾,提出了空中巡视走道、地面巡视走道、巡视小车等3种基于双层屏蔽笼的巡检方案。通过这些方案的实施,满足了运行人员的运检需求,同时兼顾了工程建设的可行性,大幅节省了工程投资。

### 1 ±1100 kV 户内直流场对人员的安全净距选取以及带来的问题

空气间隙的放电特性是随机的,对于某一给定间隙,当电压波形给定时,间隙的放电概率  $P$  是电压峰值  $U$  的函数<sup>[11-12]</sup>。通常认为概率  $P(U)$  是服从高斯累积分布的,而实际上这种假设是没有物理依据的,仅仅是因为其与实验结果较为吻合。众所周知,当电压峰值低于某一临界值时,放电是一定不会发生的,而高斯累积分布恰恰不能描述这个特性,如果按照高斯累积分布,不管电压多低,放电的发生与否仍然是个概率事件。因此根据 IEC 60071-2 中的建议,对过电压和自恢复绝缘的破坏性放电都是用韦布尔概率分布,其特点是能体现放电概率的截断。

±1100 kV 准东—华东特高压直流输电工程是世界首次建设并将投入运营的直流输电工程,工程可靠性极为重要。对于人身安全,按照万无一失的原则考虑。一般来说韦布尔概率分布的截断值在 3~5,即认为

$$P(U_{50}(1-5\sigma)) = 0 \quad (1)$$

式中:  $U_{50}$  为 50% 放电电压;  $\sigma$  为概率分布的相对标准差  $\sigma = \frac{Z}{U_{50}}$ ;  $Z$  是按照 GB/T 16927.1-2011 规定的标准偏差。

那么此时设定设备的操作冲击耐受电压(SI-WV)为  $U_w$ ,空气间隙对应的棒-板间隙的放电电压为  $U_{50RP}$ ,则在标准环境条件下,有式(2):

$$U_{50RP} = \frac{U_w}{1-5\sigma} \quad (2)$$

众所周知,对于长间隙(间隙长度大于 5 m),其击穿电压与波前时间有关而与波尾时间无关。对于某一给定间隙,其击穿电压与波前时间呈现“U”型曲线关系,在某一波前时间  $T_c$ (称为临界波前时间)下击穿电压有最小值。在以往工程中,由于电压等级还不够高,操作冲击的临界波前时间恰好与标准波吻合。然而,±1100 kV 直流工程的操作过电压

波形呈现长波头的特性,其临界波前时间与标准波的波前时间相去甚远,因此根据 IEC 60071-2,采用临界波空气间隙计算,可采用以下公式:

$$U_{50RP} = 1.080 \ln(0.46d + 1) \quad (3)$$

式中:  $U_{50RP}$  为正极性电压峰值, kV;  $d$  为间隙长度。

±1100 kV 换流站直流场极线设备  $U_w = 2100$  kV,根据式(2)~式(3),计算出的带电设备对人员的空气净距为 33 m。考虑到 33 m 是一个极大的值,电极与人之间的间隙按棒-板间隙考虑是合理的。

若 ±1100 kV 户内直流场的运检安全距离按照前面所述的安全净距控制,将带来以下问题:

- 1) 将巡检人员限制在离被巡视的电气设备外,使得他们难以近距离观察电气设备;
- 2) 按 33 m 的安全净距,将运检人员的巡视通道考虑到户内,将极大地增加户内直流场的体积,带来巨大的额外投资。

### 2 ±1100 kV 户内直流场双层屏蔽笼设计

针对上述问题,提出一种屏蔽笼设计。该屏蔽笼由双层金属网架构成,两层之间采用绝缘子支撑并分别良好接地。其示意图如图 1 所示。

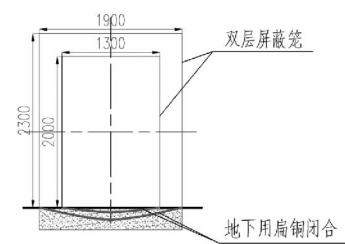


图 1 双层屏蔽笼设计示意图

这种屏蔽笼的设计意图在于,外层屏蔽笼良好接地时相当于大地;而前面已经叙述,1100 kV 电气设备对地的空气间隙取值只需 13 m。因此,如果外层屏蔽笼的高度低于设备钢支架的高度,则屏蔽笼就可以紧贴设备布置,如图 2 所示。

