

新能源风电场电气工程施工技术研究

田 健

华电新疆发电有限公司新能源分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：风电场电气工程作为风电场建设的核心环节，其施工技术的水平直接影响到风电场的运行效率和安全性。据统计，由于施工技术问题引发的风电场运行故障占比高达70%。因此，对新能源风电场电气工程施工技术的深入研究，对于提升风电产业整体工程质量、促进能源结构优化及环境保护具有十分重要的现实意义和战略价值。

关键词：新能源风电场；电气工程；施工技术

新能源风电场通过清洁能源替代、经济赋能、技术创新及政策协同，成为实现能源革命、应对气候变化和促进可持续发展的重要支柱。其环境效益、经济价值和技术引领作用，在国内外能源体系中占据不可替代的地位。随着可再生能源的兴起，新能源风电场建设日益增多。风电场电气工程是风电场建设的核心环节，其施工技术的优劣直接关系到风电场的运行效率和安全性。

1 新能源风电场的重要性

1.1 能源转型与环境保护。风能作为可再生能源，具备取之不尽、用之不竭的特性，可显著减少对化石燃料的依赖，缓解能源枯竭问题。风电场运行过程中几乎不产生二氧化碳等温室气体，例如风电场年减排二氧化碳达35万吨，对应对气候变化和改善空气质量具有直接作用。风电开发注重环境融合，如新能源“魔方”技术平台通过智能选址减少生态干扰，并在施工期实施扬尘、噪音控制及废弃物分类处理。

1.2 经济与社会效益。①产业带动与就业促进。风电产业链涵盖高端装备制造（如风机叶片、变流器）、工程建设和运维服务，已形成万亿级产业集群，推动技术创新和产业升级。乡村风电项目（如“千乡万村驭风行动”）通过土地租赁、税收分成和本地化用工，直接增加农村收入，助力乡村振兴。②成本竞争力与能源安全。风电成本近十年下降70%-80%，经济性日益凸显，成为能源多元化战略的重要组成。③国际项目（如中国电建在越南的风电工程）通过技术输出优化当地能源结构，增强全球能源合作与安全。

1.3 技术创新与能源系统升级。混塔技术、高功率密度变流器等创新应用提升了风机效率和稳定性，如鼎城风电场160米混塔结构捕获高空风能，发电量显著提高。海上风电集成高端装备制造尖端技术，推动工程能力和产业链自主化，形成全球竞争力。风电通过无功补偿、智能调度等技术增强电网适应性，支撑新型电力系统构

建，提供稳定电容量保障。

2 风电场电气工程施工技术要点

2.1 电气系统架构与施工设计

2.1.1 主接线与集电线路设计。采用双回路或多分支集电线路架构，通过架空线路或电缆连接风机与升压站，确保供电冗余性。升压站主接线设计需适应风电场分散接入特点，常用单母线分段或桥型接线结构。

2.1.2 电缆选型与敷设技术。根据电压等级和环境要求选择电缆型号，敷设时采用支撑架和绞磨机自动化牵引，确保路径精准性；海上风电需结合专用辅助装置应对复杂海况。

2.2 关键设备安装与调试

2.2.1 风机与电气设备安装。风机塔筒垂直度误差需控制在 $\leq 2\text{mm}$ ，机舱水平度偏差 $\leq 1\%$ ，使用激光定位技术实现高精度对接。箱式变压器采用全密封结构，就近安装于风机塔基，减少维护需求。

2.2.2 电气调试与并网控制。调试包括继电保护整定、绝缘电阻测试及系统联调，需按GB50173规范执行。通过SVG等无功补偿装置调节功率因数，满足电网电压稳定性要求。

2.3 施工难点与应对措施

2.3.1 复杂地形适应性技术。山地、丘陵地区采用无人机测绘优化运输路线，并设计模块化施工方案降低设备运输难度。动态调整基础类型（如直塔杆、耐角张杆）及防腐工艺，确保地基稳定性。

2.3.2 高精度对接与质量控制。应用激光测量技术控制电缆终端杆与开关柜对接精度，减少线路损耗。风机基础验槽时需彻底清理松散岩块，桩基施工重点监控入岩深度及钢筋笼拼接质量。

2.4 安全与环保管理

2.4.1 施工安全规范。建立三级安全培训体系，重点防范高空作业、重物吊装风险，并制定应急预案。电气

设备安装需设置防雷接地系统，接地电阻值 $\leq 4\Omega$ ，确保设备防雷安全性。

2.4.2 环境保护措施。施工期设置围挡并监测扬尘、噪音，废弃物分类处理以减少生态影响。采用预制式电缆沟和装配式升压站，缩短工期并降低现场污染。

2.5 标准化与技术创新

遵循《风电标准体系框架》和GB50173规范，明确施工流程与验收标准。推广BIM技术模拟电气线路布局，优化施工进度管理；集成物联网技术实现设备状态实时监控。以上技术要点整合与规范实施，可有效保障风电场电气工程的施工质量、安全性和环境友好性，支撑新能源项目高效并网与稳定运行。

