

# 高原地区风电工程建设的生态保护与施工技术适配研究

申金霞

国电投长江生态能源有限公司 湖北省武汉市 430061

**摘要:** 高原地区风能资源丰富, 风电建设有利于能源结构转变, 对实现“双碳”目标有重大意义。但是高原生态系统具有脆弱性、敏感性、独特性, 施工过程中容易引发水土流失、生物多样性减少等生态问题, 低气压、强辐射、复杂地形等环境条件也对施工技术提出了特殊的要求。本文以高原风电工程为研究对象, 对工程建设中的生态保护和施工技术适配现状进行系统分析, 阐述研究的现实意义和理论价值, 从生态勘察、过程控制、技术创新、修复重建等几个方面提出生态保护策略, 从地形适应、设备改良、工艺优化、安全保障等维度构建施工技术适配体系, 希望给高原风电工程绿色高效建设提供理论支撑和实践指导, 达到风能开发与生态保护相协调发展的目的。

**关键词:** 高原地区风电; 工程建设; 生态保护; 施工技术适配

在全球能源转型加快以及双碳目标的引领下, 可再生能源的开发利用成了能源领域发展的主要方向。高原地区由于海拔高、风速稳定、干扰因素少, 成为我国风电开发的重要地区。但是高原地区生态环境十分脆弱, 土壤层浅薄, 退化较快, 珍稀动植物种类繁多, 风电工程选址、施工及运行等各个阶段都可能对生态系统造成不可逆转的影响。高原的特定自然条件造成常规施工技术的适用性受到限制, 低气压使得设备功率变小、冻土地基不稳定的现象都会影响到建筑工程的效率和安全性。因此, 高原地区风电工程建设生态保护与施工技术适配研究迫在眉睫, 破解开发与保护的矛盾, 提高技术适配性, 是促进高原风电产业可持续发展的当务之急。

## 1. 高原地区风电工程建设研究的意义

### 1.1 推动能源结构转型的现实意义

我国能源结构长期以来以化石能源为主, 碳排放量居高不下, 能源转型刻不容缓。依据中国风能资源测评报告的数据, 青藏高原、云贵高原等地风能资源大于 10 亿千瓦。进行高原风电工程的研究, 可给大规模风能开发提供技术及生态保障, 使高原风能资源转化为清洁能源, 代替传统的化石能源使用, 降低碳排放量。同时高原风电开发能够解决当地电力短缺的问题, 改善区域能源供需状况, 给偏远高原地区供应稳定电力, 助力乡村振兴与区域协调。

### 1.2 保护高原生态系统的战略意义

高原地区是我国重要的生态安全屏障, 是重要的水源涵

养地、生物多样性宝库。风电工程建设包括场地平整、道路修建、设备安装等环节, 如果没有科学的生态保护措施, 容易造成水土流失、植被破坏、栖息地碎片化等问题。青藏高原高寒草甸生态系统植被恢复周期长达数十年甚至上百年, 破坏之后很难恢复。本文集中于工程建设全周期生态保护, 给出相应的管控策略, 可以有效地减少工程对生态环境的干扰, 保证高原生态屏障的功能, 保障国家生态安全。

### 1.3 完善风电工程技术体系的理论意义

目前我国的风电工程技术体系是以平原、丘陵等常规地区为基础构建的, 对于高原环境的技术研究比较薄弱。高原低气压、强紫外线、大温差、复杂地形等环境因素, 使常规施工装备、工艺和工法不能直接使用。开展本研究可以剖析高原环境对风电施工的制约机制, 开发出适合高原环境的施工技术和设备, 填补高原风电施工技术领域空白。并通过整合生态保护和施工技术的相互关系来形成生态、技术一体化的研究框架, 丰富风电工程绿色建设理论体系, 给同种特殊区域能源开发提供理论参考<sup>[1]</sup>。

### 1.4 提升工程建设效益的经济意义

高原风电工程建设生态风险高、施工难度大、成本控制难, 如果生态保护不到位容易引发环境纠纷, 造成工程延误; 技术适配不足则会增加施工安全风险和返工成本。研究中提出的生态保护策略能降低环境治理成本及生态补偿的风险, 施工技术适配方案可提高施工效率、减少设备故障和工期延误, 从而实现工程造价的管理。同时绿色高效的工程建设模

式能够提高风电项目的投资回报率,吸引更多的社会资本投入到高原风电的开发中<sup>[2]</sup>。

## 2. 高原地区风电工程建设生态保护与施工技术现状

### 2.1 生态保护现状: 意识提升但管控不足

近年来随着生态文明建设的推进,高原风电工程中生态保护意识明显提高,大多数项目在前期规划阶段就做了生态影响评价。青藏高原的风电项目在选择场地的时候采取避开核心保护区、减少对珍稀物种栖息地的扰动的设计策略。但是生态保护管控仍存在一些不足,一是生态勘察不够细致,部分项目只做了常规的植被调查,没有对土壤理化性质、地下水资源、特有物种分布等情况进行详细的勘察;二是施工过程中管控较为粗放,存在随意碾压植被、弃渣乱堆乱放等问题;三是生态修复效果较差,大多采用简单的植被补种方式,没有根据高原生态特性选择乡土物种,导致修复植被成活率低;四是缺少长效监管机制,工程运营期生态监测与维护力度不够<sup>[3]</sup>。

