

基于 CDEGS 软件的高土壤电阻率地区 主变电所接地网设计

曹建设

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安)

摘 要 [目的]为解决高土壤电阻率地区主变电所接地电阻难以降低的问题,有必要对高土壤电阻率地区主变电所的接地网设计进行研究。[方法]结合该主变电所的地理位置条件及土壤电阻率特点,通过单一变量法确定了水平接地体的合理数量;基于 CDEGS 仿真软件分析了水平接地体按指数非均匀布置时,接触电势、跨步电压及接地电阻的改善效果;提出了降低接地电阻的优化措施。[结果及结论]当水平接地网导体数量增加到一定程度后,导体的边际效应会大幅下降;垂直接地极对降低该主变电所的接地电阻作用不大,设计中不建议采用;采用深井接地极后,主变电所的接触电势、跨步电压均大幅降低,接地电阻也降至 $0.5\ \Omega$ 以下,均满足规范要求。

关键词 城市轨道交通;主变电所;接地网;高土壤电阻率
中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.056

Design of Grounding Grid for Main Substations in High Soil Resistivity Areas Based on CDEGS Software

CAO Jianshe

(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] To address the difficulty of reducing the grounding resistance of main substations in high soil resistivity areas, it is necessary to study the design of grounding grids for main substations in such regions. [Method] Combining the geographical location conditions and soil resistivity characteristics of the main substation, a reasonable quantity of horizontal grounding conductors is determined using single-variable method. The improvement effects of contact potential, step voltage, and grounding resistance are analyzed using CDEGS simulation software when horizontal grounding conductors are arranged in exponential non-uniform distribution. Optimization measures to reduce grounding resistance are proposed. [Result & Conclusion] After increasing the quantity of horizontal grounding grid conductors to a certain extent, the marginal effect of the conductors decreases significantly. The

vertical grounding electrode has little effect on reducing the grounding resistance of the main substation and is not recommended for use in the design. With the use of deep well grounding electrodes, both the contact potential and step voltage of the main substation are significantly reduced, and the grounding resistance is reduced to below $0.5\ \Omega$, meeting the requirements in related specifications.

Key words urban rail transit; main substation; grounding grid; high soil resistivity

随着经济发展,西北地区的城市轨道交通也将加快发展,这些地区由于降雨量小、土壤砂石比例高,土壤电阻率普遍很大。随着电网系统容量的不断增大,主变电所入地电流也逐渐增大,使得高土壤电阻率地区的主变电所接地设计非常困难。

CDEGS 软件由加拿大安全工程服务与技术有限公司研发,其 AutoGroundDesign 模块可对现场土壤率的测量数据进行分析 and 模拟,确定土壤结构,并计算接地网接地电阻。此外,基于短路电流在接地网的分流值,CDEGS 软件能够计算出接地网的接触电压及跨步电压,并将其与安全限值进行比较。

本文以高土壤电阻率地区某主变电所的接地设计为例,结合该主变电所的地理位置条件及土壤电阻率特点,基于 CDEGS 软件,提出了接地网设计方案及降低接地电阻的优化措施。本文研究可为高土壤电阻率地区的牵引变电所接地网设计提供降低接地电阻的工程经验。

1 模拟土壤电阻率

主变电所所址的土壤岩性由上至下主要为耕土、粉土、粉砂,可利用 CDEGS 软件的 RESAP 模块对土壤进行三层分析。土壤模型呈现出上层和底层土壤电阻率低,中间层土壤电阻率较高的特性。由于在该主变电所所址地面下约 10 m 处,主要分布的是碎屑岩类裂缝孔隙承压水,故底层土壤的电阻

率下降较大。土壤分层模拟详细数据如表1所示。

表1 土壤分层模拟详细数据

Tab.1 Detailed data of soil stratification simulation

项目	电阻率/($\Omega \cdot m$)	厚度/m
空气层	∞	∞
土壤电阻率分层2	99.00	1.58
土壤电阻率分层3	531.76	5.66
土壤电阻率分层4	79.91	∞

2 主变电所水平接地网设计方案

2.1 主变电所接地网设计要求

参照 IEEE Std 80—2013 *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, 故障清除时间取为 0.5 s, 绝缘表层电阻率取为 3 000 $\Omega \cdot m$, 绝缘表层厚度取为 10 cm, 人体质量取为 50 kg, 主变电所安全的接触电势为 658.8 V, 安全的跨步电势为 2 171.8 V。根据 GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》, 接地电阻 R 应满足的要求为:

$$R \leq 2000/I_g \quad (1)$$

式中:

