

垂直型直流接地极的电极结构对溢流密度的影响

王建武¹, 湛阳¹, 赵胜计², 孙帮新², 陈荔¹

(1. 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;

2. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广州 510663)

摘要: [目的]垂直型直流接地极的溢流密度是关乎接地极性能的关键参数, 因此电极结构对溢流密度的影响值得研究。[方法]针对垂直接地极的结构特点, 分析了子电极数量、子电极长度、子电极间的间隙距离、电极井截面对溢流密度大小和均匀程度的影响。[结果]研究表明: 溢流密度大小与子电极总长度有关, 与子电极分段数量和间隙距离几乎无关; 而溢流不均匀程度与间隙距离和电极井截面有关。[结论]结合计算分析结果提出了优化的垂直型电极结构。

关键词: 垂直型直流接地极; 溢流密度; 电极井; 子电极

中图分类号: TM7; TM862

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0071-06

Influence of HVDC Vertical Earthing Electrode Structure on Current Releasing Density

WANG Jianwu¹, SHEN Yang¹, ZHAO Shengji², SUN Bangxin², CHEN Li¹

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

2. Guangzhou Bureau, EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The current releasing density is one of the key parameters for the performance of DC vertical earthing electrode. [Method] Based on the structure characteristics of vertical DC earthing electrode, study of the influence of sub-electrodes number, sub-electrodes length, sub-electrodes gap distance and electrode well section on the current releasing density and its evenness were carried out. [Result] The study shows that the current releasing density is related to the total length of sub-electrodes, and it is not related to the number of sub-electrodes and the gap distance between them. However, the unevenness of current releasing density is related to the gap distance and the electrode well section. [Conclusion] Optimized vertical electrode structure is presented according to the study results.

Key words: DC vertical ground electrode; current releasing density; electrode well; sub-electrode

目前运行中的高压直流接地极普遍采用水平浅埋式设计, 电极需要埋设在表层土壤电阻率较低的平原地区, 接地极尺寸较大, 占地面积较多。而直流输电受端多落点于用电负荷需求大的区域, 这些区域经济发达, 人口密集, 电网结构复杂, 地下金属设施众多, 选择满足接地极建设条件的开阔场址较困难^[1-4]。

垂直型接地极通常是由多个垂直埋设在土壤中

的电极井并联组成, 可以根据地形情况灵活布置电极井的排列, 如组成圆环形、椭圆环型、马鞍型甚至不规则状等, 地形适应能力强^[5-6]; 此外, 各个电极井也可以根据所在位置的 地面高程变化, 允许存在一定程度的相对埋设高差。因此, 垂直型接地极相较于传统水平接地极而言, 对极址场地的开阔程度以及平整度要求更低, 对接地极的选址意义重大, 具有很高的推广价值。

垂直型接地极设计中的关键要素是单个垂直电极井的结构设计, 如何尽量减小直线型接地极的端部效应等固有属性带来的负面作用^[7-13], 降低溢流密度不均衡程度, 使其结构达到技术经济最优化,

收稿日期: 2018-08-28 修回日期: 2018-10-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型接地极及其环境影响研究”(EV03471W)

是值得探讨的。

1 电极井结构

限于目前大口径钻孔的工程能力和经济性,采用普通的旋挖和冲击钻井方式只能成井至几十米深度,而且上百米深度在很多地区已至岩层,土壤电阻率较高,因此目前已建设和规划中的垂直电极井通常不超过50 m,单口电极井的基本结构也大体相同:电极井整体深度30~50 m;子电极采用圆钢或高硅铬铁,多个子电极在井内上下排列一字布置,子电极间保持一定的距离;每段子电极有独立的馈电电缆连接,子电极在电气上呈并联关系;电极井内填充焦炭,焦炭完全包裹住子电极,焦炭顶面距离地表4~5 m。其中井深是指电极和焦炭组成的电极井长度,不包括顶部埋设深度。结构示意如图1所示。

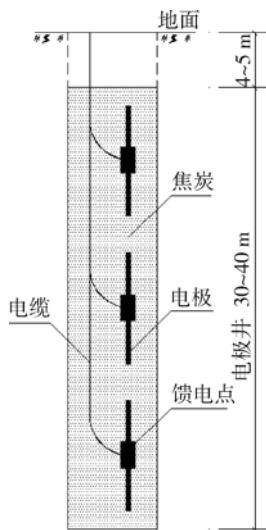


图1 电极井结构示意图
Fig. 1 Electrode well structure

由于子电极本体的电阻率比焦炭的电阻率低几个数量级,因此子电极可认为是等电位体,子电极自身的端部效应会显著影响电极井的溢流密度分布。研究垂直电极的结构与溢流密度之间的关系,可以为电极井设计提供依据。