### 2.2 施工技术现状, 基础薄弱且适配性低

我国高原风电施工技术初见成效,一些企业开发出适合高原的少量小型施工装备,例如轻量化吊装设备。但是整体技术基础还比较薄弱,适配性不足的问题比较突出,一是地形适配技术缺乏,高原山区地形复杂,常规履带式起重机移动困难,道路修建技术不能适应陡坡、冻土等地形条件;二是装备高原适应性差,低气压环境下发动机功率降低 30% 以上,液压系统容易泄漏,电子设备受强辐射影响容易发生故障;三是施工工艺不完善,冻土区基础施工易造成冻融循环破坏,高空作业受强风影响安全性低;四是技术集成度低,没有形成针对高原环境的“勘察-施工-验收”一体化技术体系,各个技术环节之间没有很好地衔接。

### 2.3 政策保障现状, 框架初步构建但细则缺失

国家出台了相关政策规范高原风电工程建设,有风电场工程生态保护和环境治理技术导则、高原地区风电开发建设管理暂行办法等,对生态保护、施工技术提出基本要求,初步形成政策框架。但政策的细节还很不完备,第一,生态保护的标准不统一,各个地区在植被保护、水土流失防治方面所采用的指标要求差别较大,没有制订出高原地区的专项标准;第二,缺少技术激励政策,高原适配施工技术的研发支持度、生态修复技术创新补贴、税收优惠等都不够;第三,监管考核机制不健全,对生态保护措施落实情况和适配性考

核指标不够细,责任追究制度也不够完善<sup>[4]</sup>。

### 2.4 协同发展现状, 融合不足且联动性差

目前高原风电工程建设中生态保护与施工技术之间缺乏有效融合,不能达到联动效果。一方面生态保护措施与施工技术相脱离,生态修复方案没有根据施工进度来制定,造成施工过程中生态扰动不能及时修复;另一方面是技术研发没有充分考虑到生态保护的需求,一些施工技术虽然提高了效率,但是也加大了生态破坏的程度,例如大型设备的使用使得土壤压实度增加<sup>[5]</sup>。另外产学研协同机制不健全,科研机构的生态保护和技术研究成果不能快速地转化为工程实践,施工企业缺少与科研机构的常态化合作,造成技术创新同实际需求脱节,不能形成保护、技术、施工的协同联动体系。

## 3. 高原地区风电工程建设生态保护与施工技术适配策略

### 3.1 构建全周期生态保护管控体系

工程前期勘察用三维“空天地”的调查体系对青海海南风电项目进行勘察。采用无人机遥感技术进行 0.1m 分辨率的航空摄影,利用红外相机在每平方公里内部署 5 台监测设备来观测藏原羚等重点物种,同步采集 0 到 60 厘米深度的土壤样品(每个样本区采集三处),确定高寒草甸、沼泽化草甸等植被的分布以及黑土滩退化的状况,形成一个包含 127 种乡土植物和 8 类国家一级保护动物的数据库,直接用来辅助选择避开 3 个藏原羚的核心栖息地。施工阶段采取“微扰动”控制,西藏那曲项目利用 BIM 技术模拟优化 3 条施工路线,缩减占用地表植被区域 22%;采用塔架模块化预制装配,把传统 20 天的基础施工时间缩短到 7 天,临时占地从 1.2hm<sup>2</sup>/台降到 0.8hm<sup>2</sup>/台(减少 33%);沿施工边界设置 1.8m 高的高分子生态隔离带,阻断扰动扩散距离大于 50m;弃渣场执行“先挡后弃”,分级设置 3 级挡土墙,搭配垂穗披碱草和冷地早熟禾混播,客土改良时加入当地泥炭土提高肥力,植被恢复率 85%。在运营阶段建立卫星与地面监测网,比如云南迪庆项目设立了 15 个地面监测站并借助高分卫星定位点,每隔一季都会测量植被覆盖度和水土流失情况,发现边坡植被退化时就改变滴灌频率(从原来的每 15 天一次改为 10 天一次)并施加羊粪有机肥,在第四年的时候植被覆盖率能恢复到原生态状态下 92% 的水平。