I_g ——接地网入地最大短路电流, 单位 A。

但 GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》同时也规定了, 当不满足式(1)要求时, 在确保人身安全和设备安全可靠时, 可适当增大接地电阻。本文案例中, 主变电所接地网的接地电阻按不大于 0.5 Ω 设计。

水平接地网在降低接地电阻方面起到了关键性作用, 水平接地网的设计主要涉及水平接地网的面积、接地材料的选择、导体数量的选择及布置等三个方面。水平接地网的面积应尽可能扩大, 但其往往受限于主变电所所址面积及周边地理环境。接地材料选择铜材, 铜材在导电性、耐腐蚀性和施工便利性方面具有较大的优势。从经济性角度出发, 当确定水平接地网的导体数量时, 需考虑导体的边界效应。

2.2 确定水平接地网导体数量

根据主变电所地形, 将水平接地网设置为长方形(74.4 m \times 42.0 m)。水平接地体采用 40 mm \times 4 mm 的铜扁线, 埋深为 0.8 m, 导体暂按等间距布置。根据电力部门提供的外部电源系统图及相关电气资料, 主变电所入地短路电流取为 5 600 A。

在导体数量选择方面, 本文基于单一变量

法^[1], 通过 CDEGS 软件进行仿真分析。当 x 轴方向的导体数量设定为 12 根, y 轴方向的导体数量设定为 5 ~ 11 根时, 分析仿真结果可知, 随着 y 轴方向导体数量的增加, 最大接触电势和最大跨步电压整体呈下降趋势, 但当 y 轴方向导体数量增加到一定量后, 导体的边际效应呈递减趋势。当 x 轴方向的导体数量为 12 根时, 最大跨步电压与 y 轴方向导体数量之间的关系如图 1 所示。由图 1 可知, 当 y 轴方向导体数量由 10 根增加到 11 根时, 最大跨步电压并没有明显的下降。

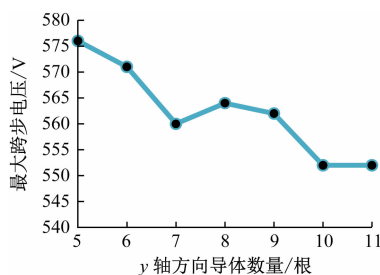


图1 最大跨步电压与 y 轴方向导体数量之间的关系(x 轴方向导体数量为 12 根)

Fig.1 Relation between maximum step voltage and the number of conductors in y -axis direction (the number of conductors in x -axis direction to be 12)

当 y 轴方向导体数量设定为 10 根, x 轴方向导体数量由 12 根增加到 13 根时, 分析仿真结果可知, 最大跨步电压没有发生明显的降低, 导体的边际效应呈递减趋势。此外, 通过进一步研究发现, 导体数量在一定范围内变化时(x 轴方向设置 11 ~ 16 根, y 轴方向设置 5 ~ 11 根), 接地电阻仅在 1.139 ~ 1.167 Ω 小范围变化, 这说明仅通过增加接地网 x 轴方向导体数量并不能大幅降低接地电阻。

综上所述, 将主变电所水平接地网 x 轴方向导体数量设置为 12 根, y 轴方向导体数量设置为 10 根, 该水平接地网范围内的最大接触电势为 1 067.75 V, 最大跨步电势为 213.18 V, 接地电阻为 1.142 Ω , 均不满足接地网设计要求。

2.3 水平接地体按指数非均匀布置

在大多数情况下, 导体在接地网边缘位置布置得更紧密一些, 能够使接地网的效果更为有效^[2-3]。在不同指数 c 条件下, 基于 CDEGS 软件对非均匀布置的水平接地体进行模拟分析。分析软件模拟结果可知, 当 $c = 0.7$ 时, 水平接地体的布置效果更好。当 $c = 0.7$ 时的水平接地体非均匀布置软件截图如图 2 所示。

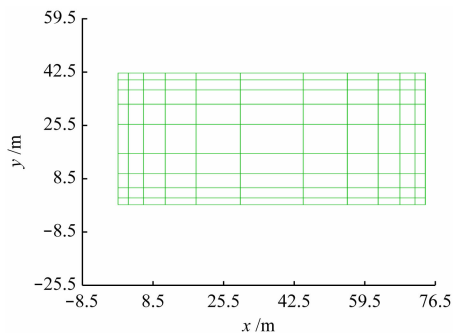


图2 当 $c=0.7$ 时的水平接地体非均匀布置软件截图
Fig.2 Software screenshot of non-uniform arrangement of horizontal grounding conductors when $c=0.7$

