

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.012

# 垂直型直流接地极设计探讨

谭威, 孔志达, 简翔浩

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 针对不同系统运行条件及土壤电阻率对接地极设计的影响进行分析, 指出了额定电流持续运行时间较长会导致发热问题严重, 电极井孔径扩大, 增加施工难度, 土壤电阻率对溢流密度及不均匀程度、跨步电压值的影响较大。提出了合理优化接地极设计条件, 降低额定电流持续运行时间, 尽量降低最大溢流密度及不均匀程度, 减小电极地面跨步电压值的建议。此外, 计算表明与水平型接地极相比, 垂直型直流接地极并不能减小对周围环境的影响, 不同型式直流接地极对周围环境的影响差别很小。

**关键词:** 垂直型直流接地极; 溢流密度; 跨步电压

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0060-04

## Discussion on DC Vertical Ground Electrode Design

TAN Wei, KONG Zhida, JIAN Xianghao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The influences on DC vertical ground electrode design are analyzed in view of different operating conditions and layering of soil resistivity. Heating problem is more serious while continuous running time under rated current is longer. Radius of electrode well should be enlarged and the construction difficulties become higher, accordingly. Distribution of current releasing-density and step voltage are under the influence of different type of Layering of soil resistivity. The suggestions are given as follows: optimize the input criterion sensibly, reduce continuous running time under rated current, current releasing-density and step voltage of electrode. In addition, for vertical ground electrode, the impact to surroundings can't be reduced compared to horizontal ground electrode. The difference of impact to surroundings is small for different type of ground electrodes.

**Key words:** DC vertical ground electrode; current releasing-density; step voltage

直流接地极是高压直流输电工程中的一个重要组成部分, 它的作用体现在: 一是单极大地运行时作为直流返回通路的一部分直接为直流系统输送电力, 提高系统运行的可靠性和可用率; 二是钳制换流站中性点电位, 避免两极对地电压不平衡而损害设备。

国内已建直流接地极均为陆地型接地极, 一般均采用水平浅埋型接地极方案, 要求极址平坦, 可利用面积大, 大地散流特性好, 对周围环境影响

小。近年来随着西电东送和全国联网的稳步推进, 我国直流输电正朝着高电压、大容量的方向发展, 直流落点越来越多, 系统额定电流也逐步提高, 按照常规水平浅埋型接地极方案进行极址选择工作难度越来越大。尤其是在珠三角、长三角等经济发达地带, 人口密度大, 电网结构复杂, 地下金属设施众多, 土地资源尤为紧缺。因此, 如何对接地极布置型式进行设计优化, 尽量减少占地, 具有很大的社会效益和经济效益。垂直型直流接地极具有占地小、对地形要求不高的优势, 具有工程应用价值。

## 1 国内外研究及应用情况

垂直型直流接地极目前在国内外的工程应用经验极少。在波罗的海直流电缆输电工程中曾经采用

收稿日期: 2016-03-11

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 特高压直流换流站设计 (EX03621W)

作者简介: 谭威(1987), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 硕士, 主要从事直流换流站及接地极电气一次设计(e-mail)tanwei@gedi.com.cn。

长度为500 m的深井接地极试验井,退役后,采用一个直径2 km的铜环替代<sup>[1]</sup>。国内糯扎渡直流工程中送端接地极设计采用一种双圆环布置的垂直型直流接地极布置方案。

国内科研单位针对垂直型直流接地极的研究起步较晚。武汉大学开展了暂态温升计算,并通过试验进行验证<sup>[2]</sup>。针对不同布置形式的垂直接地极进行了技术性能和经济指标的计算比较,得出垂直型直流接地极附近土壤温升过高的现象,水平双圆环接地极较垂直直流接地极在现场更具可行性的结论<sup>[3]</sup>。

## 2 垂直型直流接地极布置方案介绍

垂直型直流接地极一般采用若干口垂直电极井呈圆环形等间距布置,垂直电极井通过引流电缆分组与主电缆连接。垂直电极井顶部至地面按渗水井进行设计,以保持垂直电极井及附近土壤潮湿。