3 风电场电气工程关键技术问题

3.1 集电线路设计与施工优化

3.1.1 路径规划与设备布置。集电线路设计常因缺乏总布置图导致箱式变压器位置不合理，引发电缆出线方向与杆塔走向冲突，需结合地形动态优化电缆路径与设备布局。山地风电场需通过无人机测绘和模块化施工方案调整机位，平衡吊装平台与设备临时堆放需求，减少施工误差。

3.1.2 电缆敷设与可靠性保障。复杂地形（如岩石地基）中电缆沟易因松散岩块清理不彻底引发安全隐患，需加强地基验槽质量控制与支撑架牵引精度。高压电缆选型需兼顾载流量与耐压等级，例如YJV23/35型电缆用于35kV集电线路，并通过自动化绞磨机提升敷设效率。

3.2 风机基础施工与安装控制

3.2.1 地基处理与桩基施工。湿陷性黄土或岩基地区需采用嵌岩桩或摩擦桩，重点监控桩基入岩深度偏差（岩面倾斜时误差可能达数米）及钢筋笼拼接焊接质量。混凝土浇筑需实时监测地基沉降，防止因岩层裂隙导致基础不均匀受力。

3.2.2 塔筒与机组安装精度。塔筒垂直度误差需控制在 $\leq 2\text{mm}$ ，机舱水平度偏差 $\leq 1\text{‰}$ ，采用激光定位技术实现高精度对接，避免机械传动系统受力不均。大型叶片气动弹性耦合效应显著，需通过柔性叶片设计技术抑制颤振风险，确保极端风速下结构稳定性。

3.3 并网与功率控制技术

3.3.1 功率预测与协调控制。风速随机性导致输出功率波动，需结合数值天气预报与统计模型提升风能预测精度，支撑电力系统调度。通过SVG等无功补偿装置调节功率因数，并采用分布式协调控制技术平衡多机组输出，提升电网适应性。

3.3.2 电能质量与稳定性。双馈风电机组需解决并网

冲击与电能质量优化问题，通过变流器控制实现恒频输出，降低对电网稳定性的干扰。高比例风电接入时需结合储能系统平抑功率波动，并开发智能脱网策略防止连锁故障。

3.4 设备选型与智能化运维

3.4.1 电力电子设备可靠性。变流器等电力电子器件需耐受高电压冲击与频繁启停，通过拓扑结构优化（如模块化多电平变流器）提升寿命与效率。箱式变压器需采用全密封结构设计，适应高温、高湿等恶劣环境，减少维护频次。

3.4.2 智能化监测与远程控制。集成SCADA系统与物联网技术实现设备状态实时监控，通过故障诊断算法（如振动频谱分析）提前预警齿轮箱、发电机等关键部件异常。偏远地区风电场需建立无人值守运维体系，利用5G通信技术实现远程故障诊断与修复。

3.5 标准规范与技术创新。遵循《风电标准体系框架》及GB50173规范，完善施工验收流程，例如桩基入岩深度验收需以岩面最低点为准。推动气动弹性耦合抑制、高精度功率预测等前沿技术研究，纳入行业重大科学问题攻关方向。

4 风电场电气工程施工管理与实践

4.1 施工安全管理体系

4.1.1 风险防控与事故预防。重点防范高空坠物、触电、设备倒塌等事故，通过三级安全培训体系强化人员安全意识和应急能力，落实高空作业防护装备佩戴规范。建立防雷接地系统，确保升压站设备接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，降低雷击风险；针对海洋风电项目，需采用316不锈钢材料及特殊防腐涂层，满足重盐雾环境要求。

4.1.2 现场用电管理。敷设临时动力与照明线路时需设置标准化配电箱，专职电气技术员负责用电规划与审批，禁止非授权人员私接线路。严格执行《电业安全操作规程》，通过绝缘电阻测试和继电保护整定保障电气设备安全运行。

4.2 电气设备安装与调试

4.2.1 关键设备施工技术。升压站电气设备需满足C5-M级防腐标准，主变压器室配置防爆型辅助设备，海上项目钢管桩采用陆地预制后沉桩工艺，确保抗振动稳定性。箱式变压器就近安装于风机塔基，采用全密封结构设计，减少后期维护频次。

4.2.2 调试与并网控制。系统联调包括变流器恒频输出验证、SVG无功补偿装置响应测试，通过功率因数调节提升电网适应性。采用激光定位技术控制塔筒垂直度（误差 $\leq 2\text{mm}$ ）与机舱水平度（偏差 $\leq 1\text{‰}$ ），避免机

