

山区杆塔接地电阻优化与防雷效果分析

余立斌 毕金涛

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司 云南 昆明 650051

摘要: 山区输电线路杆塔所处地形复杂、土壤电阻率高, 接地电阻难以满足防雷要求, 雷击跳闸率居高不下。本文分析山区杆塔接地电阻偏高的成因, 对比分析各类降阻技术的适用性与经济性, 提出基于土壤电阻率分区的组合降阻优化方案。创新采用仿真与实测双重验证方法, 建立CDEGS仿真模型并与现场测试数据进行比对。研究表明, 组合降阻技术可将山区杆塔接地电阻降至 10Ω 以下, 雷击跳闸率降低50%以上。

关键词: 山区杆塔; 接地电阻; 降阻措施; 防雷效果; 输电线路

引言

山区杆塔接地电阻偏高的主要成因是高土壤电阻率、接地装置腐蚀及地形限制散流。深埋接地、外引接地、爆破接地、降阻剂、离子接地棒、石墨模块等技术各有适用条件, 需根据地质情况组合选用。本文创新采用仿真与实测双重验证方法, 建立了精确的CDEGS仿真模型, 并通过工程实测数据验证了模型的准确性。基于土壤电阻率分区的组合降阻方案, 可使山区杆塔接地电阻降至 10Ω 以下, 扣除避雷器影响后, 接地优化单独对雷击跳闸率的降低贡献约55%, 综合降幅达67%, 经济效益显著。

1 山区杆塔接地电阻偏高的成因分析

1.1 高土壤电阻率的影响

山区地质结构复杂, 表层土壤薄、岩石裸露, 土壤电阻率普遍较高, 这是导致接地电阻偏高的根本原因。表层腐殖土电阻率为 $100\sim 300\Omega\cdot m$, 风化岩层为 $500\sim 2000\Omega\cdot m$, 完整基岩高达 $2000\sim 5000\Omega\cdot m$ 。在高电阻率地层中散流条件极差, 常规接地装置难以有效泄放雷电流。当土壤电阻率从 $100\Omega\cdot m$ 增至 $1000\Omega\cdot m$ 时, 相同接地体的电阻值约增大10倍。以110kV线路为例, 在电阻率 $2000\Omega\cdot m$ 的山顶杆塔处, 实测电阻高达 $60\sim 80\Omega$, 远超 10Ω 的设计要求。高土壤电阻率还导致接地体有效长度缩短、屏蔽效应加剧, 进一步削弱降阻效果。

1.2 接地装置腐蚀与施工缺陷

山区杆塔接地装置长期处于潮湿酸性土壤中, 腐蚀问题突出。镀锌钢接地体腐蚀速率约每年 $0.05\sim 0.2mm$, 使用10-15年后截面积损失可达30%-50%, 严重时断裂脱离, 接地电阻急剧上升。运行超15年的山区杆塔中约40%存在腐蚀断裂。施工缺陷同样重要: 接地沟深度不足、水平接地体埋于岩石表面、垂直接地极打入深度不足、焊接接头防腐不到位等质量问题普遍存在^[1]。此外, 季节

性冻土地区冻融循环对接地体产生挤压破坏, 导致接触松散、电阻增大。

1.3 地形地貌对散流条件的限制

山区杆塔多位于山脊或陡坡处, 散流条件严重受限。山脊处水平展布空间有限, 宽度不足10米时水平接地体仅能沿山脊线敷设, 有效散流长度受限。陡坡处接地体易被雨水冲刷裸露, 长期运行后暴露于空气中, 完全丧失散流功能。山区多岩石地层, 开凿接地沟需爆破或机械破碎, 成本高且回填后土体松散、接触不良。部分杆塔位于风化岩层中, 岩石遇水崩解、干燥收缩开裂, 接地体与周围介质接触状态极不稳定, 导致接地电阻随季节和天气剧烈波动。

2 接地电阻降阻技术对比分析

2.1 各类降阻技术原理与效果

深埋接地利用深层土壤电阻率较低的特点, 深度一般为5-15米, 在电阻率分层明显地区可降低接地电阻约60%, 但山区钻孔施工困难。外引接地将接地体延伸至山谷、溪流等低电阻率区域, 理想情况下可将接地电阻降至 5Ω 以下, 但存在雷电流反击风险, 需配合均压措施。爆破接地通过炸药在岩石中形成裂隙网后填充低电阻率材料, 可将接地电阻降至原值的30%-50%, 但作业管理严格、对杆塔基础有振动影响。降阻剂通过包裹接地体降低电阻, 在电阻率 $2000\Omega\cdot m$ 地区可将接地电阻从 80Ω 降至 $15\sim 25\Omega$, 但存在老化问题, 优质产品使用寿命可达15年以上。离子接地棒通过释放导电离子改善土壤导电性, 单根接地电阻可达 $10\sim 15\Omega$, 使用寿命30年以上, 但成本较高, 干旱地区效果下降。石墨模块以高纯石墨压制而成, 电阻率低于 $0.5\Omega\cdot m$, 适用于岩石裸露区, 但抗冲击性能差、运输中易破碎。

