

新能源光伏发电并网及储能技术

管彦诏 马晓霆 林 兵

中车青岛四方车辆研究所有限公司 山东 青岛 266000

摘要：在全球能源转型的大背景下，新能源光伏发电作为可持续能源的重要代表，受到广泛关注。本文剖析了光伏发电基于半导体光伏效应的技术原理，介绍了不同类型光伏电池特点及系统组成模块。阐述并网关键技术，如并网接口拓扑结构与控制策略、电能质量优化手段及并网保护机制。探讨储能系统核心关键技术，包括电池管理系统架构与算法、能量管理系统智能调度及储能系统集成技术。最后研究光伏-储能系统协同运行机制，涵盖拓扑结构、协同控制策略与能量管理系统设计，为新能源发展提供技术参考。

关键词：新能源光伏发电；并网技术；储能技术

引言：光伏发电受自然条件影响大，输出功率不稳定，给并网带来诸多难题。储能技术作为调节光伏发电功率、提高电能质量的有效手段，成为解决光伏发电并网问题的关键。目前，尽管光伏发电并网及储能技术取得了一定进展，但在系统效率、稳定性、经济性等方面仍面临挑战。深入研究相关技术，对于推动新能源的大规模应用、保障电网安全稳定运行具有重要的现实意义。

1 新能源光伏发电技术原理与系统组成

1.1 新能源光伏发电技术原理

新能源光伏发电基于半导体的光伏效应实现光能到电能的转换，其核心原理源于半导体物理的光电转换机制。在硅、碲化镉等半导体材料中，电子在吸收光子能量后，会挣脱原子核的束缚，形成自由电子与空穴对。当半导体材料被制成PN结时，内建电场促使电子与空穴分别向N区和P区移动，从而在PN结两端产生电势差，形成直流电输出。这一过程中，光子能量需大于半导体的禁带宽度，才能激发电子跃迁，因此不同材料的禁带宽度直接影响光伏电池的光电转换效率和光谱响应范围。当前主流的光伏电池技术可分为晶硅电池、薄膜电池与钙钛矿电池。晶硅电池凭借高稳定性和成熟的产业链占据市场主导地位，单晶硅电池转换效率可达25%以上；薄膜电池（如碲化镉、铜铟镓硒）则以轻薄、弱光性能好等优势适用于建筑一体化场景；钙钛矿电池作为新兴技术，实验室效率已突破30%，但其稳定性和寿命仍需进一步提升。

1.2 新能源光伏发电系统组成

新能源光伏发电系统由多个功能模块协同构成，实现从光能捕获到电能输送的完整流程。核心设备包括以下光伏组件、逆变器、汇流箱、监控系统及支架结构。

（1）光伏组件是能量转换的基础单元，通过串联或并联

形成光伏阵列，其输出功率与光照强度、温度及安装倾角密切相关；（2）逆变器负责将光伏组件产生的直流电转换为符合电网要求的交流电，常见的组串式逆变器适用于分布式电站，而集中式逆变器更适合大型地面电站。（3）汇流箱作为电流汇集装置，可降低直流线缆损耗，提高系统可靠性；（4）监控系统实时采集电压、电流、温度等数据，通过智能算法实现最大功率点跟踪（MPPT），确保光伏阵列始终运行于最佳发电状态。（5）支架系统通过固定组件并调节倾角，提升单位面积的发电量，其中跟踪支架可根据太阳位置自动调整角度，相比固定支架可提高15%-30%的发电量^[1]。对于并网系统，还需配置升压变压器、继电保护装置等，确保电能安全高效地并入电网。

2 光伏发电并网关键技术

2.1 并网接口与拓扑结构

光伏发电系统需通过并网接口实现与电网的电气连接，其核心设备为并网逆变器。常见的逆变器拓扑结构包括单级式和多级式，单级式逆变器直接将光伏阵列输出的直流电转换为交流电，具有效率高、成本低的优势，适用于大型地面电站；多级式逆变器则通过DC-DC升压与DC-AC逆变两级转换，能更好地适应光伏阵列电压波动，常用于分布式光伏系统。在控制策略方面，常用的有PQ控制和V/f控制。PQ控制通过调节逆变器输出的有功功率和无功功率，实现对电网的稳定功率注入；V/f控制则模拟传统同步发电机特性，维持输出电压和频率稳定，适用于离网或弱电网环境。虚拟同步发电机（VSG）技术近年来发展迅速，它通过控制逆变器模拟同步发电机的转动惯量和阻尼特性，增强光伏系统的电网支撑能力，提升系统稳定性。

