

# 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤地电位分布计算

刘连光<sup>1</sup>, 马成廉<sup>1,2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 高压直流输电单极-大地回路方式运行时入地电流会在接地极周围的土壤中产生强电场, 会对接地极附近电网的电力设备和地下金属管线等产生影响。针对接地极周围实际土壤的分布情况, 建立了典型土壤模型和多层土壤模型, 采用有限元法对典型接地极的地电位分布进行计算。比较了采用典型土壤模型和采用多层土壤模型下的直流输电接地极的接地特性以及对地面电位分布的影响。计算结果表明, 在极址附近, 接地极所在层土壤电阻率对接地电阻和跨步电压的影响较大, 在离接地极数十公里范围内, 深层土壤电阻率对地表电位的影响较大。

**关键词:** 高压直流输电; 直直接地极; 电流场; 大地电场模型; 有限元; 地面感应电势

## Calculation of multi-layer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method

LIU Lianguang<sup>1</sup>, MA Chenglian<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Strong electric field will be produced in the earth around the grounding poles when HVDC transmission system operates in ground-return mode, which will influence electrical equipment nearby and the metallic pipelines underground. This paper builds a model of multi-layer soil and a typical soil model on basis of actual distribution of soil around the grounding poles, and then calculates surface potential distribution of typical grounding poles by finite element method. The grounding characteristics of DC transmission grounding electrode and the influence on earth surface potential distribution of the two models are compared. The results show that, the ground resistance and the step voltage around the site are much affected by the soil resistivity where the grounding locates. While the ESP which is within the range of tens of meters, is affected by the deep soil resistivity.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177045), National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA121005), and Beijing City Board of Education Center in Beijing College Construction Project (No. YB20101007901).

**Key words:** HVDC; DC grounding electrode; current field; earth electric field model; finite element; earth surface potential

中图分类号: TM721.1

文章编号: 1674-3415(2015)18-0001-05

## 0 引言

高压直流输电工程从经济上考虑一般先建成一极投入运行, 另一极建成后再双极运行。另外, 在一极检修或者闭锁的情况下也会采用单极大回路方式运行<sup>[1]</sup>。单极大回路运行时强大的入地电流

会在接地极附近产生地表电位的畸变, 会对交流电网和周边环境产生一系列的影响<sup>[2-7]</sup>。如产生电网谐波问题<sup>[2-3]</sup>, 对交流电网及相关设备产生一系列影响<sup>[4-5]</sup>, 尤其是对交流变压器造成直流偏磁问题<sup>[6]</sup>及地下金属设施的电腐蚀影响<sup>[7]</sup>, 已经引起了广泛的关注。

直直接地极地面电位(ESP)计算已有一些成果<sup>[8-12]</sup>。文献[8]讨论了多层土壤模型下各层土壤电阻率对 ESP 分布的影响, 但没有将多层与两到三层进行对比, 也没有考虑接地极的其他电气参数。有

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51177045); 国家 863 高技术基金项目(2012AA121005); 北京市教委中央在京高校共建项目(YB20101007901)

文献多采用镜像法或复镜像法和均匀或两层到三层土壤模型<sup>[9-10]</sup>。实际土壤的分布是不均匀的,采用均匀或浅层土壤模型计算会产生一定的误差。文献[11]采用有限元法计算深层土壤模型和浅层土壤模型下的 ESP 并进行对比,结果存在较大的差别。文献[12]针对锦屏—苏南±800 kV 特高压直流输电工程 4 950 A 入地电流在四川电网内的分布规律和各变电站遭受直流偏磁的风险进行了预报和分析,表明受接地极入地电流影响的站点主要分布在距接地极方圆 120 km 范围内。

本文提出采用有限元方法,建立典型及多层土壤模型,计算地电位分布及接地极相关电气参数并分情况讨论各层土壤电阻率的变化对相关参数的影响,为直流接地极入地电流影响分析提供准确方法。

## 1 地表电位形成及计算方法

在高压直流输电单极大地回路运行的情况下,入地直流以直流输电线路、中性点直接接地变压器中性点接地支路、大地为通道,产生地面电位畸变,图 1 为高压直流输电单极大地回路运行示意图。