2.2 技术经济性与施工难度对比 (见表1)

表1 各类降阻技术综合对比

技术类型	降阻效果	单基成本（万元）	施工难度	使用寿命	适用条件
深埋接地	中-高	1.5-3.0	高	20年	存在低阻下层
外引接地	高	2.0-5.0	中	20年	200m内有低阻区
爆破接地	高	2.0-4.0	很高	15年	风化岩石
降阻剂	中	0.8-1.5	低	8-15年	各类地质
离子接地棒	高	2.0-5.0	中	30年	湿度较好的山区
石墨模块	中-高	1.5-3.0	低	25年	岩石裸露区

从经济性角度，降阻剂成本最低，但使用寿命较短；离子接地棒和石墨模块初始投资较高，但长效性好，综合性价比优。从施工难度角度，降阻剂和石墨模块施工简便，深埋和爆破接地对设备和人员要求高。实际工程中应根据地质条件、投资预算和运行维护能力综合选择^[2]。

3 组合降阻优化方案与工程应用

3.1 基于土壤电阻率分区的方案设计

针对山区地形复杂的特点，提出基于土壤电阻率分区的组合降阻优化方案。根据现场实测数据，将杆塔周边划分为核心区（10米内）、内延区（10-50米）、外延区（50-100米），在确保降阻效果前提下控制工程成本。当土壤电阻率低于1000Ω·m时，采用常规水平接地体加垂直接地极组合即可满足要求。电阻率为1000-2000Ω·m时，采用水平接地体加降阻剂方案，接地体长度按常规1.5倍数敷设并全线包裹降阻剂。电阻率为2000-3000Ω·m时，采用水平接地体加深井接地加降阻剂组合，在杆塔四角设置4口深8-10米的深井。电阻率高于3000Ω·m时，采用以石墨模块、离子接地棒、外引接地为主的综合降阻方案，辅以爆破接地措施。方案设计需结合现场施工条件，应用CDEGS软件进行仿真计算验证，仿真参数包括三层土壤结构、2.6/50μs雷电流波形，边界条件设置为吸收边界。

3.2 典型山区杆塔改造案例

以110kV山区输电线路为例，选取3基典型高阻杆塔进行组合降阻改造。杆塔A位于花岗岩山脊，土壤电阻率达3500Ω·m，原接地电阻78Ω。改造采用“石墨模块+外引接地+离子接地棒”组合，在基础四周埋设8块石墨模块形成环形接地网，向两侧山谷外引接地线60米并设置2口离子接地棒，同时敷设120米水平接地体包裹降阻剂。改造后接地电阻降至6.2Ω，降阻率92%。杆塔B位于全风化岩层斜坡，电阻率2200Ω·m，原接地电阻52Ω，采用“爆破接地+降阻剂”组合，在6个点位进行控制爆破形成裂隙网后压力灌注降阻剂，改造后电阻降至9.5Ω。杆

塔C位于陡坡处，电阻率1800Ω·m，原接地电阻45Ω，采用“深井接地+离子接地棒”组合，钻设4口深12米深井安装离子接地棒。三基杆塔改造后运行一年，雷击跳闸次数由年平均0.8次/基降至0.1次/基。

3.3 施工质量控制要点

山区杆塔接地改造施工质量控制是保证降阻效果的关键。接地沟开挖必须达到设计深度和宽度，岩石地段可采用松动爆破或机械破碎，沟底清理平整。水平接地体应侧立敷设，垂直接地极顶部距地面不小于0.6米。焊接采用放热焊或双面搭接焊，搭接长度不小于圆钢直径6倍，焊后涂刷防腐涂料。降阻剂与水搅拌成糊状均匀包裹接地体，填充厚度不小于50mm，回填细土夯实。离子接地棒安装钻孔直径比棒体大100-150mm，填充专用填料。外引线的主接地网螺栓连接，连接点防水防腐。石墨模块平放于沟底，间距不小于1米，用扁钢串联，回填细土300mm夯实。施工后在干燥季节采用三极法或钳形表测量接地电阻，取多次平均值作为验收依据，不满足要求的部位进行补强处理^[3]。

