

光伏-储能混合系统的容量配置与调度优化

李 凯

陕西轩邑特种建设工程有限公司 陕西 西安 710061

摘 要：光伏发电的间歇性与波动性是其大规模并网应用的主要制约因素，储能系统的引入构成光伏-储能混合系统，能够有效平滑出力波动、提升电能质量和增加光伏消纳能力。容量配置与调度优化是混合系统经济性与可靠性协同最优的核心问题，二者在时间尺度和目标函数上存在紧密耦合。本文从光伏-储能混合系统的基本结构出发，深入分析容量配置与调度优化的内在关联机制，揭示单向顺序决策的局限性以及双向耦合优化的必要性。在此基础上，分别从容量配置层面的经济性建模与约束条件、调度优化层面的多时间尺度策略及其对容量利用效率的反作用展开分析，并提出两阶段协同优化与鲁棒优化应对不确定性的方法路径。研究表明，容量配置与调度优化应纳入统一框架联合考量，以资源充裕性与运行灵活性之间的均衡为目标，实现混合系统全生命周期综合效益最大化。

关键词：光伏发电；储能系统；容量配置；调度优化；协同优化；鲁棒优化

引言

全球能源转型下，光伏发电清洁但受气象影响，出力呈“鸭形曲线”，加剧电网调峰压力。储能通过双向充放电提升系统灵活性。光伏与储能的容量配置决定发电潜力与调节能力，调度策略则响应波动与需求。二者双向耦合：配置为调度提供硬件边界，调度影响配置经济性。独立优化无法实现整体最优，必须统筹协调。国内外现有研究围绕光储容量配置与调度优化分别展开：前者侧重全生命周期经济性及其可靠性约束下的最优容量求解，后者聚焦多时间尺度预测与滚动优化算法。但多数工作将二者独立处理，配置方案常基于典型日或固定规则评估，未能反映调度策略对储能寿命及收益的反向影响，且缺乏对长期辐照不确定性的统一刻画。为此，本文先剖析二者耦合机理，再分别阐述建模方法与策略体系，最后提出两阶段协同优化及鲁棒优化路径，为系统整体最优设计提供参考。

1 光伏-储能混合系统的基本架构与运行模式

1.1 系统的基本结构与能量流

光伏-储能混合系统的基本架构由光伏阵列、储能单元、PCS及能量管理系统（EMS）构成。光伏阵列将太阳能转换为直流电能，通过逆变器转换为交流电供给负荷或馈入电网；储能系统（通常为锂离子电池或磷酸铁锂电池）通过双向DC/DC变换器与直流母线连接，在充电和放电两种模式间切换。EMS负责根据光伏出力预测、负荷需求、储能荷电状态（SOC）及电价信号，实时决策储能充放电功率和并网功率，是整个系统的决策核心。

1.2 典型运行模式

根据应用场景的不同，光伏-储能混合系统可运行于多种模式。在并网模式下，系统与主电网连接，光伏电力优先供给本地负荷，富余部分可存入储能或向电网售电，不足部分从电网购入，储能主要参与峰谷套利和光伏平滑。在离网模式下，系统独立运行，储能承担功率平衡主调节器的角色，在光伏出力低于负荷时放电补足，在光伏出力高于负荷时充电吸收，维持系统频率和电压的稳定。在并网且限电模式下，当电网无法全额消纳光伏出力时，储能将本应弃光的部分电力储存，待电网允许时再释放，以提升光伏利用率。

1.3 储能的功能定位

储能在混合系统中的功能定位决定了容量配置的侧重点和调度策略的取向。功能定位可概括为三个层次：平滑波动——在分钟级或小时级时间尺度上，补偿光伏出力的快速波动，改善电能质量；移峰填谷——在日级时间尺度上，将光伏午间过剩电量转移至早晚用电高峰，实现负荷跟踪；备用应急——在电网故障或极端气象条件下，提供应急电力保障^[1]。不同功能定位对储能功率容量（决定瞬态响应能力）和能量容量（决定持续供电时间）的需求配比差异显著，功率型应用侧重功率容量，能量型应用侧重能量容量。

2 容量配置与调度优化的内在关联

2.1 分离优化的逻辑与局限

在工程实践中，容量配置往往在项目建设前期完成，而调度策略则在系统投运后根据实际运行条件持续优化。这种“先配置、后调度”的分离模式在逻辑上存

在固有缺陷。其一，配置阶段确定的光伏容量和储能容量，是调度优化可行域的硬边界，若容量配置未能充分考虑调度策略的灵活性需求，可能导致无论调度算法多精妙，系统整体效能均无法达到最优。其二，调度策略的运行效果（如年利用小时数、储能循环寿命损耗、年收益）是容量方案经济性评价的核心输入，而分离优化中配置阶段对调度效果的预估往往是粗略的或基于固定规则，无法反映优化调度所能带来的真实收益。这种双向信息的“单向传递”决定了分离模式只能获得次优解而非全局最优解。