2.2 并网电能质量优化

由于光伏发电的间歇性和波动性，并网时易引发电能质量问题，需采用针对性技术进行优化。谐波抑制是其中关键一环，光伏逆变器在电能转换过程中会产生谐波电流，注入电网后可能导致设备发热、继电保护误动作等问题。为解决这一问题，常采用LCL滤波器、有源电力滤波器（APF）等装置，通过滤波或补偿的方式抑制谐波。无功补偿也是保障电能质量的重要手段。当光伏系统输出功率波动时，会导致电网电压不稳定，通过配置无功补偿装置，如静止无功发生器（SVG），可实时调节无功功率，维持电压稳定。电压跌落穿越（LVRT）技术能使光伏系统在电网电压骤降时保持不脱网运行，并提供一定的无功支撑，增强电网的抗干扰能力。

2.3 并网保护与安全机制

光伏发电系统并网运行时，需建立完善的保护与安全机制，以应对各类故障和异常情况。孤岛效应是光伏并网的典型安全隐患，当电网因故障断电后，若光伏系统仍持续向局部负载供电，可能导致人员触电、设备损坏等风险。因此要采用主动或被动式孤岛检测技术，一旦检测到孤岛现象，立即切断光伏系统与负载的连接。在短路故障保护方面，由于光伏电源的输出特性与传统电源不同，故障电流较小且特性复杂，传统的继电保护装置难以有效动作。需开发适用于光伏系统的保护方案，如基于电流变化率、方向纵联保护等技术，快速准确地识别和隔离故障^[2]。同时配置防反孤岛装置、防雷击保护装置等，全方位保障光伏系统和电网的安全稳定运行。

3 储能系统核心关键技术

3.1 电池管理系统（BMS）技术架构与功能实现

电池管理系统（BMS）作为储能系统的核心控制单元，其核心功能在于保障电池安全、优化性能与延长使用寿命，通过硬件与软件协同实现全生命周期管理。硬件层面，BMS由主控单元、采样模块、均衡模块及通信模块构成。采样模块通过高精度ADC芯片实时采集电池组的电压、电流、温度等参数，部分高端BMS可实现对单体电池毫伏级电压与微安级电流的监测；均衡模块则采用主动或被动均衡技术，主动均衡通过电感或变压器转移电量，适用于高容量电池组，被动均衡通过电阻消耗多余电量，成本较低但存在能量损耗。软件层面，BMS算法决定系统的智能程度。荷电状态（SoC）与健康状态（SoH）估算为核心算法，常见的安时积分法结合卡尔曼滤波，可将SoC估算误差控制在3%以内；基于电化学模型的参数辨识算法则用于SoH预测，通过分析电池内阻、容量衰减趋势，提前预警性能衰退。此外，故障诊断与保护机制通过阈值判断与逻辑推理，在过充、过

放、过温等异常发生时，毫秒级切断主回路，防止热失控。近年来，边缘计算技术的引入使BMS具备本地数据处理能力，减少云端依赖，提升响应速度与安全性。

3.2 能量管理系统（EMS）的智能调度与优化

能量管理系统（EMS）从系统全局出发，通过数据驱动的智能调度实现储能系统经济高效运行。其核心架构包含数据采集层、分析决策层与控制执行层。数据采集层集成气象预测、电网实时电价、负荷曲线等多源信息，采用物联网（IoT）技术实现数据秒级同步；分析决策层基于模型预测控制（MPC）算法，结合蒙特卡洛模拟生成最优充放电策略，例如在光伏大发时段优先充电，电价峰谷价差超过阈值时放电套利。EMS的优化目标呈现多元化趋势。在电网侧，以提升新能源消纳为目标，通过平滑光伏出力曲线，降低功率波动对电网稳定性的影响；在用户侧，结合分时电价机制实现电费成本最小化，如工业用户可利用储能系统避开尖峰电价时段用电。

3.3 储能系统集成与多技术融合

储能系统集成技术解决不同设备间的兼容性与协同性问题，涵盖电气连接、通信协议与系统架构设计。电气集成方面，直流侧需匹配光伏阵列、储能电池与逆变器的电压电流特性，采用模块化设计便于扩容与维护；交流侧则通过变压器、断路器等设备实现与电网的安全互联，部分场景采用直流耦合架构可减少电能转换环节，提升系统效率。通信集成采用标准化协议实现设备间数据交互，常见的Modbus、CAN总线用于电池簇与BMS通信，IEC 61850协议则适用于EMS与电网的信息交互。针对多类型储能混合应用场景，如锂电池与超级电容结合，需设计分层控制架构，锂电池负责能量存储，超级电容快速响应功率波动，通过下垂控制算法实现不同储能设备的功率分配。储能系统与虚拟电厂（VPP）的融合成为新趋势，通过聚合分散的储能资源，实现需求响应、备用容量等辅助服务，提升电网灵活性^[3]。在热管理集成领域，液冷技术逐渐替代风冷，通过精确控制冷却液流量与温度，将电池组温差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内，保障电池性能一致性与安全性。