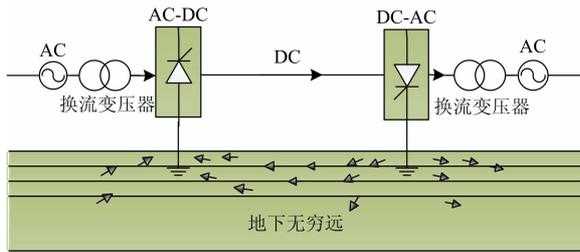


图 1 单极大地回路运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the monopolar ground circuit operation

流入土壤中的电流与地表电位满足恒定电流场方程,如式(1)~式(3)。

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可知

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

$$\nabla^2 = 0 \quad (5)$$

其中:  $E$  为电场强度;  $J$  为电流密度;  $\gamma$  为电导率,在恒流场中选取标量电位  $V$  为自由度,以上方程在除去接地极的场域上恒成立,在不同土壤电阻率地区方程中的电导率取值不同,在不同电导率土壤之间的分界面满足边界条件:

$$V_i = V_j \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho_i} \frac{dV_i}{dn} = \frac{1}{\rho_j} \frac{dV_j}{dn} \quad (7)$$

接地极外面覆盖了一层焦炭,属于良导体,可以将整个接地极表面看做是等电位的,将接地极表面做为求解场域的另一个边界,在这个边界上的边界条件即满足电位为恒定值。

参考坐标系取为三维笛卡尔坐标系,可以得到电位满足的偏微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\gamma \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma \frac{\partial V}{\partial z}) = f(x, y, z) \quad (8)$$

恒流场可以类比于静电场,所以适用唯一性定理,定义下列第一类边界条件:

$$v|_{s_1} = v_0 \quad (9)$$

$$v|_{s_2} = 0$$

以及第二类边界条件:

$$\frac{\partial v}{\partial n}|_{s_2} = 0 \quad (10)$$

由以上就可以确定此恒流场的唯一解,这样,确定了场方程和边界条件,就可以根据实际问题,采用有限元方法<sup>[13]</sup>,应用 ANSYS 软件进行建模仿真并求解。通过有限元法可解出上述偏微分方程,得出各个场点的  $V$  值,进而计算出各个电气参数。

## 2 两种大地模型及地表电位分布基本规律

本文采用三常直流输电工程三峡侧湖北宜昌龙泉换流站接地极的土壤模型进行计算,根据三峡地区实测的土壤数据,结合大地典型土壤结构建立两种土壤模型:即典型大地土壤模型与多层大地土壤模型,具体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 典型大地土壤模型

层号	层深/m	土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	100	20
2	1 000	200
3	10 000	1 000
4	无穷大	2

表 2 多层大地土壤模型

层号	层深/m	土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	3	27.5
2	15	20
3	150	90
4	250	15
5	2 900	25
6	1 070	175
7	1 120	22
8	7 200	55
9	17 900	12
10	37 300	600
11	无穷大	2

直直接地极形状采用单圆环, 埋深 3.5 m, 半径取 700 m, 焦炭截面积取 0.7 m×0.7 m。入地电流取 3 000 A<sup>[14]</sup>。在这两种不同土壤结构模型下, 接地极地表电位分布的计算结果如图 2 所示。实线和虚线分别代表典型土壤和多层土壤模型下的地表电位分布的计算结果。

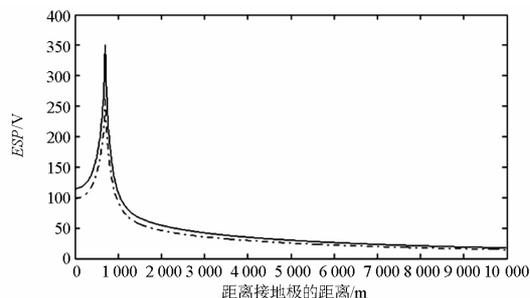


图 2 不同土壤模型的 ESP 分布曲线

Fig. 2 ESP distribution curves of different soil models

从图 2 可以看出, 采用典型土壤模型时地表电位最大值为 350 V, 而采用多层土壤模型计算时地表电位最大值为 260 V, 相差将近 100 V, 由表 3 可知接地电阻和最大跨步电压的差别也较大, 但是超过 10 km 以外的远场, 电位差别则比较小, 两种土壤模型在极址附近和远场的计算结果所表现的差异不一样, 不同层深的土壤电阻率对各个电气参数及不同距离的地表电位分布的影响有待进一步分析。