2.2 配置对调度的约束与赋能关系

容量配置决定了系统在物理层面的运行边界。光伏装机容量决定了最大发电功率和年发电量潜力，储能功率容量决定了最大充放电速率（即瞬态调节能力），储能能量容量决定了持续充放电时长（即能量转移能力）。调度策略从本质上是在这些物理边界和运行约束（SOC 上下限、充放电效率、功率限幅）所构成的多维可行域内，寻找满足目标函数的最优控制序列^[2]。更大的容量可拓展可行域、赋能更优调度，但需以更高的初始投资为代价。容量配置与调度优化之间的经济关系，本质上是在“投资成本”与“运行效益”之间进行跨时间尺度的最优均衡。

2.3 调度对配置经济性的反作用

调度策略通过影响储能循环深度、充放电次数和平均 SOC 水平，直接决定储能电池的寿命衰减速率。频繁的深度充放电会加速电池容量衰减，缩短更换周期，显著提高全生命周期成本；而合理的调度策略通过优化充放电深度和频次管理，可有效延长储能寿命，提升项目的经济性。这意味着在容量配置决策中，若不考虑调度策略对电池寿命的影响，将严重高估或低估储能的实际经济寿命，导致配置方案偏离最优区间。

3 容量配置优化

3.1 目标函数与经济性建模

容量配置的核心目标是确定光伏装机容量 P_{PV} 和储能额定容量（功率 P_B 、能量 E_B ）的最优组合，使得项目的全生命周期净收益最大化或平准化度电成本（LCOE）最小化。目标函数可概括为系统在全生命周期内的收益减去成本。在并网场景下，收益主要包括光伏发电收益（自用节省电费和余电上网收入）和储能参与峰谷套利或辅助服务收益；在离网场景下，收益还包括替代柴油发电等替代效益。成本包括光伏系统和储能系统的初始投资成本、运行维护成本及储能电池的置换

成本，其中储能的置换次数取决于循环寿命与调度策略下的实际充放电深度和频次。

3.2 约束条件

容量配置需满足系统安全、可靠和经济运行的多方面约束。功率平衡约束要求任意时刻光伏出力、储能充放电功率与负荷需求及电网交换功率之间满足等式关系。储能运行约束包括充放电功率不超过功率容量限值、SOC 保持在上下限之间（通常为 10%~90%）、充放电能量守恒及效率约束。光伏出力约束由辐照度和温度决定，体现为时间序列上的功率上限。供电可靠性约束（在离网场景）通常表现为全年失负荷概率（LOLP）或缺电率（LPSP）不超过允许值。并网场景下还应考虑与电网协议约定的最大交换功率限制及峰谷电价时段划分。

3.3 不确定性的表征

光伏出力的不确定性是容量配置面临的本质困难。长期不确定性体现在历史辐照数据与未来实际辐照之间的偏差，涉及年度辐照总量和季节分布的随机波动；短期不确定性体现在分钟级云层遮挡导致的出力快速跌落。容量配置阶段应对不确定性的常用方法包括：基于多场景概率的随机规划，以及以最坏场景下的性能为优化目标的鲁棒优化。后者的思路是在不依赖概率分布假设的前提下，保证容量方案在任意可能的出力场景下均能满足供电可靠性约束，对数据需求较低但在经济性上趋于保守。

4 调度优化策略

4.1 多时间尺度调度框架

光伏出力和负荷需求在不同时间尺度上呈现不同的波动特征，因此调度策略需构建多时间尺度的分层框架。日前调度（小时级）基于次日光伏出力预测和负荷预测曲线，以 24 小时为优化窗口，采用动态规划或混合整数线性规划求解储能各时段的充放电功率计划，主要服务于峰谷套利和能量转移。日内滚动优化（分钟级）基于更新的超短期预测，以数小时为滚动窗口，每 15~30 分钟重新优化一次，在跟踪日前计划的同时修正预测偏差^[3]。实时控制（秒级）以百毫秒至秒级为响应周期，基于当前 SOC 和实际功率偏差，采用恒定电压控制或下垂控制即时补偿功率差额，维持系统实时功率平衡。

4.2 不同应用场景下的调度目标侧重

调度目标应根据混合系统的功能定位差异化设定。在以自发自用为主的光伏用户侧系统中，调度目标是在分时电价信号下最大化用户收益，储能的充放电时机应匹配电价峰谷时段，典型策略为“低价充电（谷段/平

