

光伏电站项目电气设计要点

翟 旭

中国建筑第六工程局有限公司 天津 300170

摘要: 本文介绍了光伏电站电气系统组成,包括光伏组件阵列、汇流箱、逆变器、升压变压器、配电装置和监控系统等。阐述了电气设计关键点,涵盖电气主接线设计、设备选型与配置、短路电流计算与设备校验、防雷与接地设计、电缆选型与敷设、无功补偿与电能质量,以及电气系统保护与控制,为光伏电站电气设计提供参考。

关键词: 光伏电站; 电气设计; 无功补偿; 防雷接地; 保护控制

引言: 随着能源结构调整,光伏电站发展迅速。电气设计作为光伏电站建设的关键环节,直接影响电站发电效率、运行稳定性及安全性。合理的电气设计需综合考虑多方面因素,从系统组成到各环节设计要点,都要精心规划。本文围绕光伏电站电气设计展开,为相关设计与建设提供理论支持与实践指导。

1 光伏电站电气系统组成

1.1 光伏组件阵列

光伏组件阵列是光伏电站的核心发电单元,其类型与连接方式直接影响电站的发电效率。光伏组件按材料主要分为单晶硅与多晶硅两类。单晶硅组件具有较高的光电转换效率,通常可达20%以上,其晶体结构完整,对光线的吸收与转化能力更强,在光照条件稳定的环境中表现优异。多晶硅组件制造成本较低,但转换效率相对略低,约为15%-18%,其生产工艺简化,更适合对成本敏感的大型电站项目。组件阵列的串并联方式需根据电站设计容量与逆变器输入参数确定。串联可提升输出电压,减少电流损耗,但需避免因组件失配导致功率下降;并联可增加输出电流,但需确保各支路电压均衡。合理的串并联组合能最大限度减少内部损耗,提升整体发电量。

1.2 汇流箱

汇流箱是光伏阵列与逆变器之间的关键连接设备,其核心功能包括电流汇集与防雷保护。汇流箱将多个光伏组串输出的直流电汇总为单路电流,减少线路连接复杂度,降低直流侧配电成本。其选型需重点关注额定电流与防护等级。额定电流需根据组串总电流确定,通常保留20%以上的余量以应对极端工况;防护等级需达到IP65以上,确保在户外恶劣环境下防尘防水。部分高端汇流箱集成智能监测模块,可实时监测每路组串的电流、电压及温度参数,为故障诊断提供数据支持。

1.3 逆变器

逆变器是实现直流电向交流电转换的核心设备,其类型与配置直接影响电站的电能质量与并网稳定性。按电气拓扑结构,逆变器可分为集中式、组串式与微型逆变器。集中式逆变器容量大,单机功率通常在500kW以上,适用于大型地面电站,其优点是效率高、成本低,但存在部分组串失配时整体效率下降的问题^[1]。组串式逆变器单机功率为50-250kW,每台逆变器连接若干组串,可独立优化每串发电效率,适合复杂地形或屋顶分布式电站,但设备数量多,维护成本较高。微型逆变器直接安装在组件背面,可实现对每个组件的独立控制,最大化发电量,但成本较高,多用于高价值场景。

1.4 升压变压器

升压变压器是连接光伏电站与电网的关键设备,其作用是将逆变器输出的低压交流电提升至适合并网的电压等级。变压器容量需根据电站总装机容量与并网要求确定,通常保留10%-15%的裕量以应对发电峰值。接线方式包括双绕组与三绕组两种:双绕组变压器结构简单,适用于单一电压等级并网;三绕组变压器可同时连接不同电压等级的电网,灵活性更高。干式变压器因防火性能好、维护简便,在光伏电站中应用广泛;油浸式变压器则因过载能力强,在高寒或高海拔地区更具优势。

1.5 配电装置

配电装置是光伏电站电能分配与控制的核心环节,主要包括高压开关柜、低压开关柜及直流配电柜。高压开关柜用于升压变压器出线侧,承担电能分配与短路保护功能,其设计需符合电网接入标准,配置断路器、隔离开关及接地开关等组件。低压开关柜用于逆变器交流侧配电,通过母线系统将电能分配至不同用电单元,其布局需遵循安全间距要求,避免相间短路风险。直流配电柜位于汇流箱与逆变器之间,负责直流电能的分配与保护,需配置熔断器、直流断路器等保护器件。所有配电装置均需设置防火隔断与机械联锁装置,防止误操作

