光伏与厂用电高效集成技术研究

张马将　张　锋　靳永斌　刘　俊　严　捷
湖北能源集团襄阳宜城发电有限公司　湖北　襄阳　441400

摘　要：随着分布式光伏在工业厂区的规模化推广，光伏与厂用电系统的耦合集成成为工业节能降碳领域的重要研究方向。本文围绕光伏与厂用电高效集成技术展开研究，先剖析光伏发电间歇性、随机性的出力特性与厂用电高稳定、动态波动的用电需求，明确二者适配短板。重点探究电能质量控制、功率调控、储能配置及智能运维等核心集成技术，分析并网、离网、混合三种集成模式的适用场景与优劣。研究旨在平抑光伏出力波动，提升光伏就地消纳率，保障工业厂区用电稳定，为光伏厂用电集成工程应用提供技术参考。

关键词：光伏；厂用电；高效集成技术

引言：双碳目标下，分布式光伏已成为工业厂区节能降本、绿色转型的重要途径。但光伏发电具有间歇性、波动性与随机性特征，与厂用电稳定、可控的负荷需求存在明显适配矛盾，易造成电能质量波动、消纳率低等问题。为解决上述痛点，本文分析光伏出力特性与厂用电需求的匹配关系，探究电能质量控制、功率调控、储能适配及智能运维等关键技术，对比多种光伏－厂用电集成模式，为工业厂区光伏高效、安全并网运行提供技术参考与实践支撑。

1 光伏发电特性与厂用电需求分析

1.1 光伏发电特性

（1）间歇性和波动性：光伏发电输出功率高度依赖太阳辐射强度、光照时长、天气状况等外部自然条件，功率输出存在显著的间歇性与波动性。日间光伏发电功率会随太阳辐射强度实时变化产生波动，夜间、阴雨天气等无有效光照时段，光伏输出功率基本归零，无法持续稳定出力，难以直接适配厂用电持续、稳定的用电需求。（2）随机性：太阳辐射的强弱、时长变化无固定规律，具备较强随机性，导致光伏发电输出功率无法精准预测，大幅提升了光伏电源与厂用电系统整合的难度，若无配套调控措施，光伏功率的随机波动会影响厂用电系统的供电稳定性与可靠性，无法保障厂区用电平稳运行。（3）能量密度低：现阶段光伏电池光电转换效率存在局限，单位面积光伏板的发电量有限，能量产出密度较低。为匹配厂区正常生产运行的用电负荷，需铺设大规模、大面积的光伏组件，不仅大幅增加光伏配套项目的设备投资成本，还会占用大量场地资源，提升项目落地与运维成本。

1.2 厂用电需求特点

一是供电稳定性要求高，工业企业生产作业具备连续性特征，生产设备、生产线的正常运行依托持续平稳的电力供给，短暂停电、电压波动等供电异常情况，均会造成设备故障损坏、生产工序中断、产品质量不达标等问题，直接引发企业经济损失，因此厂用电对供电稳定水平有着严格要求。二是用电负荷波动幅度较大，各类工业企业的生产模式存在差异，多数企业用电负荷不固定，部分企业生产具备周期性特征，不同生产时段的用电负荷差距明显，还有部分企业会依据市场供需情况、生产任务计划调整生产规模，直接导致厂用电负荷产生动态浮动，整体负荷波动特征显著[1]。三是有明确的功率因数管控要求，厂用电系统中存在大量电动机等感性用电负载，这类设备运行过程中会直接拉低电力系统功率因数，增加无功功率损耗，降低电力系统运行效率，为保障供电系统高效、经济运行，厂用电运行过程中需严格把控功率因数，一般需配套安装无功补偿装置完成功率因数优化调整。

1.3 光伏发电与厂用电的匹配性分析

光伏发电受光照强度、天气变化、昼夜更替等自然条件限制，整体具备显著的间歇性、波动性与随机性特征，发电出力无法保持持续稳定输出，难以自主调控发电功率。而工业厂用电依托连续化生产作业，对供电稳定性、运行可靠性和功率因数指标均有严格标准，要求电力供应平稳可控、负荷适配性强，能够持续满足生产设备运行需求，规避供电波动引发的生产故障与经济损失。由此可见，光伏发电的出力特性与厂用电的供电需求之间存在明显的不匹配问题，也是光伏系统接入厂用

电系统的核心制约因素。光伏出力的动态波动，极易造成厂用电系统电压、频率偏移，影响供电质量，同时无功功率失衡还会降低系统运行效率，制约光伏发电的就地消纳。为充分发挥分布式光伏的节能降本优势，实现光伏发电与厂用电系统的安全、高效集成应用，弥补二者的适配短板，需针对性采用储能调节、无功补偿、功率优化控制等专业技术措施，平抑光伏出力波动，协调光伏出力与厂用电负荷的动态匹配关系，提升电网供电稳定性与电能质量，有效提高光伏发电在厂用电系统中的就地消纳比例，保障光伏供电模式下工业生产的平稳有序开展。