段)、高价放电(峰段)”。在以平滑并网功率为目标的系统中,调度目标是 minimized 并网功率与计划值的偏差,储能的响应方向应补偿光伏出力的高频波动。在以提升光伏消纳率为目标的系统中,调度目标是在电网限电指令下最大化储能吸收的弃光电量,并在限电解除后释放。在离网孤岛系统中,调度目标是 minimized 失负荷风险,储能需时刻维持足够的备用裕度以应对光伏出力骤降,SOC 管理水平是首要考量。

4.3 基于 SOC 的分层管理策略

储能 SOC 的精细化管理是保障调度策略长期有效运行的基础。基于 SOC 的分层管理策略按 SOC 区间划分运行模式:正常区间(30%~90%)内,储能按经济性最优目标自由充放电,不受额外约束;警戒区间(15%~30%及 90%~95%)内,系统优先采取 SOC 回正措施(如浅充浅放),优先将 SOC 拉回正常区间,兼顾经济性但避免过度偏离;极限区间(<15%或>95%)内,系统启动 SOC 保护机制——过放风险时限制或禁止放电,过充风险时限制或禁止充电,以保障电池安全为首要目标,暂停经济性调度逻辑。分层管理的核心价值在于防止储能因“经济性”考量而频繁运行于极端 SOC 区间,导致电池寿命加速衰减。

5 容量配置与调度的协同优化

5.1 两阶段协同优化框架

解决容量与调度耦合问题,可行的工程化方法为两阶段协同框架。第一阶段以年为单位,采用典型日场景(如春分日、夏至日、秋分日、冬至日分别代表四季典型辐照条件)替代全年连续 8760 小时数据,构建上层容量优化模型,内嵌下层调度优化子问题——对每组候选容量方案(P_{PV}, P_B, E_B),调用日前+日内调度算法计算该容量方案下的年运行收益和电池寿命损耗,反馈至上层的净收益评估。通过迭代寻优,使上层容量决策与下层调度响应在有限场景集合内达成一致。该框架保持了容量层和调度层的相对独立,便于工程实施和计算效率优化。

5.2 鲁棒优化的应用路径

对于无法获取准确辐照概率分布的项目,可采用鲁棒优化方法应对长期不确定性。将光伏出力的不确定性描述为有界区间(如基于历史数据确定年度辐照量的上下界和季候分布波动范围),容量配置方案需保证在该区间内所有可能的出力情景下均满足供电可靠性约束,同时使“最

坏情景”下的经济性最优。鲁棒优化的结果为牺牲一定的经济性换取更高的可靠性保障,适合于离网系统或对供电可靠性要求极高的场景。在实际工程中,可在鲁棒优化结果基础上,通过敏感性分析评估不同保守程度对应的经济性损失,为决策者提供权衡参考。

5.3 动态更新与运行反馈

协同优化不应是一次性的离线活动。系统投运后,利用实时运行数据(实际辐照、实际负荷、储能实际衰减率)持续更新预测模型和老化模型参数,定期(如每季度或每年)重新执行两阶段优化,根据最新信息修正容量利用策略。当发现储能容量衰减超出预期或光伏出力特征发生显著偏移(如周边新建遮挡物)时,应触发临时重优化,评估是否需提前更换电池组或调整调度策略中 SOC 使用区间。运行反馈将容量配置与调度优化从“静态设计”推向“持续演化”,是实现全生命周期最优的内在要求。

结束语

光伏-储能混合系统的容量配置与调度优化是一个具有紧密双向耦合关系的决策问题。本文从系统基本结构与运行模式出发,深入论证了容量配置与调度优化之间的内在关联——配置为调度设定可行域,调度通过影响储能寿命和运行收益反作用于配置的经济性评价。基于这一认识,分别阐述了容量配置层面以全生命周期净收益为核心、以可靠性为约束的建模逻辑,以及调度层面多时间尺度分层优化的策略框架,并进一步提出了两阶段协同优化和鲁棒优化应对不确定性两种联合优化路径。未来研究可进一步融合数字孪生与在线学习技术,构建数据驱动与物理模型协同的动态自适应优化框架,以应对源-荷-价多重不确定性的时变演化,并拓展至多能互补系统与电力市场互动场景下的集群协同决策。

参考文献

- [1] 丁明,王伟,张宏. 光伏-储能混合系统容量优化配置方法研究综述[J]. 电力系统自动化,2022,46(16):176-186.
- [2] 康重庆,陈启鑫,刘锋. 面向高比例可再生能源的储能需求分析与配置优化[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4545-4557.
- [3] 李建林,田立亭,米增强. 锂离子电池储能系统全生命周期经济性评估模型[J]. 储能科学与技术,2024,13(4):1235-1243.