

超高海拔岩石地基柔性接地降阻技术的应用

王 俊 洪运来

中国水利水电第十工程局有限公司 四川 成都 610036

摘要：随着全球对可再生能源的需求不段增加，风力发电作为一种清洁、可再生的能源形式得到了快速的发展。然而，在超高海拔地区，尤其是在岩石地质条件下，风力发电基础的接地电阻问题成为了制约风电场安全运行的关键因素。因此，本文针对探讨适用于超高海拔风电场在岩石地基条件下，采用柔性接地降阻技术的原理、应用效果以及实践意义。

关键词：超高海拔；新能源；风机基础；岩石地质；柔性接地降阻技术

引言

超高海拔地区风资源丰富，但地质条件复杂，多为岩石地质，土壤电阻率极高。这种地质条件导致风电基础的接地电阻难以降低，严重影响风电场的防雷效果和安全运行。如果采用传统的接地降阻技术难以达到理想的降阻效果，研究适用于超高海拔岩石地基的柔性接地降阻技术具有重要意义。

1 工程概况

八宿县10万千瓦保障性并网风电项目位于西藏自治区昌都市八宿县邦达镇和卡瓦白庆乡境内，场址中心距八宿县直线距离约20km，场区海拔在4700.00m~5200.00m之间，机位处的平均海拔约为5050.00m。整个风电场区安装20台、单机容量为5MW的双馈风力发电机组，均布置于连续的山脊上；其基础为重力式圆形钢筋混凝土扩展基础，基础混凝土浇筑为一次成型。该项目于2024年4月2号开工，10月31号前完成全容量并网工作，总工期为7个月。项目设计额定容量为100MW，单位投资为6762元/KW，总投资为69369万元。

1.1 地质条件分析

超高海拔地区地质结构复杂，多为坚硬的岩石层，土壤稀缺且电阻率高。这种地质条件使得传统的接地电阻降低方法效果有限，难以满足风电场对接地电阻的严格要求。

该项目风电场均位于地势较高的山脊（山体）顶部或山体斜坡带上，风机所在山脊（山体）顶部覆盖层分布不均，出露基岩岩性主要为大理岩和千枚岩。山脊带地表覆盖层的成分主要为黄褐色碎石土，场区内山脊带地下水埋藏较深，其测试结果显示，除了位于地势低矮的宽缓台地及覆盖层分布相对较厚的机位，土壤视电阻率较低（约为 $680\Omega \cdot m$ ），其余的山脊带地势相对较高的机位，土壤视电阻率普遍较高（约为 $3200\Omega \cdot m$ ）。由

于岩体强度及抗风化能力的差异，测试结果显示的岩性在同一深度，其土壤视电阻率存在差异较大。

1.2 接地电阻对风电场运行的影响

接地电阻过高会导致雷电电流无法有效的导入大地，增加风电机组遭受雷击的风险。同时，接地电阻过高还可能会引起反击电压，从而对风电场的电气设备和控制系统造成损害，影响风电场的稳定运行。

2 常规降阻技术的局限性

局限性分析：

更换土壤：满足要求的土壤距离风电场较远，且高原生态环境非常脆弱，无法大量的取土进行换填工作，同时人力和工时耗费巨大，不适用于高原上的大规模风电场。

人工处理土壤：风电场范围广，地势复杂，且可能降低接地热稳定性，加速接地体腐蚀。

深埋接地极：岩石层深处的土壤电阻率依然很高，效果不佳。

降阻剂：有效期短，一般3-5年后失效，需频繁更换，成本高且不环保。

3 柔性接地技术的应用

3.1 技术应用原理

柔性接地技术的原理是利用液态胶凝状的导电材料（如HD-R10柔性接地体）和先进的接地网组编而成的一种降低电阻的方法。通过现场施工制作后，将柔性接地体以液态的形状灌入到扁铁周围，使其充分渗透填充到岩石的缝隙中，最终凝固成果冻状的胶体，从而形成与周围岩石土壤紧密相连为一体化的复合接地材料。