2 光伏与厂用电高效集成的关键技术研究

2.1 电能质量控制技术

（1）电压调节技术：光伏发电输出功率具有随机性、波动性，易造成并网点电压波动，干扰厂用电设备正常工作，工程中可通过无功补偿装置、有载调压变压器实现电压精准调控，其中静止无功补偿器（SVC）可依据系统电压实时变化，自动调整无功功率输出，响应速度快、控制精度高，能够有效稳定并网点电压，将电压数值维持在标准允许区间，提升电力系统运行稳定性。（2）谐波抑制技术：光伏系统配套的各类电力电子设备运行时会产生谐波电流，谐波注入厂用电系统后会引发电压、电流畸变，降低电能质量，目前主流抑制设备分为无源滤波器与有源滤波器，前者结构简单、性价比高，适配基础滤波场景，但滤波效果易受系统参数干扰，后者动态补偿能力突出、滤波效果优异，可适配复杂工况，实际应用中可结合项目工况、成本预算择优选用[2]。（3）频率调节技术：光伏发电功率与厂用电负荷失衡时会引发系统频率波动，可依托储能装置完成频率调节，在光伏出力过剩时储存多余电能，光伏出力不足时释放储能电能填补负荷缺口，有效平衡供需功率，持续维持电力系统频率稳定。

2.2 功率控制技术

一是最大功率点跟踪（MPPT）技术，光伏电池输出功率受太阳辐射强度、环境温度影响动态变化，且存在唯一最大功率点，该技术可实时追踪光伏电池的最大功率点，让光伏系统始终保持最大化功率输出，有效提升光伏发电利用效率，工程中常用的算法主要为扰动观察法、电导增量法等。二是功率预测技术，尤其是光伏与厂用电高效融合的关键技术，通过分析历史气象与光伏功率运行数据构建预测模型，可提前预判光伏输出功率，为厂用电调度优化提供数据支撑，该技术分为物理模型法和统计模型法，其中物理模型法依托辐射物理过程预测、精度高但运算复杂，统计模型法基于历史数据统计分析、计算简便但预测精度偏低。三是功率协调控制技术，主要用于统筹调控光伏、储能装置与厂用电负荷的功率匹配关系，多采用分层控制策略，上层依据功率预测结果和负荷需求制定整体调度方案，下层接收指令完成各设备实时调控，保障系统全程维持功率平衡，实现整体优化运行。

2.3 储能技术

第一，储能类型选择需结合场景需求精准选型，当前主流储能方式包含电池储能、超级电容储能、飞轮储能三类，其中电池储能技术成熟、能量密度高，包含铅酸电池、锂离子电池等品类，是目前工程中应用最广泛的储能形式，超级电容储能充放电速度快、功率密度突出，可适配短时间、高功率的储能工况，飞轮储能寿命长、运行效率高且无污染，仅存在能量密度偏低的短板，实际应用中需依据系统运行特点匹配最优储能类型。第二，储能容量配置直接决定系统运行性能与经济效益，储能容量偏小无法有效消纳光伏发电的间歇性、波动性问题，难以保障厂用电稳定供给，而容量过大会大幅增加项目投资成本与场地占用面积，行业中通常通过搭建数学模型，结合光伏功率特性、厂用电负荷需求、储能设备成本等多重因素，实现储能容量的科学化、最优化配置[3]。第三，储能系统控制策略是保障系统高效运行的关键，常用策略包括恒功率控制、恒流控制、下垂控制，恒功率控制可实现储能充放电功率的精准调节，恒流控制适配电流管控要求较高的运行场景，下垂控制可结合储能荷电状态与系统频率自主调节充放电功率，助力储能系统智能化、自主化稳定运行。

2.4 智能监控与运维技术

（1）数据采集与传输技术。搭建全覆盖的智能化数据采集体系，针对光伏发电系统、储能设备以及厂用电负荷设备，采集电压、电流、功率、温度等关键运行数据，实现各类设备运行数据的实时获取。系统采用有线与无线相结合的双重通信传输模式，将采集到的实时运行数据统一上传至监控中心，保障数据传输的稳定性与时效性，为整套电力系统的全面监控、精细化运维管理提供基础数据支持，保障各项管控工作有序开展。（2）故障诊断与预警技术。依托大数据和人工智能算法，对设备运行产生的海量数据进行系统化分析处理，建立标准化的设备故障诊断模型。该技术可二十四小时不间断监测设备与整体系统的运行状态，通过数据比对和算法研判，精准排查设备潜在故障问题，并自动触发预警机制。通过提前识别、预判系统运行风险，及时排查处置

