

光伏储能联合系统的功率调度策略与经济性研究

蔚伟锋

新疆天富金阳新能源有限责任公司 新疆 石河子 832000

摘要：针对光伏发电波动性大、并网难度高及经济性不足等问题，本文构建光伏储能联合系统数学模型，设计基础与优化型功率调度策略，通过仿真验证筛选最优方案。同时，从全生命周期视角，核算系统成本与收益，设定核心经济性评价指标，结合敏感性分析识别关键影响因素并提出优化建议。研究表明，优化后的调度策略可提升系统稳定性与能源利用率，为光伏储能联合系统的工程应用与经营决策提供理论支撑。

关键词：光伏储能联合系统；功率调度策略；经济性

引言：当前新能源产业向高质量发展转型，光伏储能联合系统因能提升光伏消纳与供需互动能力，成为新型电力系统的重要组成部分。但光伏出力受光照、温度影响呈非线性波动，易冲击电网，且系统投资与运维成本较高，制约其规模化应用。本文结合行业需求与企业实际，研究功率调度策略优化路径，分析系统全生命周期经济性，破解现存难题，助力系统高效、经济、稳定运行。

1 光伏储能联合系统基础理论与模型构建

1.1 光伏储能联合系统组成与工作原理

(1) 系统核心组成部分：系统核心包括光伏发电单元（光伏组件、逆变器）、储能单元（储能电池、BMS系统）、控制单元及并网接口，分别承担能量产生、存储、调控及并网交互功能，协同实现电能的稳定供应。

(2) 系统工作流程与协同机制：光照充足时，光伏单元发电，多余电能存入储能单元；光照不足或负荷高峰时，储能放电补充出力。协同机制以“削峰填谷”为核心，平衡光伏波动，保障系统输出稳定，提升电能利用率。

1.2 光伏发电系统模型构建

(1) 光伏电池出力特性分析：光伏电池出力呈非线性，受光照、温度影响显著，基于单二极管模型分析其I-V、P-V特性，明确光照升高、温度降低时出力提升的规律，为模型构建提供依据。

(2) 光伏出力预测模型建立：基于历史光照、温度及光伏出力数据，经预处理后构建短期预测模型，兼顾精度与效率，实现光伏出力精准预判，支撑系统调度。

1.3 储能系统模型构建

(1) 储能电池选型与特性分析：选用锂电池作为储能载体，分析其充放电效率、容量衰减及循环寿命特性，确定模型核心参数，适配光伏系统运行需求。

(2) 储能系统充放电特性模型：引入充放电效率、内阻损耗

等参数，建立锂电池充放电特性模型，描述不同倍率下电池电压、电流变化规律，反映其实时运行状态。

(3) 储能系统容量配置基础模型：结合光伏出力误差与负荷波动，以成本最低、供电可靠为约束，初步确定储能系统额定容量与功率范围^[1]。

1.4 联合系统整体数学模型

(1) 系统约束条件设定：设定功率平衡、储能充放电（SOC、倍率）、并网波动三类核心约束，保障系统及电网安全稳定运行。

(2) 整体目标函数初步构建：以系统运行总成本最低为核心目标，涵盖光伏、储能相关成本及供电惩罚项，兼顾经济性与稳定性，为后续优化奠定基础。

2 光伏储能联合系统功率调度策略设计

2.1 功率调度策略设计原则与目标

(1) 调度策略核心设计原则：结合企业生产经营管理需求，调度策略设计遵循四大核心原则，保障策略科学可行、贴合企业实际。安全性原则优先控制光伏、储能及电网设备运行参数在额定范围，规避设备故障与并网风险，保障企业生产用电安全；经济性原则通过合理调度降低系统运行、能量损耗及并网成本，提升企业收益；稳定性原则重点平抑光伏出力波动，保障企业生产用电与并网功率平稳；灵活性原则适配光照、生产负荷及电网指令的动态变化，实现多场景自适应调度，提升系统适用性与企业调度管理效率。

(2) 多目标调度目标体系构建：结合设计原则与企业经营目标，构建多目标协同优化体系，兼顾生产稳定与经济效益。核心目标包括：成本最小化，涵盖储能投资运维、光伏损耗、并网交互及缺电惩罚成本；出力稳定性最大化，将光伏出力波动控制在合理阈值，降低电网冲击与企业生产风险；能源利用率最大化，减少弃光现象，充分发挥储能调峰作用；供电可靠性最大化，保障企业生产负荷高峰电能

