

复杂土壤条件下变电站接地网施工与检测研究

胡红霖 李云龙

温州电力建设有限公司, 浙江 温州 325000

[摘要]变电站接地网性能受土壤条件影响较大,在复杂的土壤环境中施工和检测属于电力工程的技术难题。研究发现复杂土壤条件下接地网性能受土壤电阻率分布、土层结构不同、材料腐蚀等影响。从施工工艺、检测技术、质量控制三个方面对复杂土壤条件下采取的关键措施进行了系统的整理。施工上给出分层土壤接地体敷设方案和材料匹配原则,在检测上给出接地电阻测量、接触电压检测、腐蚀诊断的适用方法。根据非均匀土壤模型进行接地参数优化设计,采用施工过程精细化控制和在线监测的方法,是提高接地网工程安全性的一种途径。

[关键词]复杂土壤条件;变电站接地网;接地检测

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20339

中图分类号: TM862

文献标识码: A

Research on Construction and Testing of Substation Grounding Grid under Complex Soil Conditions

HU Honglin, LI Yunlong

Wenzhou Electric Power Construction Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract: The performance of substation grounding network is greatly affected by soil conditions, and construction and testing in complex soil environments are technical difficulties in power engineering. Research has found that the performance of grounding grids under complex soil conditions is affected by factors such as soil resistivity distribution, different soil layer structures, and material corrosion. A systematic review was conducted on the key measures taken under complex soil conditions from three aspects: construction technology, testing techniques, and quality control. Provide a layered soil grounding body laying plan and material matching principles during construction, and provide applicable methods for grounding resistance measurement, contact voltage detection, and corrosion diagnosis during testing. Optimizing the design of grounding parameters based on non-uniform soil models, using refined control and online monitoring methods during construction, is a way to improve the safety of grounding network engineering.

Keywords: complex soil conditions; substation grounding network; ground detection

引言

变电站接地网具有故障电流泄放和电位均衡的作用,它的可靠程度直接关系到设备的安全以及运行的稳定。随着站址资源越来越紧张,越来越多的变电站被建在山区、高电阻率或者地质构造复杂的地区,给接地网的设计、施工和验收带来了很大的困难。高土壤电阻率区复合接地体施工时,降低接地电阻的措施选择要和现场条件相适应,既要考虑施工可行性又要考虑长期运行效果。复杂土壤环境里,常规施工工艺很难达到设计要求,传统的检测手段也受到场地的限制和精度的不足。国内外的研究表明,分层土壤结构模型可以较好地模拟实际的非均匀土壤,是进行接地设计及性能评价的基础。根据具体的土壤条件来制定适合

的施工方案和检测方法,已经成为接地工程技术领域研究的重点。

1 复杂土壤条件下变电站接地网施工与检测的基本要求

复杂土壤条件下接地网工程要达到三个基本要求。安全可靠方面接地电阻、接触电压、跨步电压等主要参数应保证在设计使用年限内一直满足规程限值。接地网埋入地下0.6~1.5m,担负着过流、冲击电流的疏导作用,如果由于土壤电化学腐蚀造成接地网断裂或者接头氧化,使得接地电阻超标,就会产生危险的电位差,引发设备停运或者安全事故。施工可实施性上,施工工艺要适应高电阻率、岩石地层或者季节性冻土等场地条件,保证接地体的有效

埋深和连接质量。检测可及性上,检测方法必须可以在有限的场地内获得反映接地网真实状态的参数,并且对隐蔽缺陷有诊断能力。全生命周期管理思想认为施工阶段给后续的运维留有检测的条件。各项基本要求当中,不同的复杂土壤条件下对接地网施工和检测的影响也大不相同,见表1。