4 光伏-储能系统协同运行机制

4.1 光储联合发电系统拓扑结构

光储联合发电系统拓扑结构决定其能量传输与协同效率，主要分为集中式与分布式两类架构。集中式光储系统适用于大型地面电站，通常采用“光伏阵列+集中式逆变器+大容量储能电站”的串联模式，将光伏组件产生的直流电集中转换为交流电后，与集中配置的储能设

备在交流侧耦合。这种架构便于规模化管理与电网统一调度,但对系统抗故障能力要求较高,一旦关键设备故障,易引发大面积停机。分布式光储系统则以灵活部署见长,常见于工业园区、商业楼宇等场景。其采用“组串式逆变器+分散式储能单元”架构,每个光伏组串配备独立逆变器,储能设备就近接入直流母线或交流配电端,实现“即插即用”。这种拓扑降低了线缆损耗,提升系统冗余性,部分单元故障不影响整体运行。在耦合方式上,直流侧耦合通过DC-DC变换器直接连接光伏与储能,减少电能转换环节,适用于户用或小型离网系统;交流侧耦合则通过逆变器与公共交流母线相连,便于与电网交互,在并网型分布式项目中应用广泛。

4.2 光储协同控制策略

光储协同控制策略旨在提升系统稳定性与经济性。平滑出力控制模型通过动态调节储能设备充放电功率,补偿光伏输出的间歇性波动。基于滑动平均法或低通滤波算法,将光伏预测功率与实际功率的差值作为储能调节指令,在分钟级时间尺度内实现功率平滑。如当光伏功率因云层遮挡骤降时,储能系统快速放电填补缺口,维持并网功率曲线稳定。峰谷套利与调峰调频优化算法则从经济与电网服务双维度出发。在峰谷电价机制下,储能系统于谷电价时段充电、峰电价时段放电,通过价差获取收益;在电网调峰场景中,根据负荷预测与电网调度指令,优先存储光伏过剩电量,在用电高峰释放以缓解供电压力。调频控制采用下垂控制策略,当电网频率偏移时,储能系统模拟传统发电机的频率-功率下垂特性,快速响应并输出有功功率,提升电网频率稳定性。多目标优化算法(如粒子群优化算法)可统筹考虑功率平滑、套利收益与电池寿命损耗,生成最优控制策略。

4.3 能量管理系统(EMS)设计

能量管理系统(EMS)其核心功能涵盖数据采集、状态估计与优化调度。数据采集模块通过物联网传感

器实时获取光伏出力、储能SOC、电网电价、负荷曲线等多维信息,采用边缘计算技术实现数据预处理,降低云端传输压力。状态估计环节利用卡尔曼滤波、加权最小二乘法等算法,对光伏功率预测误差、储能健康状态进行修正,提升系统运行参数的准确性。优化调度流程基于多目标决策模型展开。在短期调度中,结合滚动时域控制(RHC)算法,每15分钟更新一次调度计划,平衡实时功率波动;长期调度则依据天气预报与历史数据,制定次日至一周的充放电策略。基于强化学习的多目标优化策略通过构建奖励函数,将经济效益、电网稳定性、设备寿命等指标量化为奖励值,驱动储能系统在复杂环境下自主学习最优运行策略^[4]。通过深度Q网络(DQN)算法,系统可适应多变的电价与光照条件,动态调整充放电时序,实现收益最大化与寿命损耗最小化的平衡。

结束语:新能源光伏发电并网及储能技术是推动能源变革的关键力量。本文系统阐述了光伏发电技术原理、并网关键技术、储能系统核心关键技术以及光伏-储能系统协同运行机制。随着技术的持续创新,光伏发电并网及储能系统将在提高能源利用效率、增强电网稳定性等方面发挥更大作用。应加强产学研合作,突破关键技术瓶颈,优化系统设计与运行策略,推动新能源光伏发电并网及储能技术的商业化应用。

参考文献

- [1]陈伟.新时期新能源并网及储能技术探析[J].电力设备管理,2024(22):168-170.
- [2]刘洋洋.新时期新能源并网及储能技术研究[J].电工技术,2024(z1):375-377.
- [3]马丽,庞秀岚,付少杰,等.并网光伏发电系统配置储能技术选型研究[J].机电信息,2023(1):82-85.
- [4]刘鹏.储能技术在光伏并网发电系统中的应用研究[J].百科论坛电子杂志,2023(18):4-6.