引发安全事故。

1.6 监控系统

监控系统是保障光伏电站安全、高效运行的神经中枢，其功能涵盖实时监测、故障诊断与远程控制。系统通过传感器与数据采集模块，对光伏组件、逆变器、汇流箱及环境参数进行全范围监测，包括电流、电压、功率、温度及光照强度等。通信协议选择直接影响系统兼容性与扩展性，目前主流协议包括Modbus、IEC61850及TCP/IP等。集中式监控平台可整合多电站数据，实现统一调度与运维管理；分布式系统则更适合地理分散的项目，通过边缘计算减少数据传输延迟。高级监控系统还可集成人工智能算法，预测发电趋势，优化运维策略，提升电站整体收益率。

2 电气设计关键点

2.1 电气主接线设计

电气主接线设计需综合考虑光伏电站规模、接入电网方式及运行可靠性要求。主接线形式的选择直接影响系统的供电可靠性、灵活性与经济性。对于小型分布式光伏电站，单母线接线因其结构简单、投资成本低而被广泛采用，但其缺点在于母线故障会导致全站停电，需通过配置备用电源或快速切换装置提升可靠性^[2]。中型电站常采用单母线分段接线，通过分段断路器隔离故障区域，缩小停电范围，同时保留较大的扩展空间。大型集中式光伏电站则多采用双母线接线或3/2接线形式，双母线接线通过母联断路器实现母线切换，提升供电连续性，但设备数量多、投资较高；3/2接线在母线与断路器之间形成多重通路，具有极高的故障容错能力，适合对供电可靠性要求极高的场景。设计中还需考虑未来扩容需求，预留断路器与隔离开关的安装空间，避免因规模扩大导致接线重构。

2.2 设备选型与配置

设备选型需以光伏电站的发电容量、环境条件及运行需求为基础。逆变器需根据组件总功率、直流侧电压范围及电网接入要求确定容量与拓扑结构，集中式逆变器需配置大容量直流汇流柜与交流配电柜，组串式逆变器则需注重单机效率与通信接口兼容性。升压变压器需结合电站总装机容量、并网电压等级及短路容量进行选型，干式变压器适用于防火要求高的场景，油浸式变压器则需配置油温监测与灭火装置。配电装置需满足短路电流耐受能力与绝缘配合要求，高压开关柜需配置真空断路器或SF₆断路器，低压开关柜需采用模块化设计便于维护。所有设备需通过型式试验验证其长期运行的稳定性，外壳防护等级需达到IP54以上，以应对风沙、盐雾等恶劣

环境。设备的兼容性设计需考虑通信协议统一性，如采用ModbusTCP或IEC61850标准，便于监控系统集成。

2.3 短路电流计算与设备校验

短路电流计算是电气设计的核心环节，其准确性直接影响设备选型与保护配置的合理性。计算需基于电站接入点的电网短路容量、变压器阻抗参数及线路阻抗值，采用等效电路法或仿真软件模拟三相短路、两相短路及单相接地短路工况。计算结果需明确最大短路电流值与冲击电流峰值，作为断路器开断容量、母线热稳定与动稳定校验的依据。断路器需满足额定短路开断电流大于计算值的1.2倍，母线需通过热稳定电流密度校验，确保在短路持续时间内温升不超过允许值。电缆截面需根据短路电流产生的电动力效应与热效应进行双重校验，避免因短路冲击导致绝缘损坏或机械变形。

2.4 防雷与接地设计

光伏电站防雷设计需构建多级防护体系，防止直击雷与感应雷对设备的损害。直击雷防护通过安装避雷针或避雷带实现，避雷针保护范围需覆盖组件阵列与升压站，接地引下线需采用热镀锌扁钢或铜排，沿支架与建筑物结构柱敷设，确保雷电流快速泄放。感应雷防护需在汇流箱、逆变器及配电柜内安装浪涌保护器（SPD），SPD的电压保护水平需低于设备耐压值，响应时间小于25纳秒^[3]。接地系统是防雷设计的关键，接地电阻值需小于4欧姆，高土壤电阻率地区可通过增设接地极、铺设降阻剂或采用深井接地技术降低电阻。接地网需采用环形布置，水平接地极采用扁钢，垂直接地极采用角钢或钢管，间距需大于接地极长度的2倍以避免屏蔽效应。

