

风电与光伏新能源工程电气施工中的接地技术研究

张立刚 魏彤

中广核新能源广西分公司，广西南宁市，530200；

摘要：风电与光伏新能源工程电气施工中的接地技术是保障系统安全稳定运行的核心环节，新能源设备（如风机叶片、光伏阵列）多位于开阔或高耸区域，易遭直击雷或感应雷破坏。有效接地可将雷电流引入大地，避免设备损坏。消除漏电风险，防止人身触电；通过等电位连接减少金属部件间电位差，避免火花放电。降低接地电阻可减少电磁干扰，确保逆变器、控制系统等电气设备正常运行，合理选择接地材料和优化接地布局对于降低接地电阻、减少电磁干扰具有重要意义。

关键词：风电；光伏；新能源；电气施工；接地技术

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.020

接地技术是指通过导体将电力系统、电气设备的外露导电部分与大地建立低阻抗通路的技术，核心作用是构建电位基准与安全泄流通道。在风电与光伏新能源工程中，其应用对系统安全、稳定运行具有不可替代的重要性。

1 接地技术定义及在风电光伏中的应用重要性

1.1 接地技术的定义与核心功能

基本定义，电力系统中性点、设备外壳等导电部分通过导体与大地连接，形成电流泄漏的低阻通路，涵盖防雷接地、保护接地、工作接地等类型。包含两种形式：安全地：连接大地，保障人身设备安全（如防雷接地）；信号地：建立系统基准电位，抑制电磁干扰（如屏蔽接地）。核心功能，泄放故障电流：设备漏电或短路时引导电流入地，避免触电事故；稳定系统电位：维持中性点电压平衡，防止设备因电压波动损坏；消散异常能量：引泄雷电流、静电及电磁干扰能量，保护设备安全。

1.2 在风电与光伏工程中的关键应用价值

保障人身与设备安全，防雷保护：风机叶片易遭直击雷，光伏阵列易受感应雷影响，需通过避雷针+低阻抗接地网（电阻 $\leq 10\Omega$ ）快速引雷入地。水上光伏需加强防腐设计（如不锈钢接地体），防止海水电解加速接地网腐蚀。漏电防护：组件边框、支架等金属部件通过接地线（铜缆 $\geq 6\text{mm}^2$ ）可靠连接接地极，漏电时可瞬间触发保护装置断电。维持系统稳定运行，电压平衡：工作接地确保系统中性点电位稳定，避免相电压失衡导致逆变器、变压器烧毁。抑制干扰：光伏逆变器开关动作产生电磁干扰，屏蔽接地可消除信号传输异常，保障监控与通信系统精度。满足法规与标准强制性要求，需严格遵循 GB50169-2022 与《光伏发电站设计标准》，明

确规定：接地电阻限值（山地 $\leq 4\Omega$ ，普通场地 $\leq 10\Omega$ ）；接地材料规范（镀锌钢厚度 $\geq 4\text{mm}$ ，铜覆钢电阻率 $< 0.05\Omega\cdot\text{m}$ ）；定期检测要求（接地电阻每季度测试，雨季前专项维护）。

1.3 技术演进方向

智能化监测：部署传感器实时监控接地状态，预警腐蚀或高阻故障（如国电南瑞系统，准确率 92%）；风光协同接地：风光互补电站需统一接地网设计，规避跨步电压风险。接地技术是风电、光伏系统安全的基石，直接关系到设备寿命、发电效率及人员安全，需依据环境与规范定制化实施。

2 风电与光伏新能源工程接地技术类型

2.1 防雷接地

光伏系统：保护组件边框、支架及电气设备，通过接地孔将组件边框与支架连接，组串两端组件需可靠接地；接地电阻要求 $\leq 10\Omega$ （组件）和 $\leq 4\Omega$ （逆变器）。采用避雷针（接闪器）→引下线→接地网的三级防雷结构，雷电流经接地装置泄入大地。风电系统：风机叶片内置导电纤维网，引导雷电流经塔筒引下线至接地网；接地电阻要求 $\leq 4\Omega$ （高雷暴区域）。塔筒底部设置环形接地网，并采用深埋接地极（ $\geq 2.5\text{m}$ ）降低电阻。