2 复杂土壤条件下接地网施工的主要影响因素

2.1 土壤电阻率与土层结构的影响

土壤电阻率是决定接地电阻值的主要因素。高电阻率土壤中电流散流被阻碍,同样的接地网接地电阻大^[1]。土壤电阻率的实测值与设计图纸规定值差别较大时,应根据实测值选择合适的导电接地材料规格,并调整施工参数来达到接地要求。土层结构的影响也不能忽略,水平分层的土壤中,电流场分布与均匀介质模型有较大差别,接地电阻计算要考虑到分层界面对散流路径的影响。利用等值复数镜像法和双侧递推法求解复杂分层土壤结构中单位电流源产生的格林函数,可以提高接地参数计算的准确性。另外,土壤电阻率的季节性变化以及冻融循环都会造成接地性能出现波动,施工设计时必须加以考虑。

工程实践中表层土壤电阻率一般远小于深层岩层或者大于深层含水层,形成典型的两层或者三层土壤结构,不同层位之间电阻率比值可达数倍到数十倍。接地体穿过电阻率突变界面的时候,电流散流路径会变得弯曲,一部分电流沿着界面水平流动不能向深层扩散,从而使得等效散流体积远远小于均匀土壤假设所得到的理论值。尤其在基岩埋深较浅的地方,高阻岩层就像电流反射屏障一样,使得接地电阻急剧增大。对于这类场地,在不同的季节分别进行测试,得到土壤电阻率随深度变化的曲线,从而找出有效散流层的厚度和垂直接地极最佳穿透深度,以最大限度地利用低阻层散流作用的目的。同时要要进行土壤

热特性的辅助测试,因为高电阻率的土壤导热性差,在故障大电流通过的时候温升明显,会使得接地体周围的土壤水分蒸发、电阻率变坏,从而产生正反馈。这些因素互相叠加,使复杂土壤条件下接地设计和施工比均匀土壤情况要复杂得多,在前期勘察阶段就必须对它们进行充分的识别和量化。

2.2 接地网材料与施工工艺的影响

复杂土壤环境下接地材料的腐蚀问题成为决定接地网长期可靠运行的关键因素,220kV 火龙岗变电站工程实践证明,根据不同的土壤特性采用分区分块的方式设计阴极保护防蚀系统,可以有效地抑制接地体的电化学腐蚀。材料选型上,常规镀锌钢在高盐、高酸或者高湿度的土壤中腐蚀速度变快,铜材、铜包钢或者导电高分子材料在某些腐蚀性环境下耐久性更好。施工工艺上,垂直接地体的夯入方式对它的完整性有影响。垂直接地极夯入后,可以用便携式硫酸铜参比电极和万用表测量其自然电位,根据电位判断接地极是否破损,如果出现破损需要重新夯入。焊接工艺对接头长期导电可靠性影响较大,放热焊接比电弧焊接抗腐蚀性更好^[2]。这些因素互相联系,必须在施工方案中加以考虑。

不同的材料在复杂的土壤环境中,要根据腐蚀机理来做出综合判断。镀锌钢的腐蚀主要是镀锌层局部破损后形成的电偶腐蚀,在含氯离子高的盐碱土壤中,点蚀速率更明显,短时间内穿透镀锌层腐蚀基体钢材。铜接地材料在大多数土壤中具有较好的耐蚀性,在含硫化物较多的还原性土壤中,铜表面容易形成硫化亚铜腐蚀层,影响导电性。铜包钢材料的腐蚀主要发生在覆铜层机械损伤或者制造缺陷的地方,当铜层被破坏时就会形成大阴极小阳极的强电偶对,加快局部腐蚀穿孔,所以对施工过程中表面防护的要求较高。这些因素互相联系,必须在施工方案里加以考虑。