2.5 电缆选型与敷设

电缆选型需综合考虑电流载荷、电压降、敷设环境及防火要求。载流量计算需考虑环境温度、敷设方式及并列敷设根数，直埋电缆需乘以土壤热阻系数校正，电缆沟敷设需预留散热空间。电压降校验需确保线路末端电压偏差不超过额定值的5%，长距离输电线路需增大电缆截面或提高电压等级。电缆类型需根据敷设环境选择，直埋电缆需采用铠装聚乙烯护套，防鼠咬与防潮；水下电缆需增加铅护套与加强层，承受水压与机械拉力。防火设计需在电缆密集区域设置防火隔板或涂刷防火涂料，重要回路电缆需采用耐火型或阻燃型材料。敷设时需避免电缆机械损伤，转弯半径需大于电缆外径的15倍，固定间距需小于1.5米，桥架内电缆需分层布置，控制电缆与电力电缆分层隔离，减少电磁干扰。

2.6 无功补偿与电能质量

光伏电站的无功需求随光照强度与负载变化呈现波

动特性,需配置动态无功补偿装置维持并网点电压稳定。无功补偿容量需根据电站额定容量、功率因数要求及电网接入点电压波动范围确定,静止无功发生器(SVG)因其响应速度快、调节精度高,适合光伏电站应用场景。电能质量治理需针对谐波、电压闪变及三相不平衡问题,安装有源滤波器(APF)消除高次谐波,电压波动率需控制在 $\pm 5\%$ 以内。升压变压器需配置分接头调节装置,根据电网电压变化自动调整档位,补偿线路阻抗压降。监控系统需实时监测电压偏差、频率偏差及谐波含量,触发保护动作或调节补偿装置投切策略,确保电能质量符合GB/T12325-2008与GB/T14549-1993标准要求。

3 电气系统保护与控制

3.1 保护配置

光伏电站电气系统保护需覆盖直流侧、交流侧及并网环节,构建多层次防护体系。过流保护作为核心保护类型,覆盖直流与交流全回路。直流侧过流保护针对组串短路或汇流箱过载,采用熔断器或直流断路器分级保护,熔断器动作时间与电缆载流量特性精准匹配。交流侧过流保护设于逆变器输出端与升压变压器之间,通过反时限过流继电器快速切断故障回路,其动作时间与上级断路器形成级差配合。过压保护由直流侧MOV与交流侧避雷器构成,残压值需低于设备绝缘耐受水平^[4]。欠压保护设在并网断路器控制回路,电压低于70%额定值时触发脱扣。孤岛保护通过频率偏移与电压相位检测实现,电网失电时快速断开并网点。保护装置遵循选择性原则,上级动作时间长于下级,如汇流箱熔断器先于逆变器断路器动作。可靠性通过冗余设计与IEC60255认证保障,关键回路采用双断路器并联运行。

3.2 控制策略

光伏电站控制需实现发电效率最大化与电网稳定接入双重目标。最大功率点跟踪(MPPT)是直流侧核心控制策略,通过扰动观测法或电导增量法动态调节组串输出电压,在光照强度与温度变化条件下寻找功率峰值

点。集中式逆变器需处理多组串输入,控制算法需考虑组串失配补偿,避免因部分组串功率下降导致整体效率损失。交流侧并网控制包括电压频率控制(V/f控制)与有功无功控制(PQ控制),V/f控制在弱电网环境下稳定并网点电压,通过调节逆变器输出电压相位与幅值实现电网同步;PQ控制根据调度指令分配有功功率与无功功率,采用双闭环PI调节器,外环控制功率设定值,内环调节电流相位与幅值。控制系统稳定性需满足阶跃响应时间小于100毫秒,抗干扰能力达到IEC61000-4-30标准,避免因电网波动引发振荡。响应速度通过硬件架构优化实现,采用现场可编程逻辑控制器(FPGA)与数字信号处理器(DSP)协同计算,数据采样频率达到10kHz以上,确保毫秒级控制指令下发。通信协议需支持IEC61850标准,实现保护装置、逆变器与监控系统的高速数据交互,通信延迟低于10毫秒,保障故障情况下保护动作与控制指令的实时性。

结束语

光伏电站电气设计涉及多方面关键点,从系统组成到具体设计环节,每个步骤都关乎电站性能与安全。科学合理的设计能提升发电效率、保障运行稳定、降低运维成本。未来,随着技术进步与行业发展,电气设计需不断创新优化,以适应更高要求,推动光伏电站向更高效、更可靠、更智能方向发展。

参考文献

- [1]邓文忠.光伏电站工程在建筑项目工程中的应用研究[J].中国住宅设施,2023,(12):1-3.
- [2]刘勇平.光伏电站电气设计技术分析[J].电气技术与经济,2023,(10):143-145.
- [3]邬邦发.分布式光伏电站设计中的电气设计技术分析[J].农村电气化,2023,(09):8-11.
- [4]杨挺昂,谢建林.光伏电站电气设计研究[J].光源与照明,2023,(3):115-117.