当接地网水平接地体按 $c=0.7$ 非均匀布置时,接触电势和跨步电势的仿真结果软件截图如图3所示。由图3可知:接地网范围内的最大接触电势为725.10 V,最大跨步电势为204.08 V。与水平接地体均匀布置时的情况相比,接地网内的最大接触电势有明显的改善,但跨步电压的改善不明显。非均匀布置的接地电阻为1.139 3 Ω ,接地电阻也有所降低,但改善不明显。

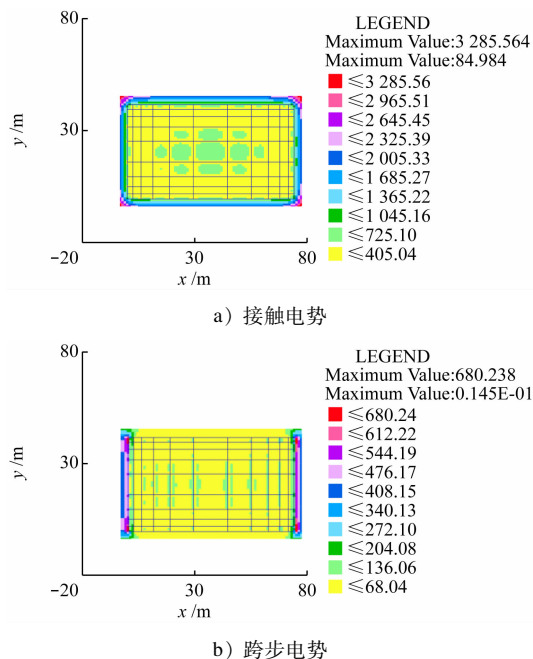


图3 水平接地网非均匀布置时的接触电势和跨步电势软件截图
Fig.3 Software screenshot of contact potential and step potential for horizontal grounding grid non-uniform arrangement

3 优化接地网措施

为进一步降低主变电所的接地电阻,常见措施

主要有扩大水平接地网面积、外引地网、增设垂直接地体、设置深井接地极等^[4-6],甚至可根据土壤结构考虑双层接地网^[7]。轨道交通的主变电所一般位于大城市,受主变电所周边土地规划的限制,若在原有所址的基础上进一步扩大接地网面积或外引地网,具体实施起来较为困难。因此,本文仅对增设垂直接地体和深井接地极两种方案的优化效果进行分析。

3.1 增设垂直接地体

在图2的基础上增设垂直接地体,垂直接地体采用直径为20 mm、长为2.5 m的铜接地棒。经仿真分析可知,该综合接地网范围内的最大接触电势为706.22 V,最大跨步电势为163.81 V。相比于仅设置水平接地网时的情况,最大跨步电势有较大的减小,但最大接触电势改善不明显。综合接地网的接地电阻为1.117 8 Ω ,仅降低了0.020 0 Ω 。

垂直接地体的改善效果在很大程度上取决于深层土壤电阻率。本文案例中的主变电所所址的中间层土壤电阻率最大,达到了531.76 $\Omega \cdot m$,长为2.5 m的垂直接地体恰好打在土壤电阻率最大的地层,这是垂直接地体改善效果不明显的根本原因。因此,增设垂直接地体的措施不建议在该主变电所案例中采用。

3.2 增设深井接地极

由于地下裂缝孔隙承压水的存在,土壤电阻率在深层土体处有大幅下降,因此考虑在主变电所内设置30处深井接地极。深井接地极还能够解决该地区冻土对接地网的影响^[8-9]。接地极采用直径为50 mm、长为20 m的铜包钢材料,增设深井接地极后的接地网软件截图如图4所示。增设深井接地极后的接触电势和跨步电势的仿真结果软件截图,如图5所示。由图5可知:接地网范围内的最大接触电势为144.37 V,最大跨步电势为42.36 V,接地网的接地电阻为0.471 4 Ω ,均满足接地网设计要求。