械传动系统受力不均。

4.3 施工组织与进度管理

4.3.1 资源优化与流程协同。分阶段实施施工计划，优先完成基础分坑、电杆焊接等前期作业，动态调整甲供材料进场滞后问题，缩短工期。引入BIM技术模拟集电线路布局，优化24.8km架空线路与电缆沟的协同施工路径，减少返工。

4.3.2 信息化管理工具应用。集成物联网系统实时监控施工进度与资源消耗，例如通过无人机测绘山地地形，动态修正机位布置与运输路线。

4.4 质量控制与验收标准

4.4.1 材料与工艺标准。电缆选型需匹配环境需求，如YJV23/35型电缆用于35kV集电线路，穿越段采用 $3\times 185\text{mm}^2$ 截面保障载流量。桩基入岩深度验收以岩面最低点为准，钢筋笼拼接焊接质量需100%检测，防止基础不均匀沉降。

4.4.2 质量监督与检测技术。应用无损检测技术（如超声波探伤）核查塔筒焊缝、电缆终端头密封性，确保设备寿命 ≥ 30 年。

5 风电场电气工程安全管理措施

5.1 安全责任体系与制度建设

5.1.1 明确责任主体。建立三级安全管理网络，明确风电场场长、部门负责人及班组安全员职责，形成“横向到边、纵向到底”的责任体系。制定《安全生产标准化实施细则》，规范设备操作、作业许可、应急响应等流程，要求全员签署安全责任书。

5.1.2 规范作业流程。执行“两票三制”（工作票、操作票及交接班、巡回检查、设备定期试验轮换制度），对电气设备操作实施双重监护，严禁无票作业。对高空作业、带电作业等高风险场景实行分级审批，作业前需完成JHA（作业危害分析）评估。

5.2 设备安全管理

5.2.1 电气设备监测与维护。对35kV及以上电缆接头、GIS设备实施红外测温与局部放电检测，每季度开展一次全面绝缘测试，确保设备完好率 $\geq 98\%$ 。采用C5-M级防腐标准处理升压站设备，海上项目使用316L不锈钢材质，并加装防盐雾密封装置。

5.2.2 智能监测技术应用。部署在线监测系统实时采集变压器油色谱、风机齿轮箱振动数据，通过AI算法预警潜在故障（如绕组过热、轴承磨损）。对电缆沟安装温湿度传感器与视频监控，防止积水、小动物侵入导致的短路事故。

5.3 人员安全能力建设

5.3.1 分级培训与考核。新员工需完成72学时三级安全教育（含触电急救、消防器材使用），并通过仿真操作考核方可上岗。每年组织4次专项培训，重点强化高空救援、电气火灾扑救等应急处置技能。

5.3.2 行为规范管理。强制要求进入升压站人员穿戴全套绝缘防护装备（ $\geq 10\text{kV}$ 耐压等级），作业时保持0.7m以上安全距离。推行“安全积分制”，对违规操作（如未验电接地、跨越安全围栏）实行红牌罚下与再培训。

5.4 高风险作业管控

5.4.1 高空与吊装作业。塔筒安装需使用双钩防坠器，风速 $> 12\text{m/s}$ 时禁止吊装，叶片对接采用激光定位辅助系统控制精度（误差 $\leq 3\text{mm}$ ）。吊装区域设置半径30m隔离带，信号员与操作手配备防干扰通信设备。

5.4.2 带电作业防护。检修35kV集电线路时采用绝缘斗臂车作业，验电器、接地线需经5000V耐压测试合格。箱变维护前执行“五防”闭锁验证，并悬挂“禁止合闸”警示牌。

5.5 环境风险与应急管理

5.5.1 极端天气应对。雷雨季节前完成所有设备接地电阻复测（ $\leq 4\Omega$ ），配置移动式柴油发电机作为应急电源。建立气象预警联动机制，风速 $> 25\text{m/s}$ 时启动全场停机程序，人员撤至防风掩体。

5.5.2 应急预案与演练。编制触电、火灾、设备倒塌等7类专项预案，每季度开展多部门联合演练，确保15分钟内完成应急响应。现场配备AED除颤仪、高压绝缘毯等急救设备，与最近三甲医院建立绿色救治通道。

5.6 数字化管理工具

应用“智慧工地”平台集成人员定位、电子围栏、违章抓拍功能，实时监控作业动态并生成安全日报。通过BIM模型模拟集电线路施工路径，优化设备布局与安全通道设计，减少交叉作业风险。

总之，风电场电气工程施工需通过标准化安全管理、精细化设备安装、智能化进度协同及严格质量验收实现高效管控。结合BIM模拟、物联网监测等技术创新，可提升复杂环境适应性，保障项目安全、环保与经济性目标。

参考文献

- [1]韩轩.风电场电力监控系统安全防护的探讨.2020.
- [2]郭宏宇.浅谈新能源风电场电气工程施工技术分析.2023.