表 3 不同土壤模型的电气参数

Table 3 Electrical parameters of different soil models

相关参数	典型土壤模型	多层土壤模型
接地电阻/p.u.	0.121 2	0.090 8
最大跨步电压/p.u.	3.054 1	2.254 1

### 3 极址附近接地极参数分析

高压直流输电接地极设计中, 地面电位和跨步电压的计算是非常重要的<sup>[15-18]</sup>。设大地模型是线性的, 土壤电阻率  $\rho$  为各向同性, 大地为平面且水平方向上  $\rho$  分布不变, 为了分析各层土壤对接地极电气参数的影响程度, 将土壤水平分层, 采用表 2 的多层土壤模型, 将分层进一步细化, 固定其他层土壤电阻率为表 1 值, 改变某一层土壤的电阻率值, 计算不同土壤模型下的接地极电位与地表最大跨步电压。

#### 3.1 接地极电位

由表 4 可见, 各层  $\rho$  变化时对接地极电位的影响效果不同, 这可能与各层所处的位置、厚度、 $\rho$  的大小有关。总体来说整个土壤中低阻层对接地极电位的影响比较小, 各层电阻率设为 10  $\Omega \cdot m$  的时

候电位基本上没有什么变化, 都在 250 V 左右。土壤中高层对接地极电位的影响较大, 影响最大的是接地极所在层的土壤电阻率。当深 3~5 m, 接地极埋设层的土壤电阻率为 200  $\Omega \cdot m$  时, 接地极电位升高达将近 400 V, 此时接地极的接地电阻也为最大, 随着深度的增加, 高阻层的影响逐渐减小。

表 4 不同土壤电阻率对接地极电位的影响

Table 4 Effect of different soil resistivity electrode potential

层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$	接地极电位/V	电阻率/ $\Omega \cdot m$	接地极电位/V	电阻率/ $\Omega \cdot m$	接地极电位/V
3	10	253.41	50	278.86	200	286.11
5	10	255.17	50	298.91	200	391.68
10	10	250.43	50	297.69	200	343.61
15	10	257.13	50	286.67	200	308.91
20	10	259.20	50	283.38	200	305.34
100	10	268.36	50	238.99	200	331.40
200	10	224.49	50	253.92	200	312.52
500	10	260.9	50	313.11	200	404.71
1 000	10	254.84	50	284.97	200	313.48
2 000	10	257	50	282.94	200	298.85
5 000	10	253.04	50	263.34	200	273.08

#### 3.2 最大跨步电压

由表 5 可知, 影响地表最大跨步电压的是浅层土壤电阻率, 电阻率越大, 地面最大跨步电压越大, 其中又以接地极所在层的土壤电阻率的影响最大, 当接地极所在层的土壤电阻率取 200  $\Omega \cdot m$  时, 最大跨步电压达到了 5.014 8 V, 入地超过 20 m, 土壤电阻率从 10  $\Omega \cdot m$  增加到 200  $\Omega \cdot m$ , 最大跨步电压只增加了 0.43 V, 土壤电阻率的影响急剧减小。

表 5 不同土壤电阻率对最大跨步电压的影响

Table 5 Effect of different soil resistivity on the maximum

step voltage

层厚/m	电阻率模型/ $\Omega \cdot m$	电阻/ $\Omega \cdot m$	最大跨步电压/V	电阻/ $\Omega \cdot m$	最大跨步电压/V	电阻率/ $\Omega \cdot m$	最大跨步电压/V
3	27.5	10	2.043 3	50	3.411 7	200	3.960 8
5	20	10	2.334 8	50	3.796 0	200	5.014 8
10	20	10	2.410 2	50	3.789 5	200	4.992 4
15	20	10	2.866 2	50	3.112 0	200	3.299 8

### 4 大区域内地电位分布规律

应用 ANSYS 软件仿真, 结果如图 3 所示。离开接地极几公里距离后电位下降是非常快的, 超过几公里以后, 电位已经基本上趋于稳定, 电位下降的速度大为减缓, 地面电位的变化是由电流引起的, 电位的分布反映出电流的流动情况, 在典型土壤模型下, 电流流出接地极后, 基本上都流入了大地深

