风电场集电线路优化设计与防雷接地技术探讨

刘和曦
中核汇能河南能源有限公司　河南　郑州　450018

摘　要：风电场多建设于山地、沿海等空旷区域，集电线路长期暴露在复杂户外环境中，普遍存在布局不合理、输电损耗偏高、防雷接地防护不足等问题，极易引发线路故障与设备雷击损坏。本文以风电场集电线路为研究对象，分析线路运行与防雷接地系统的现存缺陷，从线路路径规划、参数选型、组网结构等方面开展线路优化设计。同时结合场地雷电特性，优化外部防雷布局、接地网结构、低阻改造工艺及过电压防护体系。通过系统性优化，有效提升集电线路输电稳定性与雷电防护能力。

关键词：风电场；集电线路；优化设计；防雷接地；关键技术

引言：随着风电产业规模化发展，风电场装机容量持续提升，集电线路作为电能汇集与传输的核心环节，其运行稳定性直接影响风电场发电效率与并网安全。野外风电场气象与地质条件复杂，雷电活动频繁，多数早期风电场线路设计与防雷标准偏低。传统线路布线粗放、组网形式单一，接地系统施工不规范，雷击跳闸、线路损耗超标等运行问题频发。为改善风电场运行现状，本文结合现场实际工况，开展集电线路优化与防雷接地技术研究，旨在解决工程现存短板，提升风电场整体安全运行水平。

1 风电场集电线路与防雷接地基础理论

1.1 风电场集电线路系统构成与运行原理

风电场集电线路是风电电力输送的核心载体，主要由风机出口电缆、架空线路、杆塔、联络开关及母线等设备组成，承担单台及多台风机电能汇集、输送至升压站的关键作用。系统整体采用分级汇集模式，单台风力发电机产生的电能经机端变压后，通过分支集电线路汇总至场内主干线路，最终输送至升压站完成升压并网。日常运行中，集电线路长期处于户外复杂环境，持续承载波动式风电负荷，线路运行状态直接决定风电场整体供电稳定性与并网安全性，是风电场运维管控的核心环节。

1.2 集电线路常见型式及适用工况对比

当前风电场集电线路主要分为架空线路、电缆线路两种主流型式，适配不同场地工况。架空线路造价低、施工便捷、后期检修维护难度小，广泛应用于地形开阔、地势平坦的陆上平原风电场，但受气象环境影响较大。电缆线路多采用地埋敷设方式，抗环境干扰能力强、运行稳定性高、占地面积小，适用于山地、丘陵、沿海滩涂等复杂地形，以及景观、环保要求较高的风电场。相较架空线路，电缆线路建设成本更高，故障排查难度大，运维成本偏高，工程中需结合场地条件、投资预算合理选型。

1.3 风电场地域雷电特性与雷击危害机理

风电场多选址于空旷野外、山地山脊及沿海区域，这类区域地势开阔、无遮挡，风机塔筒高耸，极易成为雷电直击和感应雷击的目标。风电场地域雷电活动具有频次高、瞬时电流大、电压冲击强的特点。雷击主要分为直击雷和感应雷两类危害，直击雷会直接损毁线路、杆塔及风机设备，造成设备永久性损坏；感应雷会在线路中产生瞬时过电压，击穿线路绝缘、损坏二次控制设备，引发线路跳闸、风机停机等故障，严重时会造成全场停电，给风电场带来直接经济损失[1]。

2 风电场集电线路及防雷接地现存问题

结合陆上及山地风电场实际运行工况，目前多数风电场集电线路与防雷接地系统在设计、施工及运维阶段仍存在诸多典型问题，直接影响场内电力输送稳定性与设备防雷安全，具体问题如下：（1）集电线路布局设计不合理。部分风电场前期规划未结合场地地形、风机分布特点布线，存在线路绕行距离过长、分支线路交叉混杂等问题。不合理的布局不仅增加线缆耗材与工程建设成本，还会增大线路阻抗，加剧电力传输损耗，长期运行易出现局部负荷不均的情况。（2）线路运行稳定性不足。风电出力具有随机性、波动性特点，现有部分集电线路参数选型偏保守，未适配风电负荷波动特性。风机频繁启停、负荷骤变时，线路易产生电压波动、谐波干扰问题，引发线路跳闸、供电异常等故障，降低风电场并网运行可靠性。（3）防雷防护措施存在短板。多数风电场仅依靠杆塔避雷线、避雷器进行基础防雷，防护模式单一。针对山地、沿海多雷区的感应雷防护力度不足，无法有效抵御雷电感应产生的瞬时过电压，时常造

成线路绝缘破损、二次设备损坏。（4）接地系统隐患突出。施工现场存在接地网敷设不规范、接地体搭接长度不足、土壤降阻处理不到位等施工问题。同时长期运行后，接地体易发生腐蚀、老化，导致接地电阻超标，雷击时无法快速泄放雷电流，大幅提升设备雷击损坏风险[2]。