4 结论

1) 水平接地网的面积和土壤电阻率决定了接地网的接地电阻值;当导体数量增加到一定程度后,边际效应有所下降;可通过单一变量法仿真确定水平接地体的合理数量。

2) 水平接地体按指数非均匀布置时,接地网内的最大接触电势有明显改善,跨步电压值和接地电阻值有所改善,但改善不明显。

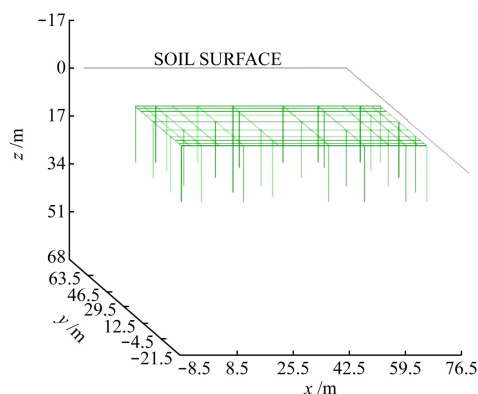
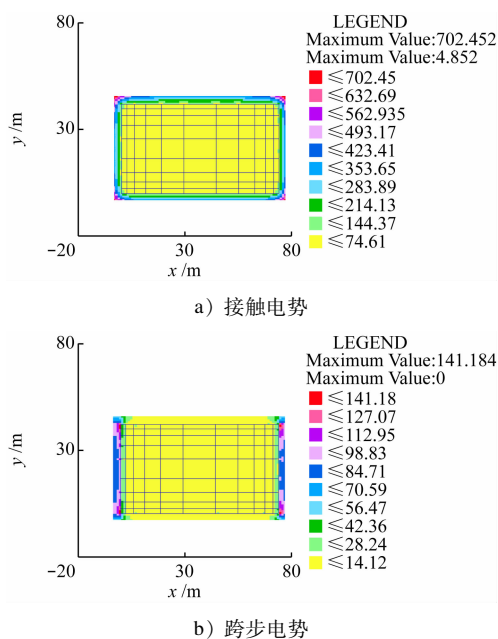


图4 增设深井接地极后的接地网软件截图

Fig.4 Software screenshot of grounding grid after adding deep well grounding electrode

图5 增设深井接地极后的接触电势和跨步电势软件截图
Fig.5 Software screenshot of contact potential and step potential after adding deep well grounding electrode

3) 对于深层土壤电阻率大的地区,采用增设垂直接地极的措施对降低接地电阻的作用不大。

4) 由于地下裂缝孔隙承压水的存在,土壤电阻率在深层土体处有大幅下降,采用增设深井接地极的措施后,接触电势、跨步电压均有大幅度降低,接地电阻也降到 $0.500\ 0\ \Omega$ 以下,均满足设计规范要求。

参考文献

[1] 吉杨, 李智慧, 李振龙, 等. 基于单一变量法的大用户线损管理辅助决策模型研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(8): 35.
JI Yang, LI Zhihui, LI Zhenlong, et al. Decision supporting model for big customer line loss management based on single variable

method[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(8): 35.

[2] 曹晓斌, 胡劲松, 吴广宁, 等. 均匀土壤中矩形接地网的优化方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2721.

CAO Xiaobin, HU Jinsong, WU Guangning, et al. Optimization method to rectangular grounding grid in uniform soil [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2721.

[3] 吉春宇. CDEGS 软件在特高压变电站接地设计应用研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.

JI Chunyu. Application research on CDEGS software in design of UHV substation grounding[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.

[4] 郝帅. 高土壤电阻率地区牵引变电所降低接地电阻的措施探讨[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 124.

HAO Shuai. Discussion on measures to reduce the grounding resistance of traction substation in high soil resistivity areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 124.

[5] 权学政, 李朝霞, 崔崇雨. 深水井接地极在变电站接地网降阻中的应用[J]. 东北电力技术, 2019, 40(11): 24.

QUAN Xuezheng, LI Zhaoxia, CUI Chongyu. Application of deep water well grounding on substation grounding grid resistance reduction [J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(11): 24.

[6] 禹荣勋, 黄帅, 朱泽慧, 等. 复杂土壤条件下的深井法降阻研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 91.

YU Rongxun, HUANG Shuai, ZHU Zehui, et al. Resistance reduction research of deep blasting method under complex soil conditions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 91.

[7] 吴波. 复杂艰险山区铁路牵引变电所接地网设计研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 150.

WU Bo. Research on grounding grid design of traction substation on complex and dangerous mountainous railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 150.

[8] 马力. 季节性冻土地区变电站接地系统安全分析及降阻措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

MA Li. The safety analysis and the study on reduction measures of substation grounding system in seasonal frozen soil area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[9] 霍广勇, 王红, 周雄伟, 等. 乌鲁木齐地区土壤温、湿度变化对接地电阻的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(6): 70.

HUO Guangyong, WANG Hong, ZHOU Xiongwei, et al. Effects of the changes in soil temperature and moisture on ground resistance in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(6): 70.

· 收稿日期:2022-02-25 修回日期:2022-04-06 出版日期:2024-07-10

Received:2022-02-25 Revised:2022-04-06 Published:2024-07-10

· 通信作者:曹建设,正高级工程师,jianshecao@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license