处, 只有很小一部分在地表层流动, 这也说明是受到了表层和深层土壤电阻率的影响。

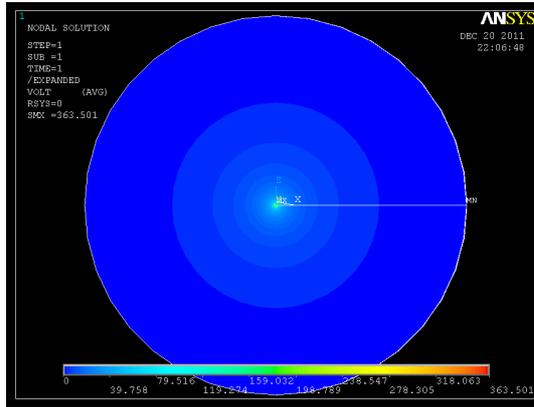


图 3 大区域内接地极电位分布

Fig. 3 Large area inscribed the ends of the earth potential distribution

#### 4.1 大区域内典型土壤模型下电位分析

取表 1 的典型土壤为计算模型, 接地极模型和入地电流保持不变, 固定其他层土壤电阻率为表 1, 改变其他层土壤电阻率, 计算接地极电压和 50 km 范围内的地表电位, 结果如表 6 所示。

表 6 深层土壤电阻率对 ESP 的影响

Table 6 Effects of deep soil resistivity on the ESP

层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$	极距/km			接地极 电位/V
		10	30	50	
100	5	19.33	9.05	6.35	127
	50	20.11	9.15	6.34	392
	500	20.19	9.16	6.34	2 443
1 000	5	17.19	8.75	6.35	128
	500	22.22	9.73	6.65	945
	50	17.00	8.82	6.22	336
10 000	500	40.16	10.61	6.48	466
	5 000	116.4	36.02	15.9	591

表 6 的结果进一步验证了上面的结论, 表层土壤主要是影响接地极电气参数, 地表电位的分布和深层电阻率有关。

#### 4.2 大区域内多层土壤模型下电位分析

取表 2 的多层土壤为计算模型, 接地极模型和入地电流保持不变, 固定深层的土壤电阻率不变, 改变表层的土壤电阻率, 计算接地极电压和 50 km 范围内的地表电位, 结果如表 7 所示。

由表 7 可见, 第 I 层, 土壤电阻率的变化对电位基本上没有影响; 第 II 层, 即接地体所在层电阻率增大, 接地极电位增大, 地表电位没有变化; 第 III 层, 土壤电阻率增大, 地表电位及接地体电位都增大。由此可见, 入地直流基本上不在土壤表层流动, 从接地极流出后注入大地深处。地面表层土壤

表 7 浅层土壤不同土壤电阻率对 ESP 的影响

Table 7 Influence of shallow soils of different soil

resistivity on the ESP

层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$	极距/km			接地极 电位/V
		10	30	50	
3 (第 I 层)	5	19.59	9.08	6.31	307
	50	19.91	9.06	6.27	375
	500	19.65	8.99	6.23	386
5 (第 II 层)	5	19.07	8.68	6.01	299
	500	20.92	9.49	6.59	671
	10	20.48	9.33	6.47	298
10 (第 III 层)	500	47.97	21.8	15.11	1 198

电阻率对远场的接地极影响不大。接地极所在层土壤电阻率会影响接地极电位及接地电阻的大小, 从而影响极址附近的跨步电压等电气参数, 但是对于远场的电位影响不大。

### 5 结论

(1) 在计算高压直流输电接地极的电气参数和接地极极址处附近的地表电位时, 应该采用精确的多层土壤模型, 采用典型土壤模型会产生较大的误差, 但对于大区域内的地表电位的分析使用典型土壤模型是可行的。

(2) 接地极电位, 接地电阻和最大跨步电压受地面表层高阻土壤影响较大, 特别是接地极所在层土壤, 减小这一层的土壤电阻率可以大大改善接地极电气参数, 减小接地电阻、最大跨步电压, 减少发热等, 这对于接地极选址也提供了参考。

(3) 接地极电流从接地极流出后注入地下, 在分析地表电位分布时不用考虑表层土壤电阻率的影响, 应该把重点放在大地内部构造上。故精确测量大地深层电阻率是进行接地极相关电气参数计算的关键。精确测量的方式方法有待进一步研究。

### 参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 3-4.

[2] 马俊民, 黄永瑞, 何青连. 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.