4 防雷效果仿真分析与实测验证

4.1 仿真模型建立与计算

采用CDEGS软件建立山区杆塔接地系统仿真模型，分析降阻防雷效果。仿真参数设置如下：土壤模型采用三层结构，表层（0-2m）电阻率2000Ω·m，中层（2-8m）电阻率800Ω·m，下层（>8m）电阻率300Ω·m。杆塔模型采用多波阻抗模型，塔高30m。接地系统模型考虑自感和互感效应，雷电流波形为2.6/50μs，幅值30kA（110kV等级）。边界条件采用吸收边界，计算区域取200m×200m×100m，网格剖分采用自适应加密，最小网格尺寸0.5m。

仿真结果表明：接地电阻是影响耐雷水平的关键参数。110kV杆塔接地电阻从30Ω降至10Ω时，耐雷水平从45kA升至85kA，提升幅度达89%；跳闸率从2.8次/百公里·年降至0.9次/百公里·年。当外引接地长度超过50米时，电感效应开始显现，需每20米设置均压环以均衡电

位分布^[4]。深井穿透表层高阻层进入低阻层时，每增加1米深度，接地电阻下降8%-10%。仿真同时验证了组合降阻方案的可行性，采用“石墨模块+离子接地棒”组合时，接地网电位分布更加均匀，最大电位梯度降低约35%。

4.2 降阻前后防雷指标对比

选取一处 在运山区30基110kV杆塔进行组合降阻改造，对比改造前后数据。需要说明的是，以下对比分析已扣除同期加装线路避雷器对防雷效果的影响，仅评估接地优化本身的贡献。接地电阻指标对比：改造前，接地电阻 $\leq 10\Omega$ 的杆塔仅3基（占10%）， $\geq 30\Omega$ 的杆塔达12基（占40%），30基杆塔接地电阻平均值为34.6 Ω 。改造后，采用分区组合降阻方案，接地电阻 $\leq 10\Omega$ 的杆塔达24基（占80%），平均值降至8.2 Ω ，整体降阻率达76%。雷击跳闸率对比：改造前三年累计雷击跳闸18次，年均6次，折合2.4次/百公里·年。改造后一年内仅发生雷击跳闸2次，折合0.8次/百公里·年，跳闸率绝对降幅为1.6次/百公里·年，相对降幅达67%。需要特别说明的是，同期该线路加装了12组线路避雷器，经计算扣除避雷器的作用贡献后，接地优化单独对跳闸率降低的贡献约为55%，即由接地优化带来的跳闸率降幅约为1.32次/百公里·年。仿真与实测对比验证：将仿真计算结果与现场实测数据进行对比（见表2），两者吻合良好，验证了仿真模型的准确性和组合降阻方案的有效性。

表2 仿真计算与现场实测结果对比

杆塔类型	仿真接地电阻(Ω)	实测接地电阻(Ω)	偏差率
分区2方案	12.5	13.2	0.056
分区3方案	9.8	10.5	0.071
分区4方案	6.5	7.1	0.092

防雷性能综合评估：改造后杆塔顶部电位由改造前的1500kV降至800kV以内，反击闪络风险显著降低。经核算，30基杆塔改造总投资约72万元，按每年减少跳闸4次、每次跳闸综合损失20万元计算，年经济效益约80万元，投资回收期约10.8个月，经济效益显著。

结束语

山区杆塔接地电阻偏高的主要成因是高土壤电阻率、接地装置腐蚀及地形限制散流。深埋接地、外引接地、爆破接地、降阻剂、离子接地棒、石墨模块等技术各有适用条件，需根据地质情况组合选用。本文创新采用仿真与实测双重验证方法，建立了精确的CDEGS仿真模型，并通过工程实测数据验证了模型的准确性。基于土壤电阻率分区的组合降阻方案，可使山区杆塔接地电阻降至10 Ω 以下，扣除避雷器影响后，接地优化单独对雷击跳闸率的降低贡献约55%，综合降幅达67%，经济效益显著。

参考文献

[1]刘溢焯. 输电线路杆塔接地降阻优化技术[J]. 科学技术创新,2024(7):35-38.

[2]岳灵平,潘少良,陈家乾,等. 浅层滑动对输电杆塔接地电阻变化特性测量与分析[J]. 电瓷避雷器,2023(5):113-119.

[3]周西杰,宋华伟,杨廷方,等. 山区输电线路杆塔立体均压环接地体冲击特性分析[J]. 电瓷避雷器,2023(5):98-105.

[4]赵品,马俊峰,孙锦钊,等. 一种相位自同步式杆塔接地电阻测量方法[J]. 智能建筑电气技术,2025,19(2):106-109.