故障隐患，减少设备故障引发的损耗，有效提升光伏发电及储能系统整体运行的稳定性和可靠性。（3）远程运维技术。基于网络通信技术搭建专用远程运维平台，打破现场作业限制。运维人员可通过监控中心后台，远程完成系统运行状态监测、设备参数调整、线上故障处理等常规运维工作，减少高频次现场作业。该技术能够有效简化运维流程，降低现场运维工作强度，提升整体运维工作效率，减少人力、物力等运维成本支出，优化系统运维管理模式。

3 光伏与厂用电高效集成模式分析

3.1 并网集成模式

光伏与厂用电并网集成模式主要分为完全并网和部分并网两种类型。完全并网模式下，光伏发电系统经逆变器将直流电转为交流电后，直接接入厂用电系统，与公共电网协同为厂区负荷供电，可依托电网的调节能力，有效抵消光伏发电间歇性、波动性的短板[4]。该模式电能调度灵活，光伏出力大于厂用电负荷时，多余电能可输送至电网，光伏出力不足时，可从电网购电补缺口，适配光伏装机规模大、厂用电负荷稳定的应用场景。部分并网模式将光伏系统拆分运作，一部分电能直接供给厂区负荷，另一部分经逆变器并入电网，能够结合实时光伏出力与厂用电负荷波动，动态调整自发自用与并网送电比例，大幅提升光伏就地消纳效率，降低厂区用电对公共电网的依赖，更适配光伏规模适中、厂用电负荷存在周期性波动的工业厂区场景。

3.2 离网集成模式

离网集成模式是光伏发电系统独立运行的供电模式，系统全程不接入公共电网，单独为厂区用电负荷提供电力支撑。该模式下光伏发电具备明显的间歇性、波动性特征，发电出力受光照、天气等自然因素影响较大，无法持续稳定供电，因此必须配套大容量储能装置，通过储能系统的储电、放电调节作用，平抑发电波动、弥补发电缺口，保障厂用电负荷持续、可靠、稳定运行。该模式主要适配无电网接入条件的偏远区域，以及对供电独立性、可靠性要求极高、无法依托公用电网供电的工业企业场景。相较于并网模式，离网集成模式整体建设成本更高，对储能配置、系统调控、运维技术的标准要求更为严苛，受成本与技术条件限制，目前该模式的实际落地场景有限，整体行业应用范围相对狭窄。

3.3 混合集成模式

混合集成模式融合了并网与离网两种光伏供电模式的核心优势，是灵活性与稳定性兼具的光伏厂用电供电模式，系统可兼顾并网运行与带储能离网运行双重工况。系统正常运行状态下，光伏发电设备与公共电网协同为厂区用电负荷供电，满足厂区日常用电需求，同时可将光伏发电产生的多余电能输送并入电网，实现光伏电能的高效充分利用。当遭遇电网故障、停电等极端供电情况时，系统可完成自主快速切换，脱离电网转为离网运行模式，依托光伏发电配套的储能装置联合供电，持续为厂用电负荷输送电力，有效规避断电问题，保障工业生产用电的连续性与稳定性[5]。该模式完美适配高供电可靠性需求的工业场景，既能最大化挖掘光伏发电的利用价值，又能规避单一并网、离网模式的应用短板，综合应用优势突出，适配多数高品质工业用电场景。

结语

综上所述，光伏出力的波动、随机特性与工业厂用电稳定可控的负荷需求存在天然适配矛盾，制约了光伏就地高效消纳与厂区安全供电。依托电能质量调控、智能功率控制、储能适配及智能运维等核心技术，可有效平抑光伏出力波动、平衡系统功率、优化电能质量。同时，差异化的并网、离网、混合集成模式，可适配不同厂区用电场景。通过技术与模式协同优化，能有效破解光伏厂用电集成痛点，为工业厂区光伏高效、稳定、经济并网运行提供可靠技术支撑。

参考文献

[1] 韩存启. 光伏发电与储能系统集成技术研究 [J]. 通信电源技术,2026,43(3):76-78.

[2] 李奥. 集成光伏发电功率预测技术研究 [J]. 电力设备管理,2024,(15):114-116

[3] 张叶峰. 光伏逆变器高效能量转换控制技术的应用 [J]. 光源与照明,2025,(9):227-229.

[4] 段磊. 厂用电系统接地故障快速定位与防范技术探讨 [J]. 电工技术,2026(5):62-64.

[5] 陈高升. 保障厂用电系统设备安全运行的技术措施分析 [J]. 消费电子,2025(2):185-187.