表1 不同复杂土壤条件下接地网施工及检测的影响及应对措施

影响因素	具体表现	具体表现	施工与检测应对措施
高土壤电阻率	电阻率 $\geq 500\Omega \cdot m$, 电流散流困难	接地电阻显著升高, 超出设计限值	采用外引接地、深井接地、换土或降阻剂; 选用导电性能优良的接地材料
分层/不均匀土层	表层与深层电阻率差异大, 存在岩石夹层	实际接地电阻与均匀土壤假设下的计算值偏差大	开展分层土壤电阻率测试; 采用复镜像法或数值仿真进行精确计算
季节性冻土	冬季冻土层电阻率较非冻期升高数倍至数十倍	接地电阻季节性大幅波动, 冬季可能超标	接地体埋置于冻土层以下; 非冻结季节施工, 或冬季施工采取解冻措施
强腐蚀性土壤	pH <4.5 或含盐量高, 加速金属腐蚀	接地体截面减小、接头断裂, 使用寿命缩短	选用铜材、铜包钢或不锈钢; 实施阴极保护; 焊接接头加强防腐处理
岩石地层	开挖困难, 接地体与土壤接触不良	接触电阻大, 散流能力不足	爆破或机械破碎开挖; 回填低电阻率细土并分层夯实; 采用钻孔埋设垂直接地极
高地下水/水位波动	地下水位高或季节性变化大	接地电阻随水位波动; 高水位区施工困难	施工期降水处理; 接地体埋设于水位变动区以下; 检测时记录水位条件

3 复杂土壤条件下变电站接地网施工与检测技术

3.1 接地网施工方案与材料选择

高土壤电阻率区的接地网施工要根据实际情况选择降阻措施,主要有增大接地网面积、引外接地、增设垂直接地极、换土、使用降阻剂等方法,但是每种方法都有适用条件,随意使用不但不能达到降阻效果,还会给系统安全运行带来隐患。施工方案的制定要以土壤电阻率普查和土层结构探测为基础,对于高电阻率区优先使用外引接地或者深井接地的方式。深井施工时可以采用泥浆泵灌注降阻混凝土,设置地沟把变电站和导电孔连接起来,提高地网的导电性。材料的选择要考虑导电性、耐蚀性和经济性。铜接地材料在腐蚀性土壤里寿命更长,在强腐蚀区域可以采用导电高分子接地材料。降阻剂的使用要考虑到它对接地体的腐蚀作用和长效性。

3.2 接地体敷设与连接施工技术

接地体敷设的关键是保证埋深、间距和连接质量符合设计要求。水平接地体槽深不应小于 0.8m,岩石地带或者土壤电阻率特别高的地方,按设计要求换土回填。垂直接地极的布置间距和埋深要根据土壤电阻率分布来确定,在硬质地层中可以采用钻孔埋设的方式代替直接夯入,防止接地极破损^[3]。连接技术上焊接质量好坏直接影响接地网的电气连续性以及耐腐蚀性。导通性检测时要对连接节点逐点测量,用毫欧级电阻数据精确定位虚接断点;检测到虚接断点后可以采用热塑包裹和螺栓紧固相结合的方法来处理。焊接处应做防腐处理,焊缝饱满度符合要求。

3.3 接地电阻与接触电压检测技术

接地电阻检测属于验收环节的主要内容。四极法是接地阻抗检测常用的手段,在变电站周围布置电流极和电压极,用接地阻抗测试仪的智能算法消除土壤分层的影响,可以将测量误差控制在 5%以内。三极法在场地受限时作为替代方案,用电压电流法测得接地体的接地电阻,测量所用接地体可以是长 3m、直径 50mm 的钢管或者长 3m、直径 25mm 的圆钢。接触电压、跨步电压检测要模拟故障电流工况,测得的结果可以用来评价站内人员的安全风险。复杂的土壤环境参数(土壤电阻率、土壤湿度)会对接地网的特性参数产生影响,利用多源检测法将环境参数分为类型,对影响参数进行预检测,可以提高检测结果的可靠性。

3.4 接地网施工质量控制与检测结果分析

施工质量控制要贯穿于全过程。开工前要进行土壤电阻率实测和土层结构探测,根据探测结果校核设计参数。

施工时对接地体的埋深、间距、焊接质量等重要工序进行旁站监督和记录。施工导孔、降阻材料灌注等隐蔽工程要进行中间验收,保证各个环节的质量。检测结果分析要考虑到检测方法误差、季节因素和场地条件的影响,综合判断接地网是否达到设计要求。实测接地电阻与设计值有差异的时候,要联系土壤分层模型以及接地体实际敷设情况来开展反演分析,从而判定偏差的原因。验收不合格的项目要制定整改方案,重新检测直到合格为止。