2 研究方法

为了研究不同电极结构对电极井溢流密度的影响,需假定相同的前提条件:当单口电极井注入电流100 A,土壤电阻率 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 时,通过CDEGS仿真计算分析电极井的结构参数对溢流密度的影

响。溢流密度根据其定义,特指线密度,本文中若非明确提到面密度的情况下,均指线密度。

通常每段子电极与电缆连接的馈电点需用环氧树脂包裹,防止电腐蚀在此处集中发生以致与电缆断开。因此需首先考虑环氧绝缘包封对于溢流密度的影响。

以一段埋深5 m,长35 m的电极井为例,电极采用单根33 m长 $d50$ 圆钢,外层包裹焦炭截面 $\phi 300 \text{ mm}$ 。在电极中间位置馈电,对比馈电点有包封和无包封情况下的电流溢流密度分布,如图2所示。

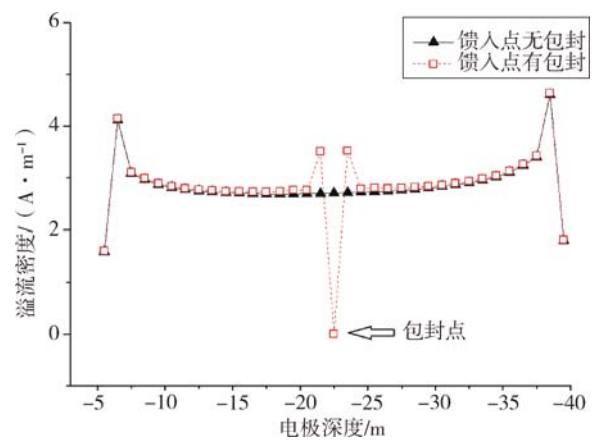


图2 包封点对溢流密度的影响

Fig. 2 Impact of encapsulation on current releasing density

由图2可知,包封点只是影响电极馈电点附近的电流溢流密度分布,但是整根电极的最大溢流位置还是在上下两个端部,而且端部的溢流密度大小也基本不受影响。这种规律也与实际测量情况一致^[8]。由于包封点对溢流分布的影响是局部且有限的,因此在后续研究中,为便于分析可以忽略包封点,假设馈电点是不带绝缘包封的。

另外,从图2中可以看出,当馈入点无包封时,馈电点处的溢流密度数值相较于其两侧没有明显的突变,由此可推断,改变馈电点的数量和位置均不影响溢流分布。在后续分析中,可假定从子电极的任意位置馈电而不影响分析结果。

3 电极结构对溢流密度分布的影响

本节将分别分析子电极数量、子电极长度、子电极间的间隙距离、电极井截面(即焦炭截面)大小等各种井身结构参数,对溢流密度分布的影响。

3.1 子电极数量对溢流密度分布的影响

讨论当电极总长度相同、子电极之间的间隙距离相同、焦炭截面相同时, 子电极分段数不同对溢流密度分布的影响。

假定井深为 35 m, 埋深 5 m, 井径 $\phi 300$ mm, 子电极分 1 段、3 段、5 段三种情况。电极仅 1 段时长度 33 m, 顶端和低端均有 1 m 无金属导体, 仅填充焦炭; 子电极分 3 段时, 每段电极长 10 m, 电极之间、顶端和低端均有约 1 m 为焦炭; 子电极分 5 段时, 每段电极长 6 m, 电极之间、顶端和低端均有约 1 m 为焦炭。仿真计算采用的电极井结构如图 3 所示。

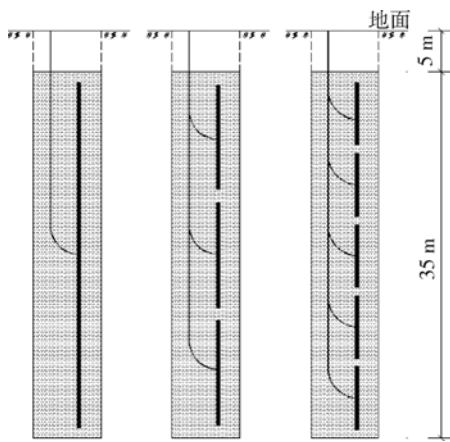


图 3 不同子电极数量的结构

Fig. 3 Structures with various sub-electrode number

仿真计算结果如图 4 所示, 其中部溢流密度明显较低的点为子电极间隙位置。从电流溢流密度的分布对比图中, 可以看出在子电极间隙的两侧存在溢流密度的极值点, 然而从整个电极井来看, 电极井的上下两端仍然是溢流密度最大值的位置, 且基本不受分段数量的影响。