这样的布置方式可以让巡视人员得以接近设备底部,使得近距离观察设备与仪表成为可能。

另外,内层屏蔽笼的设置是为了防止人员被外层屏蔽笼的电弧所灼伤。

目前,根据中国电科院的相关试验结论,内外层屏蔽笼的间距取 20 cm,内外屏蔽笼在不同接地方式下,至少外屏蔽笼有效接地时,内屏蔽笼内屏蔽效

果良好。

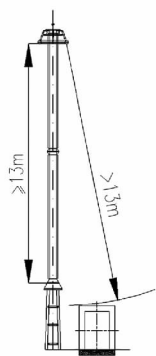


图2 双层屏蔽笼紧贴设备布置示意图

### 3 采用双层屏蔽笼的巡视走道方案

现应用双层屏蔽笼,提出一种户内直流场的巡视走道方案。

户内巡视走道的设置原则是由两点因素决定的,即运行维护的工作项目需求以及设备带电部分到巡视走道笼子的最小空气净距。设备带电部分到巡视走道的最小空气净距决定了法拉第笼和整个户内直流场的设备高度。根据瑞典 ABB 公司推荐:户内直流场最小空气净距可取 13 m。由于目前 1 100 kV 的设备干弧距离都满足了 13 m 的要求,因此原则上只需将巡视走道的法拉第笼高度低于钢支架的高度(2.5 m)即可满足要求。这样,户内直流场在增加巡视走道的情况下,不会抬高直流场电气设备高度。

由于运检单位有打开端子箱查看等需求,且当运检人员打开端子箱时,其双手仍然不允许暴露在屏蔽笼外。因此在设计巡视走道时,地面巡视走道经过具有端子箱(操作箱)的设备支架底部时,应该制作一个小型的 T 型支路(如图 3 所示),将设备端子箱罩起来,使得运维人员得到保护。

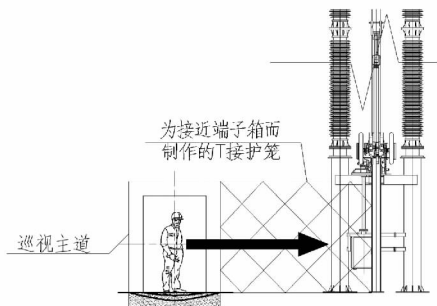


图3 巡视走道 T 型支路示意图

按照上述原则,户内直流场内巡视走道的布置如图 4 所示。

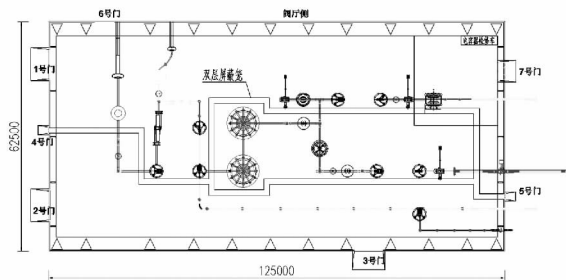


图4 户内直流场巡视走道布置图

### 4 采用双层屏蔽笼的巡视小车道方案

由于巡视走道位于地面,对电气设备安装及检修时车辆的进出有所阻碍,即使按可拆卸的屏蔽笼方案考虑,仍然很不方便。现提出一种巡视小车的方案。巡视小车原则上讲是一个法拉第笼,运检人员被屏蔽在金属笼内,金属笼做成可移动的小车。该方案实际操作时有两个较为关键的点:

- 1) 必须保证移动过程中巡视小车的良好接地;
- 2) 解决小车转向的相关问题。

考虑人坐在小车中操作,不必站立,则巡视小车法拉第笼的高度可以压缩到 1.6 m,加上小车底座的动力部分,仍可以保证整体高度不超过 2.3 m。

为了保证小车良好的屏蔽作用,保护人身安全,必须要求小车接地<sup>[13-15]</sup>时时刻刻都是可靠的。因此首先巡视小车的接地必须是一种专门的装置,比如在地面设置专门的接地轨道;其次应保证接地装置与巡视小车良好接触。因此推荐巡视小车采用固定轨道方案,保证巡视小车按照预定路线行进,因为滚动接触是不可靠的,要设置专门的接地装置,确保与小车可靠接触。