4 复杂土壤条件下接地网施工与检测优化措施

4.1 优化接地网结构与接地参数设计

根据非均匀土壤模型进行接地参数优化设计,利用复镜像法计算水平分层土壤中的格林函数,可以大大提高接地电阻计算的效率和精度,为接地网结构优化提供理论依据。优化方向有水平接地体的网格密度和布置形式优化、垂直接地极的深度和分布优化、外引接地和深井接地的组合使用等。高土壤电阻率地区增大接地网面积是最佳的降阻方法,但是受站址条件所限,需要综合使用增设垂直接地极、换土等措施。参数设计要考虑土壤电阻率的季节变化,留有余地。

4.2 强化复杂土壤条件下施工过程控制

施工过程控制要从勘察精度、工艺匹配和质量检验三个方面加以加强。勘察阶段要加密土壤电阻率测点,绘制站区土壤电阻率分布图,找出高阻区和腐蚀风险区。接地槽开挖前应先测定土壤电阻率,如果实测值与设计图纸规定值相差较大,根据实测值调整材料规格和施工参数。关键工序实行样板引路制度,首段接地体敷设完成后经过检测合格后才可全面开展。建立施工影像档案,对隐蔽工程存有完整的影像资料。

4.3 完善接地网检测方法与评价体系

目前的接地网腐蚀检测技术已经由原来的开挖检查转向了非接触式诊断。基于隧道磁电阻阵列的非接触式三维磁场扫描系统可以得到地下导体空间信息的磁场分布数据,用磁场微分成像和分水岭算法进行未知拓扑条件下盲源重构,解决了传统电网络法依靠图纸的问题。该技术已经在北京、上海等地的变电站中进行了使用验证,可以实现接地网腐蚀热力图实时显示以及剩余寿命预测。检测评价体系要由单个接地电阻指标转向多个参数的综合评价,把导通电阻、腐蚀状况、土壤腐蚀性这些指标包含进来,创建接地网健康状态分级准则。

4.4 建立接地网运行维护与风险预警机制

降阻工程投运后 1~2 年要加强对地网的监测,防止

阻值反弹。运行维护机制要包含定期检测计划、异常状态判定准则以及应急处置预案。通过建立地网状态评价数据库,把接地阻抗季度复测指标纳入其中,可以达到全周期管理的目的。在线监测可以在重要的节点上安装电流传感器和电位监测装置,对接地网的状态变化进行实时的监测。数字孪生可视化平台可以对腐蚀热力图进行实时显示,也可以对剩余寿命进行预测,从而实现由定期检测到预测性状态检修的转变。风险预警机制要以历史数据和趋势分析为依托,设置预警阈值,发出维护提醒。

5 结语

复杂土壤环境下变电站接地网施工及检测属于多学科交叉的系统工程。研究表明,把分层土壤建模、数值仿真优化和智能在线监测技术结合起来,是提高复杂土壤条件下接地网工程质量和长期安全性的一种有效途径。施工层面要加强前期勘察精度和工艺匹配度,检测层面要促使诊断技术由传统的电参数测量向智能化成像诊断转

变,管理层面要创建起覆盖设计、施工、运维全过程的质量保证体系。随着新型电力系统建设的不断深入,接地网工程会遇到更多的极端土壤条件,相关技术的研究也还要继续深入。

[参考文献]

- [1]王伟杰.智能变电站接地系统在高土壤电阻率地区的模块化设计与实施[J].电气应用,2025,44(11):165-169.
 - [2]边美华,彭家宁,彭丽莎,等.基于瞬变电磁成像技术的接地网腐蚀缺陷检测方法[J].中国测试,2026,52(2):128-134.
 - [3]秦倩飞,卫泽众,邱国斌,等.变电站接地网腐蚀机理及防腐措施研究综述[J].全面腐蚀控制,2025,39(4):214-219.
- 作者简介:胡红霖(1976—),男,汉族,浙江省温州市人,工程师,本科,中南财经大学投资学,现从事电力工程土建工程施工技术工作;李云龙(1987—),男,山西吕梁人,硕士研究生学历,高级工程师、高级技师,国家一级注册建造师(机电工程)。