分为多段子电极后, 虽然每个子电极都存在各自的端部效应, 但相互之间的区域电位梯度相对不大, 在整体上电位梯度最大的位置仍然是子电极组的两个端部。

虽然电极分段对溢流分布没有明显的改善作用, 但在工程实践当中, 分段的意义在于材料运输以及施工的便利性, 同时降低断缆带来的运行风险, 从而提高可靠性。

3.2 子电极之间间隙距离对溢流分布的影响

讨论当电极分段数量相同、每段子电极长度相同、焦炭截面相同时, 子电极之间的间隙距离的不同对溢流密度分布的影响。

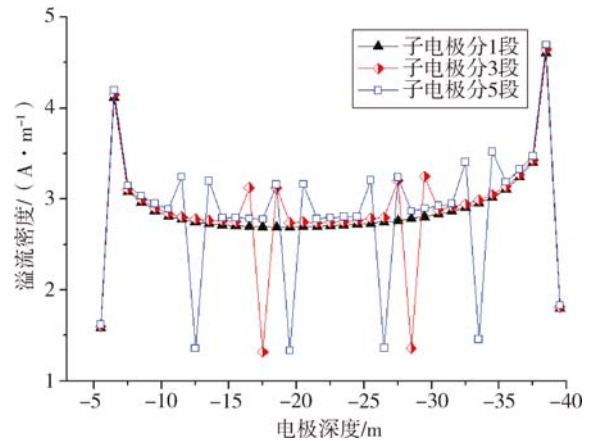


图 4 不同子电极数量的溢流密度分布

Fig. 4 Current releasing density of electrode wells with various sub-electrode number

假定井深为 35 m, 埋深 5 m, 井径 $\phi 300$ mm, 子电极分为 3 段, 每段长度为 10 m。子电极之间的间隙分别为 1 m、2 m、5 m 三种情况, 电极井的长度相应的依次为 34 m、38 m、50 m。子电极之间、顶端和低端均有焦炭间隙。仿真计算采用的电极井结构如图 5 所示。

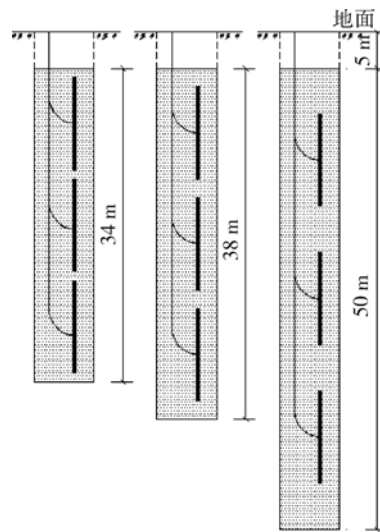


图 5 不同子电极之间间隙的结构

Fig. 5 Structure with various separation between sub-electrodes

仿真计算结果如图 6 所示。可见溢流分布基本还是在电极本体周围, 间隙越大, 则每根子电极的端部效应显得更独立; 间隙越小, 子电极相互靠近的一端端部效应被削弱, 子电极组成的电极整体端部效应更加明显。但上述几种情况下, 电极上溢流分布的差异很小。

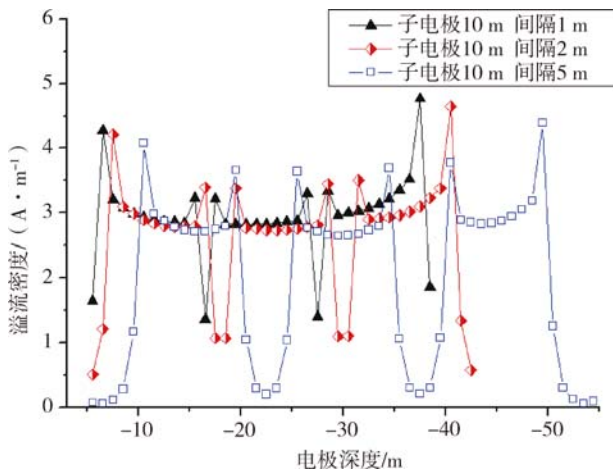


图6 不同子电极之间间隙的溢流密度分布

Fig. 6 Current releasing density of electrode wells with various separation between sub-electrodes