稳定供应, 规避供电中断风险。

2.2 基础功率调度策略设计

(1) 削峰填谷调度策略: 结合企业生产负荷规律与电网峰谷电价政策, 该策略是储能系统核心, 旨在平衡负荷波动、降低购电成本与电网压力。企业负荷低谷时段(夜间、设备检修期), 若光伏有出力或电网电价低谷, 控制储能充电存储多余电能; 负荷高峰时段(生产旺季、设备满负荷运行期), 光伏出力不足时, 储能放电补充供电缺口, 实现“低谷充电、高峰放电”循环, 提升储能利用率, 降低购电支出, 缓解电网峰谷差。

(2) 平抑光伏波动调度策略: 针对光伏发电受光照影响、出力波动大的问题, 实时监测光伏出力, 设定合理波动阈值。光伏出力突增时, 储能启动充电吸收多余电能, 避免冲击电网; 出力突降时, 储能快速放电补缺口, 将总输出功率波动控制在阈值内, 保障生产用电平稳与并网合规^[2]。(3) 自发自用余电上网调度策略: 聚焦企业用电需求与收益提升, 光伏出力优先供给本地生产办公、电站运维等负荷; 出力大于本地需求时, 多余电能优先充入储能, 储能充满后余电并网获取收益; 出力不足时, 由储能放电补充, 储能电量不足则从电网购电, 实现协同调度, 兼顾用电需求与经济效益。

2.3 优化型功率调度策略设计

(1) 基于优化算法的调度策略构建: 在基础调度策略上, 引入粒子群优化算法, 结合企业生产负荷数据、运维经验及经营目标, 以调度目标体系为优化目标, 以系统功率平衡、储能充放电及并网约束为条件, 通过算法迭代寻优, 确定不同时段储能充放电功率、光伏出力分配最优方案, 相比基础策略, 进一步降低运行成本, 提升调度经济性与稳定性, 助力精细化管理。(2) 多场景自适应调度策略优化: 结合企业光照、生产负荷、电网电价及指令调整等不同场景, 优化自适应调度策略。预设典型运行场景, 建立场景识别模型, 实时识别当前运行状态, 自动匹配调度参数与控制逻辑, 实现无人干预自适应调度, 如光照骤变切换至波动平抑模式、电价高峰切换至余电上网模式, 提升策略适配性与调度效率^[3]。(3) 考虑电网互动的调度策略调整: 结合电网调度需求与并网合规要求, 设计电网互动调整机制, 实时接收电网指令, 根据电网负荷与并网要求动态调整策略。电网过载时, 减少并网功率、增加储能充电; 电网需补能时, 增加放电并网功率, 实现与配电网协同互动, 提升并网友好性, 保障合规并争取辅助服务收益。

2.4 调度策略仿真验证与对比分析

(1) 仿真平台搭建与参数设置: 采用专业仿真工

具, 结合企业实际设备参数、生产负荷数据及运维经验, 搭建光伏储能联合系统仿真平台, 模拟系统完整运行流程。设置光伏组件额定功率、储能电池参数、生产负荷曲线、电网电价及调度约束阈值等贴合实际的参数, 导入历史光照、温度及运维数据, 确保仿真结果真实可靠, 为调度策略落地优化提供平台支撑。(2) 不同调度策略仿真结果分析: 在同一仿真平台与参数下, 对3种基础调度策略与3种优化型调度策略进行仿真测试, 记录运行成本、光伏弃光率、出力波动、供电可靠性、并网合规性等指标。对比分析各策略运行差异, 明确其不同生产场景的适配性, 为策略选择提供依据。(3) 调度策略优劣评价与优选: 建立多指标评价体系, 采用层次分析法确定各指标权重, 从经济性、稳定性、灵活性、可靠性、并网友好性五维度评价策略优劣, 结合仿真结果与综合评分, 筛选出适配企业生产经营场景的最优调度策略, 为实际调度管理提供理论与技术支撑^[4]。

3 光伏储能联合系统经济性分析

3.1 经济性分析框架与评价指标

(1) 经济性分析整体框架: 结合新能源发电企业经营决策需求, 构建“成本-收益-评价-优化”的全流程经济性分析框架, 以系统全生命周期为核心视角, 涵盖系统规划、建设、运行、退役全阶段, 明确分析边界与前提假设, 精准核算全生命周期内的总成本与总收益, 通过设定的评价指标量化系统经济性, 结合敏感性分析识别关键影响因素并提出优化建议, 形成闭环分析体系, 为企业储能投资、调度策略优化等经营决策提供科学依据。(2) 核心经济性评价指标设定: 结合企业经营目标, 设定4项核心评价指标, 兼顾盈利性与可行性。一是净现值(NPV), 衡量系统全生命周期内收益与成本的现值差额, 直观反映系统盈利潜力; 二是投资回收期(PP), 计算收回初始投资所需时间, 评价投资回收效率; 三是内部收益率(IRR), 反映系统实际盈利水平, 用于对比行业基准收益率; 四是度电成本(LCOE), 核算单位发电量所需成本, 衡量系统发电经济性, 为企业不同储能配置方案、调度策略的对比提供标准。