2.2 工作接地

光伏系统：变压器中性点或中性线（N 线）接地，确保电网电压稳定；N 线需采用铜芯绝缘线。逆变器 PE 端子通过配电箱 PE 排接地，形成工作接地回路。风电系统：发电机中性点经消弧线圈接地，防止系统过电压。

2.3 保护接地

设备外壳接地：光伏组件边框、逆变器外壳、配电

柜金属框架均需接地，消除漏电风险。风机塔筒、机舱外壳通过等电位连接形成整体接地网络。跨接要求：配电柜门与柜体间用黄绿铜线跨接；光伏支架采用 40×4 mm 镀锌扁钢或 $\phi 12$ mm 圆钢埋深 ≥ 1.5 m。

2.4 屏蔽接地

光伏系统：RS485 通信线屏蔽层接地，防止电磁干扰影响逆变器集群通信。风电系统：控制柜、传感器外壳接地，抑制机舱内高频电磁干扰。

2.5 防静电接地

应用场景：光伏逆变器在干燥机房内安装时，需单独防静电接地（可与保护接地共用）。风电系统：机舱内精密电子设备（如控制系统）在干燥环境下需防静电接地，电阻 $\leq 10 \Omega$ 。

3 风电与光伏新能源工程接地技术现状

3.1 防雷接地技术标准化提升

风电叶片防雷，叶片内置导电纤维网成为主流（导通电阻 $< 0.1 \Omega$ ），配合塔筒引下线实现雷电流高效泄放（电阻 $\leq 10 \Omega$ ）。光伏阵列防护，组件边框多点接地+避雷器成标配，感应雷防护要求 SPD 残压值 < 2.5 kV。风光协同接地，风光同场项目强制统一接地网设计（电阻 $\leq 1 \Omega$ ），降低跨步电压风险。

3.2 材料与施工规范升级

材料革新，淘汰普通钢材，强制采用镀锌钢（厚度 ≥ 4 mm）或铜覆钢（电阻率 $< 0.05 \Omega \cdot \text{m}$ ）。施工精度，螺栓连接扭矩 $\geq 25 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，焊接点三重防锈处理；山地项目接地体深埋需穿透冻土层。

3.3 智能运维体系普及

实时监测，部署分布式传感器（如国电南瑞系统），接地故障预警准确率达 92%。高效检修，无人机红外巡检定位故障点，维修时间缩短至 1.5 小时。定期维护，接地电阻季度检测+雨季前专项排查成行业规范。

3.4 现存挑战

腐蚀控制，沿海地区接地网年腐蚀率仍达 1.2 mm/年，需开发长效涂层材料。高寒适应性，冻胀导致接地线断裂事故率约 0.3 次/站·年。标准协同，风光互补项目接地电阻限值尚未跨厂商统一。

4 风电光伏接地中的接地电阻与电磁干扰问题

风电与光伏新能源工程中，接地电阻与电磁干扰问题是影响系统安全稳定运行的关键因素，其特殊要求与技术现状：

4.1 接地电阻的核心要求与技术现状

严格限值与场景适配，风电：山地风机接地电阻需 $\leq 4 \Omega$ （普通场地 $\leq 10 \Omega$ ），海上风电因防腐需求采用铜覆钢接地网（电阻率 $< 0.05 \Omega \cdot \text{m}$ ）。光伏：组件边框接地电阻 $\leq 4 \Omega$ ，大型电站联合接地网需 $\leq 1 \Omega$ ；防雷独立接地 $\leq 10 \Omega$ ，安全保护接地 $\leq 4 \Omega$ 。降阻技术：山地/高阻区采用深井接地（ ≥ 2.5 m）+降阻剂填充（如导电水泥），电阻可从 $> 500 \Omega$ 降至达标值。防腐与长效性，沿海/海上项目采用不锈钢接地体+牺牲阳极，寿命提升至 ≥ 20 年；普通镀锌钢年腐蚀率超 1.2 mm，需定期检测更换。智能监测应用，部署传感器实时监控接地电阻，故障预警准确率达 92%（如国电南瑞系统）；无人机红外巡检定位接地故障，维修时间缩至 1.5 小时。