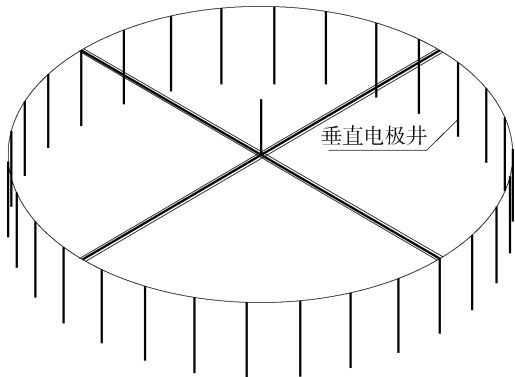


图1 垂直型直流接地极平面布置示意图

Fig. 1 Layout of DC vertical ground electrode

为提高接地极运行可靠性,单口垂直电极井内部可根据需要设置为多段子电极并联。每段子电极中心固定馈电棒,周围采用焦炭包裹。

## 3 垂直型直流接地极设计探讨

接地极主要材料为接地极馈电材料(一般为钢棒或高硅铬铁材料)、活性填充材料(石油焦炭)、引流电缆等。接地极设计主要控制因素为接地极占地面积、馈电棒直径、焦炭截面、电缆截面、跨步电压及温升指标等。接地极材料及各关键控制因素均是由系统运行条件和极址条件所共同决定的<sup>[4-5]</sup>。

以下通过某直流工程垂直接地极的设计方案,

进行垂直型直流接地极的设计探讨。

### 3.1 设计输入条件参数

某直流工程垂直接地极的土壤电阻率分层厚度和电阻率如表1所示,设计输入条件参数如下,

1)系统运行条件:(1)额定入地电流为3 000 A;(2)最大过负荷电流为3 300 A;(3)局部最大跨步电压 $< 7.42 + 0.031 8\rho_s$ ;(4)土壤最大允许温度为90 ℃;(5)额定电流连续运行时间为30天。

2)极址土壤特性:(1)极址土壤热容率为 $2.0 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ;(2)热导率为 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

表1 土壤电阻率分层

Tab. 1 Layering of soil resistivity

层序	厚度/m	电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )
1	5	100
2	100	200
3	1 000	500
4	Infinite	100

### 3.2 不同系统运行条件对接地极设计的影响

截止到目前,垂直型直流接地极仍然无法得到广泛推广应用,其中一个很重要的原因就是垂直型直流接地极存在端部效应问题,发热问题不易解决。垂直型直流接地极发热问题主要是由于接地极连续运行时产生的热量造成馈电棒及周围土壤温升不断升高所致。在以往直流工程接地极设计中,需考虑工程建设初期的系统调试期间,单极大地连续运行时间不超过30 d。根据国内已建直流工程的运行经验,双极直流输电系统在单极出现故障的条件时,另一极自动转金属回线,金属回线自动转换过程需要30 min~2 h;2 h后,系统进入金属回线运行方式,单极大地回线不作为一种正常的运行方式。在本文中,针对单极大地不同连续运行时间进行方案设计比较,不同布置方案如表2所示。

表2 不同连续运行时间下接地极土壤最高温度

Tab. 2 Max temperature of soil under different continuous

running time

焦炭截面直径 /m	持续运行下接地极土壤最高温度/℃ (最高允许温度90 ℃,土壤初始温度30 ℃)					
	30 d	10 d	72 h	48 h	24 h	2 h
2.2	82.5	47.5	35.3	33.5	31.8	30.2
1.3	180.4	80.2	45.1	40.0	35.0	30.4
0.7	548.8	202.9	81.9	64.6	47.3	31.5
0.5	1 046	368.9	131.7	97.8	63.9	32.8

注:土壤温度均为理论计算值。

由表中计算结果可以看出,不同额定电流持续时间,对应不同焦炭截面,其土壤最大温升也不同。一般来讲,额定电流持续运行时间越长,其土壤温升速度越快,发热问题越严重,所需焦炭截面也越大,垂直电极井孔径越大,施工难度相应增加。

### 3.3 不同土壤电阻率参数对接地极设计的影响

极址附近土壤电阻率是确定接地极尺寸的依据性数据,关系到接地极设计及运行特性。本节中针对不同类型的土壤电阻率分层模型分别进行接地极技术性能计算,不同类型土壤电阻率分层模型如表3所示,计算结果如表4所示。