单纯加大间隙带来的溢流密度最大值的改变并不明显,例如对比35 m和50 m的电极井,最大溢流密度仅从4.76 A/m减少到4.39 A/m。

因此工程中在其它条件不变的情况下,仅增加子电极间隙距离的技术经济性不高。在井深一定的情况下,充分利用井身长度泄流更为经济。

3.3 子电极长度对溢流分布影响

分析当电极分段数量相同、焦炭截面相同时,子电极长度不同对溢流密度分布的影响。

假定井深为35 m,埋深5 m,井径 $\phi 300$ mm,子电极分为3段,子电极的长度分别为11 m、9 m、5 m三种情况。子电极均匀的布置在井身内,电极间隙、电极井顶端和低端的部分均填充焦炭。仿真计算采用的电极井结构如图7所示。

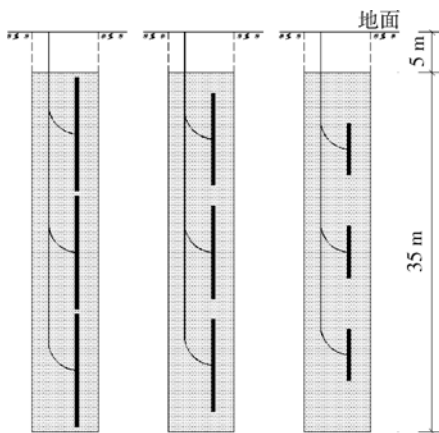


图7 不同子电极长度的结构

Fig. 7 Structure with various sub-electrode length

仿真计算结果如图8所示。从电流溢流密度的分布对比图中,可以看出电极井深度一定、子电极分段数量确定时,电极长度越长,电流的溢流密度越均匀,最大溢流密度的数值也更小。子电极的长度为11 m、9 m、5 m时的最大溢流密度分布为4.27 A/m、5.03 A/m、7.15 A/m。由3.2可知,子电极之间的间隙距离对溢流密度的影响很小,这种数值上的较大差异是由于电极的电阻率远远小于填充物焦炭,因此电流基本在电极处向四周泄流,电极越长,溢流位置越分散,可利用于泄流的井身长度越长。

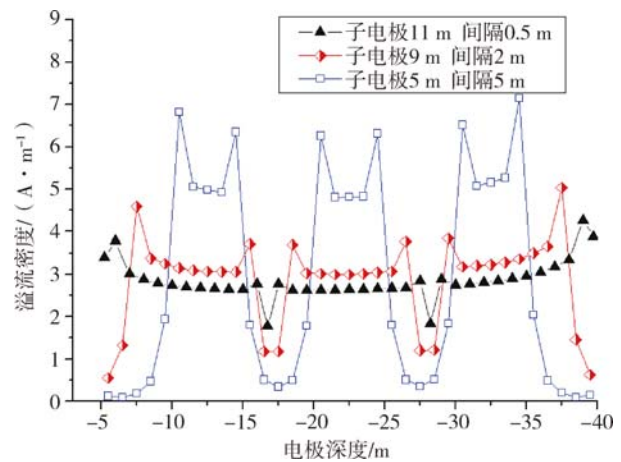


图8 不同子电极数量的溢流密度分布

Fig. 8 Current releasing density of electrode wells with various sub-electrode length

在工程中,这意味着一旦确定了井深和子电极分段数量,每段电极需设计得尽可能长,则可充分利用井身泄流,从而减小溢流密度并减小溢流不均匀度。

3.4 电极井直径对溢流分布的影响

讨论当子电极分段结构完全相同时,电极井直径(焦炭截面)的不同对溢流密度分布的影响。

假定井深为35 m,埋深5 m,子电极分为3段,每段长度为10 m,子电极间隙约1 m。电极井内充分填充焦炭。分别对电极井的直径为0.1 m、0.5 m、1 m三种情况进行仿真计算,结果如图9所示。

可以看出,焦炭截面越大电流溢流密度的不均匀程度也越大,然而决定温升的因素是溢流面密度。举例说明,虽然直径1 m的电极井最大溢流线密度是直径0.1 m电极井的约1.6倍,但井径却增