4.2 电磁干扰（EMI）的成因与抑制措施

干扰源与影响，逆变器开关动作：产生高频传导干扰（5–20 kHz），导致信号传输异常、设备误动作。组件布线感应：光伏阵列长距离直流线路易耦合辐射干扰，影响监控系统精度。雷击感应：雷电电磁脉冲（LEMP）可烧毁逆变器内部控制板。抑制技术，接地优化：信号地单点接地：避免地环路干扰，降低共模噪声。屏蔽接地：逆变器金属外壳接地，屏蔽高频辐射（10 cm 外辐射归零）。滤波与隔离：电源输入端加装 LC 滤波器，抑制传导干扰（插入损耗 ≥ 20 dB）。光耦隔离或变压器隔离通信线路，阻断地环路。等电位联结：风机塔筒法兰、光伏支架金属部件跨接，消除电位差引起的干扰。

4.3 现存挑战与标准规范

技术瓶颈，山地接地降阻成本高，降阻剂有效期仅 3–5 年；逆变器高频干扰抑制需定制化方案，通用滤波器效果有限。强制标准，接地电阻限值遵循 GB 50169–2022（山地 $\leq 4 \Omega$ ）；电磁兼容需满足 GB/T 17626 系列标准，逆变器辐射值 $< 100 \mu \text{ T}$ （工频磁场）。

5 风电光伏接地材料的选择方法

5.1 基础选型原则

导电性能优先级，核心材料：铜覆钢（电阻率 $< 0.05 \Omega \cdot \text{m}$ ）用于海上风电/沿海光伏，确保低电阻值；经济替代：镀锌圆钢（直径 ≥ 8 mm）或扁钢（40×4 mm）用于内陆普通场址，满足电阻 $\leq 4 \Omega$ 要求。防腐能力匹配环境，高盐雾区（海上/沿海）：不锈钢接地体+牺牲阳极，寿命 ≥ 20 年；普通地区：热镀锌钢（镀层 $\geq 80 \mu \text{ m}$ ），年腐蚀率 < 0.1 mm。机械强度适配施工条件，山地岩石区：选用高韧性镀铜圆钢（抗拉强度 $\geq 500 \text{ MPa}$ ），抵抗爆破冲击；冻土区：深埋角钢（50×50×5 mm，埋深 $>$

冻土层)防冻胀断裂。

5.2 成本优化策略

分级配置,关键节点(如逆变器接地):铜材(截面积 $\geq 35\text{mm}^2$)确保高导通性;非关键区域(如光伏支架):镀锌扁钢($40\times 4\text{mm}$)降低成本。长效降阻方案,降阻剂复合使用:导电水泥+石墨基填充剂,有效期延至8-10年;模块化接地:预制混凝土接地模块(降阻率40%),减少开挖成本。防腐增效技术,镀层强化:热镀锌层厚度 $\geq 85\mu\text{m}$,盐雾寿命提升30%;电化学保护:镁牺牲阳极(输出电流 $\geq 10\text{mA}/\text{m}^2$)延长钢材寿命。

5.3 避坑要点

杜绝材料误用,组件边框接地禁用铝线(电解腐蚀风险),必须用 4mm^2 铜缆跨接;雷击高风险区避雷带禁用普通圆钢,需直径 $\geq 12\text{mm}$ 镀锌圆钢。施工质量管控,连接点焊接后需防腐处理(涂覆环氧沥青 $\geq 200\mu\text{m}$);接地网埋深 $>0.8\text{m}$,避免农耕或沉降破坏。

6 风电光伏直击雷的防护措施

6.1 风机直击雷防护

叶片接闪系统,叶片尖端嵌入铜合金接闪器(曲率半径 $\leq 0.5\text{mm}$),内部铺设导电纤维网(电阻 $<0.1\Omega/\text{m}$),通过铜带引下至塔筒接地。120m以上高塔需增设水平避雷带防御侧击雷,与外圈梁焊接成环形均压带。塔筒与机舱防护,塔顶安装不锈钢避雷针(高度 $\geq 1.5\text{m}$),与塔筒钢结构多点焊接导通;玻璃钢机舱外壳覆盖铜网屏蔽层(网孔密度 $\leq 20\text{cm}\times 20\text{cm}$),消除雷击电磁脉冲。