3 风电场集电线路优化设计

3.1 集电线路路径优化布置原则

集电线路路径是线路设计的基础，直接决定线路输电损耗、施工难度和运行安全，优化设计需严格遵循现场适配、合规施工、安全运行的核心原则。（1）地形适配原则。路径规划优先避开山体滑坡、低洼积水、土质松软等不良地质区域，减少杆塔基础加固施工，规避后期地基沉降、杆塔倾斜等隐患。山地风电场尽量沿山脊、平缓坡地布线，避免大跨度跨谷、跨沟布线，降低线路悬空受力风险。（2）就近汇集原则。结合全场风机点位分布，以就近汇集为核心，缩短分支线路敷设距离，杜绝线路无谓绕行、交叉重叠、跨线干扰等问题，精简线路整体布局。（3）合规管控原则。线路路径严格避让生态保护区、居民区、高压输电走廊，符合电力线路安全间距规范，同时兼顾后期运维检修通道畅通，为线路巡检、故障抢修提供便利条件。

3.2 杆塔、线缆参数优化选型

传统风电场线路参数选型多采用统一标准，未结合单条线路负荷差异匹配参数，易出现小负荷大线缆、大负荷小截面的适配问题。本次优化根据各分支线路风机装机容量、输电距离、负荷峰值进行差异化选型。（1）杆塔选型优化。平原开阔风电场优先选用直线水泥杆塔，结构稳定、造价低廉，适配常规输电工况；山地、沿海多风区域采用钢结构杆塔，提升抗风、抗形变能力，适配复杂气象条件。同时根据线路跨度、高差调整杆塔高度和间距，杜绝大跨度悬垂线路，控制线路弧垂，避免线路对地、对山体安全距离不足。（2）线缆截面优化。依据风机额定出力、线路最大输送容量计算载流量，短距离分支线路选用中小截面线缆，降低工程耗材成本；长距离主干线路升级大截面线缆，有效降低线路电阻，减少输电过程中的有功损耗，解决重载线路发热、电压压降过大的问题。

3.3 场内组网结构优化方案

多数早期风电场采用单一链式组网结构，线路容错率低，单台风机或单段线路故障易造成整条支路停机。结合风机分布特点，对场内集电线路组网结构进行精细化优化。（1）分区组网布置。按照风机集群分布情况，将全场风机划分为多个独立汇集分区，每个分区设置专属分支线路，分区独立输电、互不干扰，避免局部故障扩散至全场线路，有效缩小故障影响范围。（2）环网结构改造。对核心主干线路采用环网组网模式，替代传统单链式结构，设置联络开关，线路单侧故障时可快速切换供电路径，保障分区内风机持续并网运行，显著提升系统供电可靠性与故障自愈能力。（3）负荷均衡优化。调整各分支线路接入风机数量，均衡各支路输电负荷，避免单条线路负荷过载、部分线路轻载运行的失衡问题，让各支路负荷长期处于合理运行区间，有效降低线路损耗，提升整体输电效率与设备利用率。在完成杆塔线缆选型与组网结构优化之后，还需要结合风电场实际出力波动开展校核验算。结合现场多年运行数据，校验不同风速工况下各支路的载流量、电压偏差，防止设计工况与实际运行工况出现偏差。对于改造项目，还应兼顾原有设备条件，尽量减少设备更换规模，控制施工改造工作量，保证优化方案能够平稳落地实施。

3.4 优化方案节能与经济性分析

集电线路优化设计在保障运行安全的基础上，兼顾节能效益与工程经济性，实现安全与成本的双向优化。节能层面，路径精简、线缆截面适配及负荷均衡优化，有效降低线路电阻和输电损耗，减少风电传输过程中的电能浪费，提升风电场整体发电利用率，长期运行节能效果显著。经济层面，差异化参数选型避免了设备冗余投入，精简线路布局减少线缆、杆塔等耗材用量，有效控制初期建设成本。同时，优化后的线路结构故障率大幅降低，减少线路检修、设备更换的运维成本，降低故障停机造成的发电量损失。整体来看，本次优化方案适配风电场长期运行需求，工程落地性强，具备良好的经济效益与运行价值[3]。

4 风电场集电线路防雷接地关键技术优化

4.1 集电线路外部防雷防护优化

传统集电线路外部防雷多采用全线架设避雷线的统一模式，存在资源浪费、局部防护盲区等问题，本次优化实行分区差异化防护策略，针对性提升线路外部抗雷击能力。（1）重点区段强化防雷处理。对山脊走线、开阔高地、迎风坡面等雷电易击区段，增设全程双避雷线，适当减小避雷线保护角，将常规25°保护角优化至15°~20°，缩小线路裸露防护范围，杜绝直击雷击中导线的情况。对低洼、遮挡充足的非雷害高发区段，保留单避雷线配置，控制工程投入。（2）杆塔防雷优化改造。在架空线路杆塔顶端加装专用防雷金具，补齐杆塔尖端防雷短板，同时对老旧杆塔绝缘子进行更换，选用耐污、耐雷击型复合绝缘子，提升线路绝缘耐受能力，减