表3 不同土壤电阻率分层

Tab. 3 Different types of Layering of soil resistivity

层序	(厚度/m)/(电阻率/ $\Omega \cdot m$ )				
	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
1	5/100	5/50	5/100	5/100	5/100
2	100/200	100/200	100/200	15/50	15/200
3	1 000/500	1 000/500	1 000/500	85/200	85/50
4	Infinite/100	Infinite/100	Infinite/50	1 000/500	1 000/500
5	-	-	-	Infinite/100	Infinite/100

表4 不同土壤电阻率分层时接地极技术性能

Tab. 4 Technical performance of ground electrode under different types of Layering of soil resistivity

模型	1	2	3	4	5
接地极布置方案	$\phi 300$ m 单元环等间距布置,子电极长度为30 m/30根,埋深5 m,焦炭截面为 $\phi 2.2$ m				
跨步电压/V	9.434	7.663	9.433	6.011	3.522
接地电阻/ $\Omega$	0.558	0.527	0.555	0.369	0.258
最高温度/ $^{\circ}C$	82.5	75.6	82.5	121.9	162.9
最大溢流密度/ $(A \cdot m^{-1})$	4.8	4.5	4.8	6.4	7.9

根据上表的计算结果,不同土壤模型对接地极的技术性能指标有较大的影响,以下从几个方面分别进行分析:

1) 表层土壤电阻率。跨步电压控制值取决于表层土壤电阻率的大小。较高的表层土壤电阻率,其跨步电压控制值也相对较大。根据土壤模型1和2两种不同情况下的计算结果,表层土壤电阻率较高,其计算跨步电压值也较大。在接地极方案设计中应合理控制极环埋深,以保证计算跨步电压值低于控制值,且预留一定裕度。

2) 子电极所在位置的土壤电阻率。本文中垂直接地极子电极长度为30 m,埋深5 m。土壤模型1

中,子电极埋设于均一土壤电阻率中;土壤模型4中,子电极上半部分埋设于较低土壤电阻率中,上半部分埋设于较高土壤电阻率中;土壤模型5中,子电极上半部分埋设于较高土壤电阻率中,上半部分埋设于较低土壤电阻率中。对土壤模型1、4、5进行比较可以看出:

电极埋设位置的土壤电阻率对最大溢流密度的影响较大。一般来讲,电流流向土壤电阻率较低的土壤中,相应的,处于较低电阻率的土壤中,馈电棒溢流密度大;反之,处于较高电阻率的土壤中,馈电棒溢流密度小。溢流密度越大的地方发热越严重,同一焦炭截面下连续长时间运行时土壤最高温度也越高。

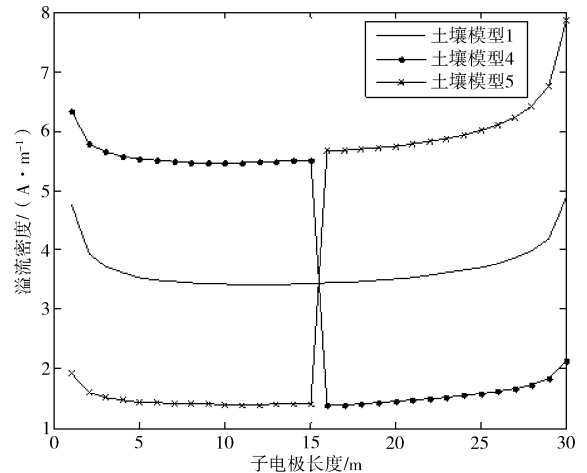


图2 不同土壤电阻率分层时子电极溢流密度分布

Fig. 2 Current releasing density distribution of each ground electrode under different type of Layering of soil resistivity

图2所示对应土壤模型1、4、5情况下子电极溢流密度分布。可以看出,垂直型直流接地极存在端部效应,溢流密度不均匀程度高。而电极埋设处的土壤电阻率对溢流密度分布也存在较大的影响。处于均一土壤电阻率中的电极溢流密度偏差较小。土壤模型4中电极上半部分土壤电阻率较低,溢流密度较大,土壤模型5中由于电极上半部分土壤电阻率较高,溢流密度较大。

从土壤模型1、4、5中接地极跨步电压计算值的比较可以看出,若垂直接地极上半部分溢流密度较大,则较多的电流流向大地表面,不利于地面跨步电压的控制;反之,当垂直接地极下半部分溢流密度较大时,更多的电流将流向大地深层,表层跨步电压值更容易控制。

