

式中, $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 分别为储能充电功率和放电功率; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为充放电效率; E_{rated} 为储能系统额定容量; Δt 为调度时间步长。通过对 SOC 取值范围和充放电功率进行约束, 可保证储能系统运行的工程安全性与稳定性 [2]。

1.3 能量流分配与运行特性

光伏工程智慧能源系统中, 能量流在光伏单元、储能系统及负载/并网接口之间按照既定调度逻辑进行分配。系统运行时, 光伏出力优先满足负载需求, 当光伏出力与负载不匹配时, 由储能系统参与调节以维持功率平衡。在光伏出力富余工况下, 储能系统吸纳多余电能并进行充电; 在光伏出力不足或负载增加时, 储能系统通过放电补偿功率缺口, 从而降低出力波动对系统运行的影响 [3]。不同运行工况下的能量流向及其切换关系如图 2 所示。



Fig. 2 Energy Flow and Operation Modes of PV-ESS System

图 2 光伏—储能系统能量流与运行模式示意图

2 光伏工程智慧能源系统优化运行方法

2.1 光伏出力预测与波动抑制

光伏出力受辐照强度与环境条件影响显著, 具有随机性和波动性。为刻画光伏出力的变化特征, 采用时间序列预测方法对光伏出力进行建模, 得到时刻 t 的预测值 $\hat{P}_{pv}(t)$ 。光伏出力预测误差定义如式 (3) 所示, 用于衡量预测结果与实际出力之间的偏差:

$$e(t) = P_{pv}(t) - \hat{P}_{pv}(t) \quad (3)$$

在此基础上, 引入光伏出力波动抑制指标, 对一定时间窗口内的出力偏离程度进行定量描述, 其表达式如式 (4) 所示:

$$J_{pv} = \sum_{t=1}^T (P_{pv}(t) - \bar{P}_{pv})^2 \quad (4)$$

式中, $\bar{P}_{pv}$ 为时间窗口内光伏平均出力。通过预测结果与波动指标的综合分析, 可有效反映光伏出力的波动特性。

光伏实际出力与预测出力的对比结果如图 3 所示, 验证了预测模型对出力变化趋势的刻画能力 [4]。

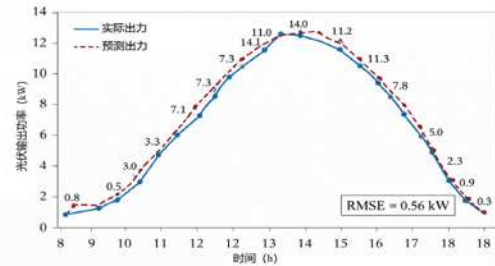


图 3 光伏实际出力与预测出力对比曲线

2.2 储能充放电优化控制

为充分发挥储能系统在不抑光伏出力波动和稳定系统运行中的调节作用, 构建以系统运行平稳性和储能状态安全性为目标的充放电优化控制模型。储能控制目标函数如式 (5) 所示, 通过综合考虑并网功率波动和储能荷电状态偏差, 实现储能充放电行为的优化调节:

$$\min J_{ess} = \sum_{t=1}^T [\lambda_1 P_{grid}^2(t) + \lambda_2 (SOC(t) - SOC_{ref})^2] \quad (5)$$

式中, $P_{grid}(t)$ 为并网功率, SOC_{ref} 为参考荷电状态, λ_1 和 λ_2 为权重系数。

在控制过程中需满足系统功率平衡约束, 其表达式如式 (6) 所示:

$$P_{pv}(t) + P_{ess}(t) = P_{load}(t) + P_{grid}(t) \quad (6)$$

同时, 储能充放电功率受额定能力限制, 其约束条件为:

$$-P_{dis}^{max} \leq P_{ess}(t) \leq P_{ch}^{max} \quad (7)$$

通过在上述目标函数和约束条件下对储能充放电功率进行优化求解, 可实现储能系统的合理调度与稳定运行 [5]。

2.3 光伏—储能协同运行策略

在光伏出力预测与储能优化控制的基础上, 构建光伏—储能协同运行策略, 实现系统层面的综合优化。该策略以光伏出力变化特性为输入, 统筹储能充放电调节过程, 在满足功率平衡与运行约束的前提下, 协调光伏与储能的动态响应关系。为量化协同运行效果, 引入系统综合性能指标, 其表达式如式 (8) 所示:

$$J_{sys} = w_1 J_{pv} + w_2 J_{ess} \quad (8)$$

式中, J_{pv} 为光伏出力波动抑制指标, J_{ess} 为储能优化控制目标函数, w_1 和 w_2 为权重系数。通过对综合指标进行优化, 可在系统层面实现光伏出力平稳性与储能运行安全性的