6.2 特殊场景强化措施

海上/水上项目,浮台光伏采用六边形不锈钢接地网(节点电阻 $<0.1\Omega$),避雷杆升降结构抗浪高 $\geq 10\text{m}$;浪溅区接闪器用316L不锈钢,三重密封防盐雾渗透,年腐蚀率 $<0.05\text{mm}^3$ 。高寒/高盐雾区,冻土区:镀锌角钢垂直深埋($>$ 冻土层 0.5m),混凝土包覆抗冻胀;盐渍区:铜覆钢绞线接地主干线+牺牲阳极保护,设计寿命 ≥ 20 年。

6.3 智能防护技术

动态避雷系统:雷电预警联动升降式避雷针(响应时间 ≤ 30 秒),常态收缩保障发电量;多针协同防护:大型电场通过计算机建模优化避雷针布局,消除保护死角。设计铁律:山地光伏 $\rightarrow$ 深埋接地极+石墨降阻剂|海上风电 $\rightarrow$ 铜覆钢网格+动态避雷,屋顶电站 $\rightarrow$ 与原建筑

防雷系统整合|高寒机组 $\rightarrow$ 镀锌角钢混凝土包覆。施工禁忌,禁用铝线连接组件边框(电解腐蚀),必须用 $\geq 4\text{mm}^2$ 铜缆;避雷针垂直度偏差 $>0.5\%$ 或焊接虚焊需返工。通过上述分层防护体系,可有效拦截99%直击雷威胁,降低设备损毁率80%以上。

7 风电光伏感应雷防护的有效策略

7.1 等电位连接体系构建

全域金属部件互联,光伏支架、风机塔筒、逆变器外壳等所有金属构件需通过铜缆($\geq 4\text{mm}^2$)或镀锌扁钢连接至接地网,消除设备间电位差;连接点电阻 $\leq 0.05\Omega$,清除氧化层后使用防水端子压接,避免电解腐蚀。电缆屏蔽层双端接地,直流/交流电缆屏蔽层在汇流箱端和逆变器端同步接地,抑制感应过电压;屏蔽层接地间隔 $\leq 20\text{m}$ (山地场景)或 $\leq 50\text{m}$ (平原场景)。

7.2 电磁屏蔽强化措施

敏感设备屏蔽防护,逆变器控制柜采用双层金属网屏蔽(网孔密度 $\leq 5\text{cm}\times 5\text{cm}$),屏蔽效能 $\geq 60\text{dB}$;海上项目机舱外壳覆盖316L不锈钢屏蔽层,阻断盐雾环境电解腐蚀。线路走线优化,电源线与信号线分层敷设,间距 $\geq 30\text{cm}$,交叉时垂直穿越;光伏阵列内直流线缆穿金属管敷设,管壁两端接地。

7.3 智能监测与运维

SPD智能监测系统:霍尔传感器实时采集泄流次数,自动报警更换失效模块;接地电阻在线监测:无线传输数据至云平台,异常值($>4\Omega$)触发工单。防护成效:完备感应雷防护可使电子设备损毁率降低85%,运维成本减少40%。实施禁忌,禁止铝线连接金属边框(引发电解腐蚀);SPD接地线长度 $>0.5\text{m}$ 时需加粗线径(每增加 0.5m 线径提升 6mm^2)。

总之,接地技术是风电、光伏系统安全的基石,直接关系到设备寿命、发电效率及人员安全,需依据环境与规范定制化实施。风电光伏接地需平衡低电阻保障安全与抗干扰维持稳定,未来方向聚焦智能监测、长效防腐材料及风光协同EMC设计。

参考文献

- [1]刘英.浅析风电与光伏新能源工程电气施工中的接地技术.2022.
- [2]张宏宇.风电与光伏新能源工程电气施工中的接地技术探讨.2023.