3.2 系统成本构成分析

(1) 初始投资成本核算: 初始投资为系统前期核心支出, 占全生命周期成本60%以上, 主要涵盖光伏单元(组件、逆变器、支架等设备采装)、储能单元(电池、BMS系统、充放电装置)及配套设施(电缆、控制柜、并网接口及场地改造)三大类。依据设备单价与工程量逐项核算汇总, 其中储能单元投资占比最高。通过储能合理化配置, 可有效降低初始投资, 避免盲目投入

致成本浪费。(2)运行维护成本分析:运维成本为年度持续性支出,含设备运维(光伏清洁、储能巡检、逆变器维护)、人工(运维薪酬、技术服务)、耗材更换及管理成本。按年度核算,年均约为初始投资的2%-3%,且随运行年限略有上升。科学调度与合理储能配置,能减少设备损耗,降低运维成本。(3)储能系统损耗成本计算:损耗成本为储能单元核心隐性成本,源于充放电过程,包括电能损耗(按充放电量与损耗率核算)与容量衰减损耗(按衰减比例与电池单价核算)。结合充放电频率、运行年限,量化全生命周期损耗总成本。优化储能容量配置与调度策略,可有效降低损耗,提升企业经济性^[5]。

3.3 系统收益构成分析

(1)发电收益与上网收益核算:是系统核心收益来源,分为自发自用收益与上网收益。自发自用收益按企业本地用电电价、自发自用电量核算,可有效规避企业购电成本;上网收益按当地脱硫煤标杆电价或新能源上网电价,结合余电上网电量核算,储能的合理化配置可提升自发自用率与余电上网量,进一步增加发电总收益。(2)辅助服务收益(调频、调峰)分析:储能单元响应速度快,可灵活为电网提供调频、调峰服务,获取辅助服务报酬,根据电网辅助服务补偿政策,按系统调频容量、调峰幅度核算,这部分收益可有效提升系统盈利水平,占总收益的15%-25%,合理的储能配置可提升辅助服务能力,拓展企业收益渠道。(3)政策补贴收益与节支收益计算:政策补贴收益按当地新能源产业补贴标准核算(如光伏度电补贴、储能投资补贴);节支收益包括规避电网峰谷电价差的购电节支、减少弃光的电量节支及延缓电网扩容的间接节支,储能的合理化配置可进一步提升节支收益,增强系统经济性。

3.4 经济性评价与敏感性分析

(1)基于净现值(NPV)的经济性评价:以净现值(NPV)为核心评价指标,结合投资回收期、内部收益率,代入全生命周期成本与收益数据,计算各项评价指标数值。若 $NPV > 0$ 、IRR高于行业基准收益率,说明

系统具备经济可行性;反之则需优化调整,同时对比不同储能容量配置方案的经济性,筛选出成本最低、收益最优的储能配置方案,为企业储能投资决策提供依据。

(2)关键参数敏感性分析:选取影响系统经济性的4项关键参数(初始投资成本、光照强度、上网电价、储能充放电效率),采用单因素分析法,分别调整各参数 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$,观察NPV、IRR的变化幅度,识别对经济性影响最显著的参数,其中储能容量配置与充放电效率对经济性影响尤为突出,为企业风险防控、储能配置优化提供支撑。(3)经济性优化建议:结合敏感性分析结果,提出针对性优化建议:优化设备选型降低初始投资;重点优化储能合理化配置,平衡储能成本与收益,同时提升系统并网友好性;积极争取政策补贴,拓展辅助服务收益渠道;优化调度策略提升自发自用率与上网收益,减少储能损耗,全面提升企业全生命周期经济效益,助力企业实现高质量生产经营。

结束语

本文完成了光伏储能联合系统功率调度策略设计与经济性分析,明确了基础与优化型调度策略的适配场景,验证了优化策略的可行性与优越性,量化了影响系统经济性的关键因素并提出优化建议。研究存在一定局限,未来可结合构网型储能技术、智能算法提升调度精度与经济性,拓展多场景适配性,为系统规模化、市场化发展提供更全面支撑。

参考文献

- [1]龚彪.光伏—储能系统在微电网中的协同运行策略[J].电力设备管理,2025,(11):100-102.
- [2]詹杰.光伏发电与储能系统协同的电力调度策略分析[J].电子技术,2024,53(09):372-373.
- [3]朱烨欢,张凯东.光伏并网储能空调系统协同运行机制优化研究[J].电力设备管理,2024,(15):99-101.
- [4]孙亚娟,焦镜泽.户用分布式光伏-储能系统经济性分析[J].农村电气化,2022,(07):75-78.
- [5]刘建国,周丽.光伏储能系统的智能调度与优化控制研究[J].智能电网,2024,36(2):101-107.