巡视小车若按前面所述采用轨道车,接地方式可以按照城市轨道交通接触轨加“集电靴”的方式进行<sup>[16-17]</sup>。轨道交通在速度不高的情况下可以采用接触轨(第三轨道)供电,图 5 是城市地铁的接触轨示意图。

接触轨即为轨道列车的供电轨道,接触轨与机车之间通过集电靴进行连接。集电靴又名受流器、三轨受流器(collector shoe),是指安装在地铁轻轨等列车的转向架上,为列车从刚性供电轨(第

三轨)进行动态取流(采集电流),满足列车所有电力需求的一套动态受流设备。集电靴的示意图如图6所示。

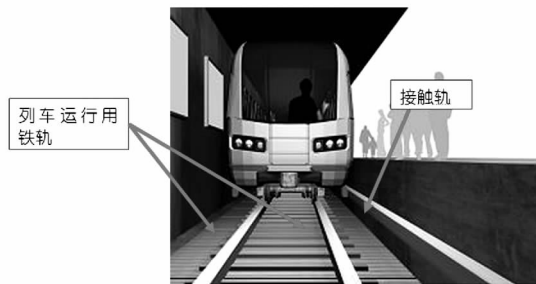


图5 城市地铁接触轨示意图

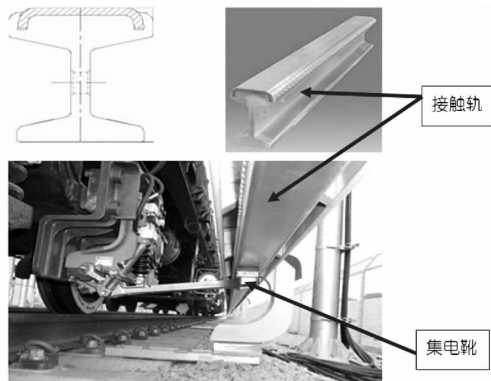


图6 接触轨及集电靴示意图

图6中所示的是集电靴的下接触方式,即集电靴与接触轨的接触面在接触轨的下表面,在实际工程应用中,也有很多采用上接触的案例。

由于接触轨加集电靴的方式在中国地铁中已有广泛应用,已经被实际工程多次检验,可见这是有效的供电方式,当然也说明集电靴完全可以保证在速度不太高时(时速130 km以下)与接触轨良好电气接触。因此在户内巡视小车的设计中,可以采用将巡视小车的法拉第笼通过集电靴与一条类似接触轨的“接地钢轨”完成接地。实际操作中并不需要增加钢轨数量,只需利用其中一条钢轨作为接地轨即可。

巡视小车的运行钢轨与接地轨均可以采用下沉式安装,即钢轨的上表面基本与地面平齐,巡视小车的法拉第笼通过集电靴经接地轨接地,集电靴与接地轨采用上接触方式。

下面讨论巡视小车的运行路径问题。由于采用了接地轨,因此巡视小车运行系统的宽度有所增加,受特制的运行钢轨与集电靴的尺寸参数限制,现在规划一条4 m宽的通道供巡视小车载设轨道。同

时根据运检需求,巡视小车不可避免地需要多次直角转向,而对于轨道本身来说直角转弯是难以实现的。因此,必须引入转向平台实现小车转向。带转盘式电动轨道小车系统是一种能够满足任何弧线轨道运行的特殊轨道车辆系统,这种系统需要在轨道转角处加装电动转盘,用以满足巡视小车在户内直流场内的直角转向需求。安装在轨道转弯处的电动转盘依靠下方的电机驱动,并且在电动转盘上方方设有红外限位器,用以保证电动小车运行至转盘上方时候能够准确停留在转盘上侧。图7展示了转向平台。



图7 转向平台示意图

将巡视小车长度暂定为4 m,考虑转向平台直径为6 m,轨道的布置路径可以按照图8布置。

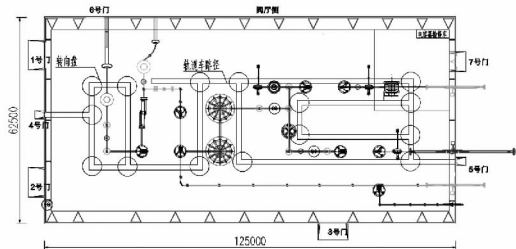


图8 巡视小车轨道路径示意

如果在小车内的人要对机构箱进行操作,那么在机构箱的位置仍然需要设计屏蔽笼,供人下车进笼操作。

## 5 巡视走道与巡视小车道方案的比较

将所提出的基于双层屏蔽笼的地面巡视走道方案以及巡视小车方案对比如下:

地面巡视走道方案可以接近每一个设备,可以满足运维检修各项的要求。在设计制造方面,由于阀厅空中巡视走道的成功经验,使得地面屏蔽笼的制造不存在问题。但是其缺点主要体现在屏蔽笼

对室内空间构成了阻碍,具体说来:首先,在检修时,吊装设备进入直流场,需要拆卸部分走道;另外,户内直流场需要设置多处消防设备,地面巡视走道影响了消防设备的布置,在火灾发生时也会影响救援的灵活性。

巡视小车方案相对灵活,可以满足运检的要求,将轨道与地平面平齐也可以方便检修车辆进入不需要拆卸。但是巡视小车方案将面临来自小车本身设计制造上的一些挑战。这主要体现在:1)由于小车必须通过一些T形甚至十字形的路口,如果不用转向盘是难以实现这种转向的,这就需要设置大量的转向盘,代价高,且转向盘的可靠性是一个令人担忧的问题;2)即使不采用轨道车,而是采用普通车通过接地钢轨接地,转向时如何一直保证可靠接地仍然是个问题,尤其是碰到T型路口时;3)国内厂家从来没有设计制造该类小车的经验,由设计院所做概念设计并不足以支撑小车的实际制造,因此厂家是否具备制造能力以及制造出的小车是否可靠都存在问题。因此需进一步研究。

综上,巡视走道现阶段是一种更为可行的方案,可以在工程实践中推广。

## 6 结 论

为了减少 $\pm 1100\text{ kV}$ 换流站户内直流场巡检时电气设备对人身安全净距要求过大的问题,并提出并阐述了一种双层屏蔽笼的设计方案,并基于此屏蔽笼,提出了应用于户内直流场的地面巡视走道以及巡视小车方案。应用这些方案,可以满足运行人员的巡检要求,同时可以极大地压缩户内直流场的尺寸。

### 参考文献

[1] 陈锡磊,周浩,王东举,等.  $\pm 1100\text{ kV}$ 特高压直流换流站绝缘配合关键问题研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3015-3021.

[2] 聂定珍,马为民,余世峰,等.  $\pm 1000\text{ kV}/\pm 1100\text{ kV}$ 特高压直流输电系统换流站的绝缘配合[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3156-3160.

[3] 姬大潜,刘泽洪,张进,等.  $\pm 1100\text{ kV}$ 特高压直流输电换流站内深度限制过电压水平研究[J]. 电网技术,

2012, 36(10): 55-60.

[4] 朱家骥. 对中国 $1100\text{ kV}$ 电网过电压及绝缘水平的建议[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会过电压及绝缘配合学组2006年学术年会, 2006: 20-23.

[5] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等.  $\pm 1100\text{ kV}$ 直流换流站避雷器布置、参数和设备绝缘水平的选择[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2871-2884.

[7] CIGRE WH 33-07. Guidelines for the Evaluation of the Dielectric Strength of External Insulation [C]. CIGRE technical brochure 72, 1992.

[8] Paris L, Cortina R. Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1968, PAS-87(4): 947-957.

[9] 万启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2499-2505.

[10] 刘振,周春雨,余芳,等. 长空气间隙长波前操作冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2401-2406.

[11] 梁曦东. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[12] GB/T 311.2-2013, 绝缘配合 第2部分: 使用导则[S].

[13] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1991: 204-206.

[14] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[15] IEEE Standard 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding [S].

[16] 冯文. 浅析地铁牵引供电中靴轨授流关系[J]. 科学与财富, 2015, 7(36): 415.

[17] 钟碧羿. 地铁车辆接地技术分析[J]. 电力机车与城市轨道交通, 2008, 31(4): 55-57.

作者简介:

包维瀚(1989),工学硕士、工程师,从事换流站绝缘配合与接地系统设计工作;

郭贤珊(1972),工学硕士、高级工程师,长期从事直流换流站技术管理、高电压研究相关方面的工作;

丁晓飞(1975),工学学士、高级工程师,从事变电站电气设计工作;

骆玲(1986),工学硕士,从事变电站电气设计工作;

付颖(1983),工学硕士、高级工程师,长期从事直流换流站技术管理、成套设计相关方面的工作。

(收稿日期: 2017-01-15)