3.2 应用优势

显著的降阻效果：实验室标准状态下测试降阻系数可达0.16，实际使用效果更佳。

防腐和环保特性：成型后不溶于水，不含有重金属和硫成分，内含防腐因子，可延长接地体的使用寿命。

广泛的适用性：特别适合在高山、沙漠、戈壁等复杂野外环境下施工作业。

便捷的施工步骤：现场制作成型，安装过程简单快捷。

3.3 地质条件复杂

超高海拔地区地质条件复杂，岩石层较厚且土壤电阻率高，传统接地技术难以达到理想的降阻效果。

3.4 耐冲击要求高

由于雷电活动频繁且强度大，接地系统需要具备良好的耐冲击性能，以防止雷电反击和设备损坏。

4 超高海拔岩石地基柔性接地网的设计方案

4.1 风机接地网的设计方案

风电机组及箱式变压器共用一个接地网，接地网工频接地电阻值要求 $\leq 4 \Omega$ 。

以风机中心为圆心，在风机基础外围设置环形水平接地带，环形水平接地带使用 -60x6 热镀锌扁钢设置在风机基础体型轮廓线外围（根据具体地形可以适当改变），然后采用柔性接地体完全包裹靠近箱变侧的风机环形均压带，包裹长度约为均压带的1/2（约 29 米）、与基础预留连接接头处进行降阻，以防止雷电的过电压对风机塔筒内的设备造成反击。同时风机环形均压带与基础预留的4处（根据基础实际引出情况调整）引出线扁钢要可靠连接。

在箱变基础外围四周设置矩形水平接地带，并与风机基础外围环形接地带相连，形成完整闭合的接地网。然后采用柔性接地体完全包裹箱变均压带，以防止雷电的过电压对箱变设备造成反击。

接地线之间应采用焊接的方式连接，焊接应牢固无虚焊；焊缝应平整而无间断，焊缝处的焊渣应清除干净，接地网中所有焊接点必须进行防锈、防腐处理^[1]。

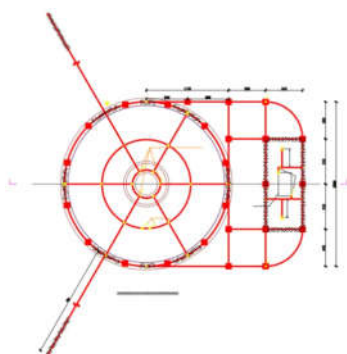


图1 风机基础接地网平面布置图

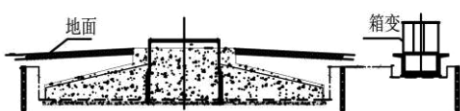


图2 风机基础接地网剖面图

4.2 接地电阻计算

4.2.1 水平接地电阻计算

计算书依据《交流电气装置的接地设计规范》GB50065-2011编制接地网采用柔性接地体技术对接地体有效区域内的土壤环境进一步改善，会降低接地体有效区域内土壤电阻率，并且增加接地网的自由电荷数量以保证接地安全性^[2]。在实验室标准状态下，柔性接地体的降阻效率系数为0.16，实际应用中，降阻效率系数与现场地质条件和柔性接地体的使用量等因素有关，调整柔性接地体的用量可以调整接地体有效区域内的电阻率，从而实现降阻效果。接地电阻计算中以调整后的电阻率数值参与计算。现场提供土壤电阻率为 $3200 \Omega \cdot m$ 。

垂直接地及降阻措施采用HD-40-1500柔性接地极，长度1.5米，箱变接地均压环采用柔性接地体浇筑包裹扁钢并形成低电阻区域，风机均压环采用柔性接地体处理后平均土壤电阻率取 $P = 500 \Omega \cdot m$ ，箱变区域采用柔性接地体处理后平均土壤电阻率取 $P200 \Omega \cdot m$ ，

表1 风机与箱变均压环计算表

内容	风机均压环	箱变均压环
处理后平均土壤电阻率	$500 \Omega \cdot m$	$200 \Omega \cdot m$
均压环半径： $R_1 = 11.00 m$		长： $L_1 = 5.00 m$ ， 宽： $L_2 = 5.00 m$
均压带等效直径 $d = b/2 = 0.06/2 = 0.03 m$		
水平均压带的埋设深度	$h = 0.8 m$	$h = 0.8 m$
水平接地极的总长度	$L = 75.36 m$	$L = 20 m$
接地网的外缘边线总长度	$L_0 = 67.08 m$	$L_0 = 20 m$
接地网的总面积	$S = 379.94 m^2$	$S = 25 m^2$
	$\sqrt{S_z} = 19.49 m$	$\sqrt{S_z} = 5 m$
水平主接地网的接地电阻		
R_n --任意形状边缘闭合接地网的接地电阻 Ω	1.01	0.99
R_e --等值方形接地网的接地电阻 Ω	13.707	16.237

4.2.2 垂直接地电阻的计算

安装HD-40-1500柔性接地极后，垂直接地部分土壤电阻率取 $p = 50 \Omega \cdot m$ ，采用HD-40-1500柔性接地极，长度1.5m，可以得到接地电阻 $5.858 \Omega \cdot m$ 。

4.2.3 射线（48m）接地电阻计算

末端使用柔性接地体处理后取土壤电阻率为 $p = 3000 \Omega$ 水平接地极长度为32米，采用-60*6mm的扁钢，埋深0.5米。接地极等效直径 $d = B/2 = 0.03 m$ ，计算得出 $R_h = 209.62 \Omega$ 。