协调统一。

3 仿真与实验验证

3.1 仿真模型构建与参数设置

为验证所提出光伏—储能系统优化运行方法的有效性,构建光伏工程智慧能源系统仿真模型。仿真模型包括光伏发电单元、储能系统、负载及并网接口等模块,光伏出力模型与储能 SOC 状态方程按前述模型进行设置。根据典型光伏工程运行条件,选取辐照强度、储能容量、充放电效率及负载功率等关键参数,并统一时间步长以保证仿真精度。参数取值参考工程常用范围,能够较为真实地反映系统运行特性,为后续优化运行效果分析提供可靠的仿真基础。

3.2 优化运行效果分析

为定量评估预测—控制—协同策略的综合效果,在相同辐照与负载工况下,对系统优化前后的运行状态进行对比分析。系统关键运行量的动态变化过程如图 4 所示,可以直观反映优化策略对功率波动的抑制作用。

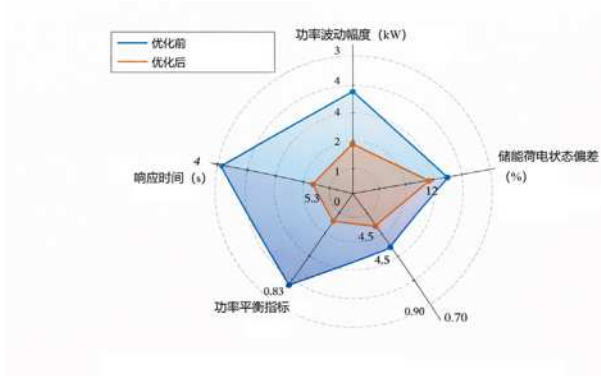


图 4 优化前后系统运行效果对比图

在此基础上,进一步选取波动率、并网峰值偏差、SOC 范围、 J_{sys} 及储能利用率等指标进行统计对比,相关结果汇总见表 1。

表 1 优化前后光伏—储能系统运行性能对比

性能指标	未采用优化策略	采用优化策略	变化情况
光伏出力波动率 / %	18.6	9.4	↓ 49.5%
并网功率峰值偏差 / kW	12.3	7.1	↓ 42.3%
储能 SOC 变化范围 / %	32 - 78	40 - 65	明显收敛
系统综合性能指标 (J_{sys})	1.00	0.63	↓ 37.0%
储能等效利用率 / %	68.4	81.2	↑ 18.7%

由表 1 可见,光伏出力波动率由 18.6% 降至 9.4%,并网功率峰值偏差由 12.3 kW 降低至 7.1 kW,说明储能系统能够有效吸收光伏出力扰动并平滑功率输出。同时, SOC 运行

区间由 32 - 78% 收敛至 40 - 65%, 综合性能指标 J_{sys} 降至 0.63, 表明协同运行策略在提升系统稳定性的同时兼顾了储能运行安全性, 实现了系统整体性能的优化。

4 结论

围绕光伏工程智慧能源系统的运行特性与优化需求,系统构建了光伏—储能运行模型与协同优化方法,并通过仿真与实验验证了其在抑制出力波动、改善功率平衡和提升储能运行稳定性方面的有效性。研究表明,基于预测与优化控制的协同运行机制能够实现系统性能的整体提升。后续工作可结合多时间尺度调度与复杂工况约束,进一步拓展模型的工程适用性与运行鲁棒性。

参考文献:

- [1] 柯飞. 新能源风电和光伏工程中的储能技术应用 [J]. 科技视界, 2025, 15(27): 42-45.
- [2] 李蒲健, 杨党锋, 黄勇, 等. 基于 AI 驱动的海上光伏工程智能化设计创新路径研究 [J]. 西北水电, 2025, (04): 130-133.
- [3] 朱成坤. 光伏工程项目电气设备安装与调试技术研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (14): 240-242.
- [4] 宋玮明. 光伏新能源系统效率优化工程技术研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (11): 157-159.
- [5] 韩星. 双碳政策下的智慧城市能源管理与调控 [J]. 科技与金融, 2022, (Z1): 23-28.