### 3.2 研发适配高原环境的施工技术

根据高原地形特点,联合徐工等企业研发出轻量化设备 XGC55T 履带式起重机,自重比传统设备减轻 40%,搭

载智能地形识别系统,在四川甘孜风电项目中复杂地形通过率为92%;50吨级小型吊装设备采用三角履带设计,抓地力提高30%,解决碎石坡运输问题。陡坡施工创新了阶梯开挖、锚杆格构、生态袋组合技术,在青海玉树35°陡坡路段,每阶开挖高度控制在1.5m,锚杆间距2m×2m,生态袋内填充当地砂壤土+紫花针茅种子,边坡扰动面积减少60%。低气压环境适配方面采用涡轮增压加中冷技术,发动机在海拔4500m处功率可保持为平原工况的95%;三一重工SYL956H装载机可以在西藏阿里项目中持续工作并且达到98%的稳定性;电子设备内安装有三层铝镁合金防辐射屏蔽罩,配合液冷恒温系统,在极端温度下温度过高或者过低时的故障率都少于2%。研发出C50抗冻混凝土,掺入5%引气剂+3%硅灰,在负15℃下强度达标率98%,用在青海湖项目基础浇筑;耐-40℃硅橡胶密封材料,解决风机舱体密封渗漏问题。冻土区用“热棒+深桩”技术,在青海可可西里项目中单桩直径1.2m、深度15m,周围布设3根/m<sup>2</sup>热棒,地基温度波动控制在±0.5℃以内,避免冻融沉降;智能风速预警系统搭配防风液压平台,风速大于等于10m/s时10秒内自动锁定,高空作业零事故。

### 3.3 强化政策支持与标准体系建设

能源局联合生态环境部发布高原风电生态保护技术标准,海拔3000–4000m区域植被保护率≥90%,4000m以上≥95%,水土流失治理率统一≥95%,西藏昌都项目据此将弃渣场植被恢复指标细化为“当年发芽、3年成坪”。中央财政每年安排2亿元专项研发基金,2023年对金风科技“轻量化吊装设备”、中科院“冻土修复技术”等12个项目进行40%的研发成本补贴,补贴总额为8000万元。税收优惠实行分级政策,技术创新投入超1亿元的企业可以享受150%加计扣除,5000万–1亿元按130%扣除,明阳智能2024年享受加计扣除额3.2亿元,连续三年减免地方留存部分所得税(税率15%)。监管考核把生态保护成效作为项目审批的一票否决项,细化12项过程指标:施工扬尘 $PM_{2.5} \leq 0.5mg/m^3$ 、噪声昼间≤60dB、夜间≤50dB,青海西项目因扬尘超标被暂停施工7天。创建起“三维监督机制”,环保部门实行月巡查,第三方机构(中国环科院)执行月动态考评,设立高原风电环保举报微信小程序,2023年收到15起举报,三家企业因违规被吊销资质,追究法人责任2起。

### 3.4 建立生态与技术协同联动机制

施工方案设计阶段组建“生态专家和技术工程师”联合小组;新疆达坂城项目中,根据植被分布热力图将原吊装路线北移200m,避开芨芨草核心分布区;用无人机牵引索道吊装减少地面碾压面积80%,植被破坏率从传统15%降到3%。产学研平台以远景能源为主体制定高原风电研究院,与清华大学、兰州大学一起建立了8个攻关组,其中“高寒植被快速恢复组”研发的草种包衣技术,将垂穗披碱草发芽率由原来的65%提高到90%,6个月内实现工程化应用。智慧共享平台把高分6号卫星遥感数据、1200个物联网监测节点数据、施工进度系统的数据实时共享,共享的内容包括植被恢复盖度、设备油耗、吊装进度等,云南怒江项目利用大数据分析发现雨季施工水土流失量比旱季多30%,于是将基础开挖改在旱季进行。人才培养方面,兰州理工大学开设了“生态风电工程”交叉学科,开设的课程有高原生态学、风电施工技术,2024年培养出的复合型人才共有120人,其中80人就职于高原风电企业,解决了“懂生态不懂施工、懂施工不懂生态”的问题。

### 结束语:

综上所述,高原地区风电工程建设是实现能源绿色转型和区域发展的主要途径,但是生态脆弱性、环境特殊性使其面临着生态保护和施工技术适应性的双重挑战。本文得出,通过全周期生态保护管控体系创建,高原地区施工技术的研发,制定好政策标准并加以执行以及形成协同联动的管理机制,有效解决开发和保护之间的矛盾,使工程的绿色化与高效化程度提高。未来要加强对生态保护和施工技术的融合创新,加深高原环境对风电工程的影响基础研究,实现产学研用的深度合作,从而达成风能资源开发和生态环境保护的协同发展。只有如此才能使高原风电产业得到持续的发展,并且可以给我国所追求的“双碳”目标以及生态安全提供强有力的保障。

### 参考文献:

- [1] 田普卓,刘辉.高原山地风电项目管控要点探析[J].智能建筑与智慧城市,2024,(12):139–141.
- [2] 王怡.超高海拔风机再“上新”——探访世界在建最高海拔风电项目[J].班组天地,2024,(08):76–77.
- [3] 王强,郜志腾,阿旺加措,等.全球高海拔地区风电利用现状综述[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(09):1750–

1760.

[4] 李伟,李志刚,李显树,等. 2 MW 风电机组叶片防除冰试验与能耗评估 [J]. 可再生能源,2024,42(05):634-639.

[5] 张旭刚. 川西高原山地风功率日变化情况研究 [J]. 电工技术,2024,(05):76-78.

**作者简介:** 申金霞, 出生年月日:1986 年 1 月 1 日, 性

别:男, 民族:汉, 籍贯:湖北省荆门市沙洋县, 学历:大学本科, 职称:工程师, 从事的研究方向:风电、光伏新能源发电工程建设管理