4.2.4 整体接地网接地电阻计算

$$R = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4) \times 1/0.9$$

整体接地网 = $3.79\Omega < 4\Omega$

4.2.5 雷电冲击模拟计算

根据行业相关标准《复合接地体》(GB/T21698-2022)标准第5.2.1.3条规定,降阻剂的耐冲击性、理化性能,经冲击电流流通过后,接地降阻剂的增加值不得超过通流前电阻率的20%,在雷电发生时,一个雷电往往会伴随多次闪击并形成组合雷电波;当形成多次闪击组合雷电波时,闪击的次数有可能会达到十几次到四十几次。这时接地网在每次冲击下,都会根据其冲击变化率进行瞬间的性质改变,从而导致接地电阻的改变。

4.3 施工程序、方法

4.3.1 施工程序

沟槽开挖→水平接地网敷设→柔性接地极施工→土方回填→接地电阻检测

4.3.2 施工方法

沟槽开挖

测量人员根据接地施工平面布置图,放出扁钢的施工平面位置。

测出设计地面标高作为沟槽开挖深度的控制依据。

技术员,质检员对测量桩进行复查,确保施工时轴线及标高的准确性。

若遇构支架基础较多的位置不能用挖掘机挖掘时,则采用人工开挖。

沟槽开挖完毕,经质检员认真检查合格并做好记录后,方可进行接地网敷设。

风机箱变主地网开槽深度不小于0.8米、射线开槽深度0.5米,宽度0.5米,遇

到岩石采取绕过,不能绕过时以挖到岩石为止。

接地网施工

水平接地网敷设之前,要认真检查开挖深度,并做好记录。

施工顺序:先放主干线,后放分支线。

接地网的接地装置由接地极、接地连接线、接地干线组成。接地干线采用 $60\times 6\text{mm}$ 镀锌扁钢敷设,主接地网埋深应不小于0.8m,48米外引射线埋深 $0.5\text{m}^{[3]}$ 。

柔性接地极(HD-40-1500)施工

将组装好的垂直接地极按照施工图纸在指定位置打到规定深度后,将顶部被击打变形部位切割掉,顶端应预留露出150mm长度焊接。

垂直接地极可采用定制的欧姆卡子辅助配合与水平接地体焊接,焊接后须除尽焊渣,接头处涂刷沥青漆防腐。

垂直接地极安装完毕后,将液态的柔性接地体适当

加热,然后将柔性接地体附带材料依次加入桶中,每放一种材料须用木棍搅拌至溶化后,再添加下一种材料。

将配置好的柔性接地体溶液沿垂直接地极端部缓慢浇筑,由于钻头的作用会出现一个圆洞,液态的柔性接地体会沿垂直接地极周围渗入地下,一段时间后自然凝固并且包裹垂直接地极,此时可以回填土并浇水沉降,直到回填土壤表面不再有明显下沉方可终止浇水作业。

接地降阻措施

若接地电阻值达不到设计要求值,以安装柔性接地体降低接地电阻,达到设计要求。高效降阻材料该项目选择的是柔性接地体。根据GB/T21698-2022复合接地体技术条件规定:

标准复合接地体降阻效果系数为0.7~0.8,柔性接地体降阻效果系数为0.16。

标准复合接地体镀锌扁钢腐蚀率为 0.03mm/a ,柔性接地体镀锌扁钢腐蚀率为 0.005mm/a 。

标准复合接地体耐冲击试验变化率为20%,柔性接地体耐冲击试验平均变化率为0.36%。

标准复合接地体电阻率为 $5\Omega\cdot\text{m}$,柔性接地体平均电阻率为 $1.42\Omega\cdot\text{m}$ 。

柔性接地体的施工

5 工程实例分析

以超高海拔“八宿县10万千瓦保障性并网风电项目”的风电场为例,通过采用柔性接地技术,成功将接地电阻从 3000Ω 降低至设计要求的 4Ω 以下。施工过程中,通过精细设计和严格施工控制,确保了接地系统的稳定性和可靠性。运行监测结果表明,该技术有效提高了风电场的防雷击能力和安全稳定运行水平。

结束语

柔性接地技术是一种适用于超高海拔风电基础岩石地质的有效降阻方法。该技术通过改良地下土壤特性,加强接地电极与土壤的接触,实现了接地电阻的大幅降低。超高海拔八宿县10万千瓦保障性并网风电项目实例证明了该技术的可行性和有效性。

参考文献

- [1]张勋,刘幸殊.110kV线路雷击故障分析及防雷探索[J].水电站机电技术,2022,45(10):103-109.
- [2]张少轩,李长春.高土壤电阻率地区降阻方案研究[J].电气化铁道,2018,29(4):25-28.
- [3]黎卓豪.风电机组防雷接地方案研究[J].科学技术创新,2021(6):168-169.