少雷击闪络故障。（3）差异化防雷布局。取消部分电缆敷设段的冗余避雷设施，结合地埋电缆绝缘优势，重点强化电缆与架空线路衔接段的防雷防护，解决衔接段雷击故障高发的现场难题。

4.2 接地网结构优化设计

多数风电场原有接地网多采用单一环形简易敷设结构，散流路径单一、均压效果差，土壤电阻率不均时易出现局部散流受阻问题。结合风机点位与线路杆塔分布，对接地网结构进行系统化优化。（1）杆塔独立接地网优化。摒弃传统简易方框式接地体，采用外延放射式接地结构，以杆塔基础为中心，增设多根水平外延接地扁钢，延长散流长度，扩大电流扩散范围，提升单杆散流能力。（2）全场接地网互联优化。将各杆塔独立接地网采用接地扁钢进行可靠连通，形成区域性联合接地网，实现雷电流多点分散泄放，避免单杆接地负荷集中，有效降低雷击瞬间地电位抬升幅度。（3）结构适配性优化。针对山地岩石、贫瘠土壤区域，调整接地网敷设形态，因地制宜采用不规则延展结构，避开坚硬岩层集中区域，降低施工难度，保证接地体有效敷设长度满足规范要求[4]。

4.3 低阻接地改造技术措施

高土壤电阻率区域是风电场接地电阻超标的核心原因，常规接地敷设方式难以达标，需采用针对性低阻改造技术，保障接地电阻稳定符合运行标准。（1）局部换土降阻。对杆塔接地点位表层岩石、砂石土壤进行更换，替换为电阻率更低、透水性更好的粉质黏土，分层回填夯实，提升接地体与土壤的接触密实度，减少接触电阻。（2）长效降阻剂施用。在接地体敷设沟槽内均匀敷设环保长效降阻剂，包裹接地扁钢与接地极，填充土壤缝隙，形成稳定导电通道，改善土壤导电性能，相较于传统降阻方式，可有效避免后期电阻反弹。（3）深井接地极增设。针对表层土壤电阻率过高、换土效果有限的区域，增设深井垂直接地极，深入地下低电阻土层，利用深层土壤良好导电特性辅助散流，大幅提升高阻区域接地降阻效果，保障全场接地电阻统一达标。

4.4 线路感应过电压综合防护技术

风电场空旷开阔的场地特征极易引发感应雷，产生瞬时过电压损坏线路与二次设备，针对感应雷防护薄弱的问题，构建全方位过电压防护体系。（1）优化避雷器布置方式。在架空线路分支处、杆塔关键位置、电缆架空衔接段加密安装氧化锌避雷器，替代传统稀疏布置模式，快速钳制线路瞬时过电压，释放感应雷残留电流。（2）线路屏蔽优化。对场内集电线路架空段统一规整布线，减小线路回路包围面积，降低雷电电磁感应耦合强度，从源头削弱感应过电压幅值。对场内二次控制线缆、信号线缆采用屏蔽线缆敷设，做好两端接地，规避电磁感应干扰。（3）过电压配合优化。结合线路电压等级，统筹调整避雷器绝缘配合参数，区分主干线路与分支线路防护层级，建立分级过电压防护体系，避免雷电过电压逐级传导，保护线路绝缘、箱变及二次测控设备安全，全面提升集电线路抗雷击干扰能力[5]。

结束语：本文完成风电场集电线路运行现状、基础理论、线路优化及防雷接地技术的系统性分析，针对性解决了线路布局不合理、负荷不均、防雷措施单一、接地电阻超标等工程问题。通过路径优化、参数适配、组网改造及多级防雷接地优化，有效改善了集电线路的输电性能与抗雷击能力。后续可结合不同地域雷电参数与地质条件，进一步细化差异化优化策略，持续提升风电线路防护技术的适配性。

参考文献

[1]南泽文,蔡斌,梁茂祺,等.35kV风电场集电线路防雷仿真方法优化研究[J].电工技术,2025,(1):159-165.

[2]尉彩宁,曾赞文,杨红,等.山区风力发电集电线路防雷接地系统自动化优化与检测[J].今日自动化,2025,(10):157-159.

[3]唐雪峰.风电场集电线路电气设计与故障研究[J].现代工程科技,2025,4(16):121-124.

[4]石利国.集电线路防雷接地技术在风电场施工中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(9):159-162.

[5]黄成龙,冯宁.风电场集电线路的雷电防护技术应用[J].电力系统装备,2025,(7):141-143.