加了 10 倍, 因此溢流面密度反而只有 0.1 m 电极井的 16%, 温升情况将大为改善。

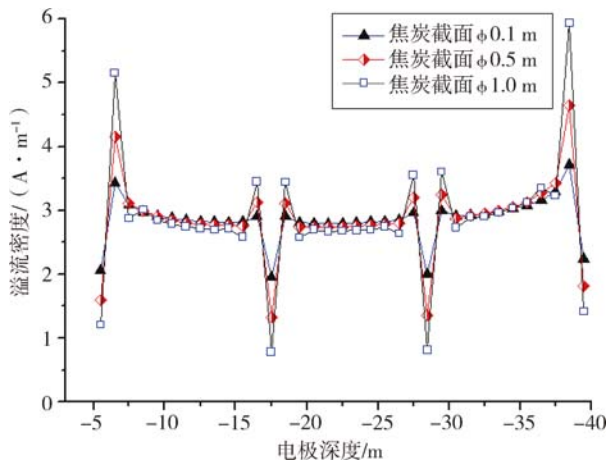


图 9 不同电极井直径的溢流密度分布

Fig. 9 Current releasing density of electrode wells with various diameter

实际工程中, 垂直接地极井的直径通常在 1 m 左右, 溢流不均匀意味着在极井的顶端和底端电腐蚀速率最快, 因此在顶端和底端采用更大尺寸的电极, 或在两端采用两根电极增加耐腐蚀量, 可以一定程度上缓解这种腐蚀集中带来的负面影响。

需要说明的是, 由于电腐蚀在电极端部更快, 因此长期运行后的电极井内电极可能变短, 从而出现 3.2 节中反映出的溢流密度更加集中且变大的情况。因此在接地极设计阶段, 必须考虑到全寿命周期内当这种不均匀电腐蚀发生后, 井内温升仍要能够满足设计指标。

4 电极结构优化

综合以上述对比研究, 可以对垂直型接地极的子电极结构进行优化布置。馈电电极的总体长度宜尽量长, 子电极之间的间隙距离宜尽量小; 电极分段则根据电极的制造、运输和安装的便利性决定; 馈电点宜在电极的中间位置。

以较为典型的埋深 5 m, 电极井长度 35 m, 采用钢棒作为电极的情况为例。如图 10 所示, 分为三段或者四段子电极, 两端均采用两根钢棒以增加耐腐蚀能力, 每段子电极间距约 0.5 m, 各子电极除独立连接引流电缆馈电外, 相邻子电极还可相互跨接以增加馈电可靠性。

电极井直径则需根据实际的土壤参数、入地电

流大小和时间、温升限值等约束条件来进行具体的工程计算。

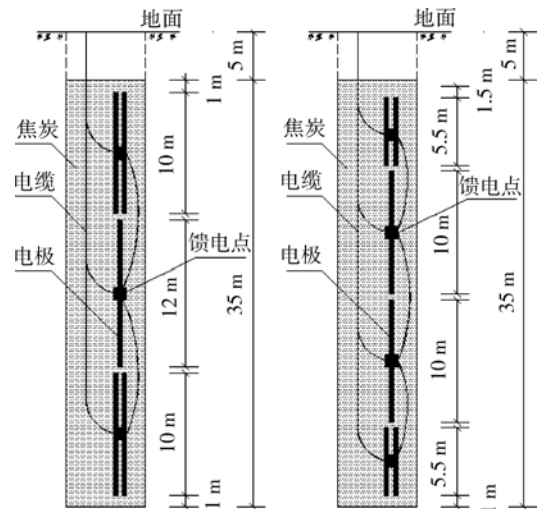


图 10 优化的电极结构

Fig. 10 Optimized electrode structure

5 结论

本文针对垂直型直接地极的结构特性, 分析了各种结构参数对溢流密度大小和均匀程度的影响, 得出的结论如下:

1) 子电极分为数段后, 虽然在分段位置出现了溢流极值, 但溢流密度最大值始终出现在电极井的顶端和底端。且分段数量对最大溢流密度几乎没有影响。

2) 电极井深度一定、子电极分段数量一定时, 每段子电极长度越长, 溢流密度越小且不均匀程度越低。

3) 子电极的数量和长度一定时, 电极间的间隙越大, 溢流密度越小且不均匀程度越低, 但间隙长短对溢流密度分布影响的程度非常小。

4) 其它条件一定时, 电极井直径越大, 溢流密度的不均匀程度越大不均匀电腐蚀问题将更突出。

5) 工程设计中, 电极的分段数量仅需要从施工安装和导流可靠性角度进行考虑; 电极宜充分利用井身长度安装, 子电极之间的间距可尽量缩小; 井口直径的设计在满足温升要求后, 需考虑同时带来的溢流不均匀和局部电腐蚀情况, 在电极井的顶端和底端应适度增加电极的设计腐蚀裕度, 以减小局部电腐蚀带来的负面影响。