3) 深层土壤电阻率。从土壤模型 1 和 3 中接地极计算结果可知深层土壤电阻率的高低对于跨步电压、接地电阻、溢流密度等指标并无明显的影响。

#### 4 不同型式直流接地极对周围环境影响比较

当直流接地极流过强大的直流电流时,在极址土壤中形成一个恒定的直流场。极址周围土壤会产生不同程度的地电位升,若极址附近有中性点直流接地的变压器、地下金属管道或铠装电缆等金属设施,由于这些设施可能给地电流提供了比大地土壤更为良好的导电通道,因此一部分电流将沿着并通过这些设施流向远方,从而可能给这些设施带来不良影响。

接地极对周围环境设施的影响根源在于设施不同接地点之间存在地电位升的差异。因此,极址周围土壤地电位升是分析接地极对周围环境影响的关键。

国内学者认为垂直型直流接地极可直接将电流导入地层深处,因而对周围环境影响较小。为比较不同类型直流接地极对周围环境影响,本文中针对同一土壤模型(表 3 中土壤模型 1)分别设计不同类型接地极方案,计算其周围地电位升情况并比较,结果如图 3 所示。

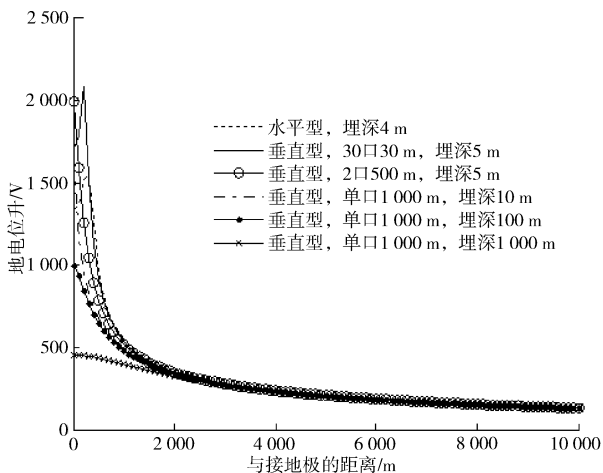


图 3 不同型式接地极周围地电位升曲线

Fig. 3 Electrical potential rise of different types of ground electrode

由图 3 可知,不同型式接地极周围地电位升基本相同。水平型接地极与垂直型直流接地极相比,极址周围土壤地电位升差异仅仅体现在极址周围 5

km 范围以内,且相差不超过 5%。根据接地极工程设计经验,接地极与中性点直流接地的变压器、地下金属管道或铠装电缆等金属设施的距离一般都在 10 km 范围以上。因此,可以认为垂直接地极并不能减小对周围环境的影响,不同型式直流接地极对周围环境影响差别很小。

#### 5 结论

1) 垂直型直流接地极和水平型接地极相比,具有占地小的优势,但仍存在端部效应及垂直电极井施工困难问题。

2) 不同系统运行条件尤其是额定电流持续运行时间影响接地极焦炭截面的确定。额定电流持续运行时间较长会导致发热问题严重,电极井孔径扩大,施工难度增加。建议根据现有已建直流工程经验,降低额定电流持续运行时间,合理优化接地极设计条件,降低施工难度。

3) 极址土壤电阻率是接地极设计的关键输入条件,决定了接地极技术性能指标。

表层土壤电阻率是计算跨步电压控制值的依据。在接地极方案设计过程中应合理控制极环埋深,以保证计算跨步电压值低于控制值,且预留一定裕度。

电极所在位置的土壤电阻率对最大溢流密度及不均匀程度、跨步电压值的影响较大。在接地极方案设计过程中应根据极址土壤电阻率分层情况合理设置电极长度及埋深,尽量降低最大溢流密度及不均匀程度,减小电极地面跨步电压值。

4) 垂直接地极并不能减小对周围环境的影响,不同型式直流接地极对周围环境的影响差别很小。

#### 参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 王羽, 李晓萍, 罗思敏, 等. 垂直型直流接地极暂态温升计算与试验 [J]. 中国电机工程学报, 2013(10): 184-191.
- [3] 王建武, 杜忠东, 李家源, 等. UHVDC 垂直接地极技术经济性能分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 59-61.
- [4] 中国电力企业联合会. 高压直流接地极技术导则: DL/T 437—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 中国电力企业联合会. 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定: DL/T 5224—2014 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.