MA Junmin, HUANG Yongrui, HE Qinglian. Research on harmonics of 800 kV ultra voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.

[3] 徐宏雷, 郑伟, 周喜超. 特高压直流输电系统对电网谐波污染的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 192-195.

- XU Honglei, ZHENG Wei, ZHOU Xichao. Simulation analysis of grid harmonic pollution affected by ultra high voltage direct current power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 192-195.
- [4] 刘连光, 崔明德, 孙中明, 等.  $\pm 800$  kV 直流接地极对交流电网的影响范围[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1243-1247.
- LIU Lianguang, CUI Mingde, SUN Zhongming, et al. Influence scope of AC network by DC grounding electrode rated  $\pm 800$  kV[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1243-1247.
- [5] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
- KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 81-82.
- [6] 余洋, 韦晨, 朱林. 直流输电接地极电流对不同结构变压器影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 71-76.
- YU Yang, WEI Chen, ZHU Lin. Impact of HVDC ground electrode current on transformers with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 71-76.
- [7] 魏德军. 直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 75-77.
- WEI Dejun. Electro-corrosion impacts of DC grounding electrode on underground metallic facilities[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 75-77.
- [8] 陆继明, 肖冬, 毛承雄, 等. 直流输电接地极对地表电位分布的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 55-58, 91.
- LU Jiming, XIAO Dong, MAO Chengxiong, et al. Analysis of effects of DC earthed pole on earth surface potential distributions[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 55-58, 91.
- [9] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 27-25.
- [10] 陈德智, 黄振华, 刘杰, 等. 水平分层土壤中点电流源电流场的计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1379-1382.
- CHEN Dezhi, HUANG Zhenhua, LIU Jie. et al. Calculation of current field due to a point source in multi-layer soil[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1379-1382.
- [11] 郝治国, 余洋, 张保会, 等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 37(6): 10-14.
- HAO Zhiguo, YU Yang, ZHANG Baohui, et al. Earth surface potential distribution of HVDC operation under monopole ground return mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 37(6): 10-14.
- [12] 陈丹. 锦屏—苏南特高压直流输电入地电流在四川电网内分布的预测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 92-96.
- CHEN Dan. Forecast and analysis of Jinping-Sunan UHVDC earth-return current distribution in Sichuan[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 92-96.
- [13] BO Dong, DANSKIN D W, PIRJOLA R J, et al. Evaluating the applicability of the finite element method for modelling of geoelectric fields[J]. Annales Geophysicae, 2013, 31(10): 1689-1698.
- [14] 崔明德, 刘连光, 孙中明, 等. 高压直流输电环形电极埋深特性分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 156-159.
- CUI Mingde, LIU Lianguang, SUN Zhongming, et al. Analysis of the burial depths of the annular electrodes in HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 156-159.
- [15] 曾连生. 高压直流输电陆地接地极设计: 关于地面电位和跨步电压分布的计算[J]. 电力建设, 1994, 15(3): 12-18.
- ZENG Liansheng. Design of HVDC land ground electrode: calculation of earth potential and step voltage [J]. Electric Power Construction, 1994, 15(3): 12-18.
- [16] DL/T 437-2012 高压直流接地极技术导则[S]. 北京: 国家能源局, 2012.
- [17] 曾连生. 高压直流输电陆地接地极设计—关于极址大地(土壤)参数及其测量[J]. 电力建设, 1994, 15(1): 24-28.
- ZENG Liansheng. Design of HVDC land ground electrode: on the very site land (soil) parameters and their measurement[J]. Electric Power Construction, 1994, 15(1): 24-28.
- [18] DL/T 5224-2005 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2014-12-17; 修回日期: 2015-01-08

作者简介:

刘连光(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全防御与灾害防治, 大电网规划等;

马成廉(1983-), 男, 通信作者, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电力系统安全运行与控制, 电网安全运行与灾害防治, 高压直流输电接地极相关问题等。E-mail: machenglian@nedu.edu.cn

(编辑 周金梅)