参考文献:

- [1] 赵曦君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] CIGRE W G. General guidelines for HVDC electrode design [R]. [S. l.]: CIGRE, 2017.
- [3] 国家电网公司. 向家坝~上海±800 kV 直流输电工程环境影响报告书 [R]. 北京: 国家电网公司, 2007.
- [4] 曾连生. 高压直流输电陆地接地极设计——接地极形状、尺寸和埋深的确定 [J]. 电力建设, 1994, 15(2): 12-18.
- [5] 谭威, 孔志达, 简翔浩. 垂直型直接地极设计探讨 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 60-63.
TAN W, KONG Z D, JIAN X H. Discussion on DC vertical ground electrode design [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 60-63.
- [6] 周挺, 曾连生, 王伟刚, 等. 垂直型接地极在±800 kV 普洱换流站的应用 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 31-35.
ZHOU T, ZENG L S, WANG W G, et al. Application of vertical ground electrode in ±800 kV Pu'er converter station [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 31-35.
- [7] 陈水明, 施广德, 赵智大. 直线形直流输电接地极电流场分析 [J]. 高电压技术, 1994, 2(3): 8-13.
CHEN S M, SHI G D, ZHAO Z D. Analysis of current fields around linear-type HVDC ground electrodes [J]. High Voltage Engineering, 1994, 2(3): 8-13.
- [8] 曹林, 赵杰, 张波, 等. 高压直流输电直线型接地极系统分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 92-94.
CAO L, ZHAO J, ZHANG B, et al. Analysis of HVDC linear ground electrode system [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 92-94.
- [9] 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.
WANG J W, DU Z D, LI J Y, et al. Grounding performance study and economic comparison on vertical grounding electrodes of UHVDC [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 59-61.
- [10] 崔明德, 刘连光, 孙中明. 溪洛渡和向家坝特高压直流输电换流站接地极型式的研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 17-21.
CUI M D, LIU L G, SUN Z M. Research of types of grounding poles for HVDC converter stations located in Xiluodu and Xiangjiaba [J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 17-21.
- [11] 袁涛, 司马文霞, 李晓莉. 两种常见接地极电流分布的探讨 [J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 239-242.
YUAN T, SIMA W X, LI X L. Current distribution of two kinds grounding electrode [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 239-242.
- [12] 王羽, 李晓萍, 罗思敏, 等. 垂直型直接地极暂态温升计算与试验 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 184-190+2.
WANG Y, LI X P, LUO S M, et al. Test and computation for vertical ground electrode's transient temperature rise [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(10): 184-190+2.
- [13] 罗宇航, 李兴. 云广特高压直接地极母线差动保护状态识别信号的改进 [J]. 广东电力, 2017, 30(3): 122-127.
LUO Y H, LI X. Improvement on electrode bus differential protection state identification signals in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 122-127.

作者简介:



WANG J W

王建武(通信作者)

1981-, 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事变电设计及技术管理工作 (e-mail) wangjianwu@gedi.com.cn。

谌阳

1986-, 男, 四川成都人, 工程师, 工学硕士, 主要从事变电电气一次设计工作 (e-mail) shenyangcdqz@163.com。

赵胜计

1973-, 男, 湖北武汉人, 一级建造师, 主要从事输变电建设管理工作 (e-mail) 3212685766@qq.com。

项目简介:

项目名称 新型接地极及其环境影响研究 (EV03471W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 项目总结了常规和共用直接地极的设计经验, 依托滇西北送电广东特高压直流输电工程, 研究了垂直接地极、深井接地极、广域接地极、海洋接地极核心技术及其对周围环境的影响, 为后续金中直流、滇西北直流、准东直流等直流工程的接地极设计提供了新的解决方案。

主要创新点 (1) 垂直接地极和深井接地极的成孔方案、导流系统、排气问题及施工方案, 可解决目前接地极选址难的问题; (2) 广域接地极场路电磁耦合模型、电热耦合模型、分流计算及分流控制措施, 可在不新增接地极的情况下解决新建直流工程接地极选址困难问题; (3) 海洋接地极的本体设计方案、导流系统和施工方案研究, 为直流工程提供了一种不占用土地资源的接地极解决新方案; (4) 建立了接地极对交流电网、埋地油气管道等周围环境的评估标准。

(责任编辑 郑文棠)