

区域光网荷储系统中的储能容量优化配置研究

——以港口为例

富张明

上海国际港务（集团）股份有限公司罗泾分公司 上海 200949

摘要：港口在全球贸易与物流中的枢纽地位，使其高密度、多类型用能特征对能源系统的经济性与可靠性提出更高要求。为应对碳排放与供电波动等挑战，本文基于“光-网-荷-储”协同运行理念，针对港口区域的负荷分布、光伏出力及分时电价机制，兼顾了经济效益与可再生能源利用率，建立了储能容量优化配置模型，并利用人工蜂群算法求解。实验结果表明，该方法可有效提升港口微电网对光伏发电的就地消纳，削减高峰购电需求，并兼顾经济性与可持续发展，为港口能源系统的绿色转型提供了可行的技术支撑与决策参考。

关键词：港口微电网；光伏发电；容量优化

引言

随着全球能源结构转型和电力体制改革的深入推进，港口作为国际物流枢纽，其能源系统的高效性与绿色低碳化已成为关注重点。传统港口能源高度依赖化石燃料，面临碳排放高、环境污染严重等问题，同时在供电可靠性与峰值负荷管理方面也承受较大压力。港区内丰富的屋顶和堆场资源为光伏发电提供了良好基础，结合储能技术与智能调度，有望构建“光-网-荷-储”协同运行的区域能源系统，实现能源就地消纳与负荷灵活调节。

近年来，微电网容量配置与优化调度已成为研究热点。已有文献在海岛、电力贫困地区、高速公路等场景下，基于成本优化、可靠性增强或能源利用率提升等目标，提出了多种建模与算法方案，如改进遗传算法、双层优化、鲁棒优化等。然而，港口作为负荷密集、作业模式复杂、负载变化剧烈的典型场景，尚缺乏针对其负荷特性、电价机制和环境约束的容量优化配置研究。

因此，本文围绕港口区域能源系统特点，构建光伏发电、储能与电网协同运行的微电网模型，设计合理的储能充放电策略，综合考虑负荷时序、光伏出力、分时电价和储能自损耗等因素，以年综合成本最小为目标，提出储能容量优化配置方法，并采用人工蜂群算法进行求解。研究旨在提升光伏消纳能力，降低峰值电价支出，增强能源系统的经济性与可持续性，为港口绿色转型提供决策支持。

1 区域光网荷储系统运行机制

区域光网荷储系统集成了分布式光伏、储能装置

与负荷侧设备，通过与大电网的能量交互实现本地能源的优化调度。针对港口负荷密集、波动性强等特点，引入光储协同系统可有效削峰填谷，提升用能效率。光伏发电受辐照强度与气象影响较大，具有波动性和间歇性，需通过储能系统稳定供电，保障运行连续性。港口用能设备类型多样、作业时段复杂，负荷呈周期性波动且短时峰值明显。通过光伏与储能的动态互补，可在不同时段实现能源协调利用，提升绿色电能就地消纳率和系统经济性。

2 储能装置容量优化配置模型

2.1 目标函数

以光网荷储系统中的储能装置容量为研究对象，构建以年综合经济成本最小化为目标的优化模型。其年综合成本 C_T 包括分布式光伏和储能系统的等年值安装成本 C_I 、年运行维护成本 C_{OP} 、与电网交互所产生的年交易费用 C_{TR} 以及分布式光伏的年发电补贴 C_{SUB} ，因此 C_T 的计算公式如下：

$$\min CT = C_I + C_{OP} + C_{TR} - C_{SUB} \quad (1)$$

分布式光伏和储能系统的等年值安装成本 C_I 的计算公式如下：

$$C_I = C_{IPV} + C_{IESS} = \frac{\gamma(1+\gamma)^{n_{PV}}}{(1+\gamma)^{n_{PV}} - 1} k_{PV}^I P_{PV} + \frac{\gamma(1+\gamma)^{n_{ESS}}}{(1+\gamma)^{n_{ESS}} - 1} (k_e^I E_{ESS} + k_p^I P_{ESS}) \quad (2)$$

式(2)中， C_{IPV} 和 C_{IESS} 分别表示分布式光伏和储能系统的等年值综合成本； γ 为贴现率； n_{PV} 和 n_{ESS} 分别为分布式光伏发电和储能系统的使用年限； k_{PV}^I 、

k_e' 和 k_p' 分别代表分布式光伏系统的单位容量投资成本、储能系统的单位容量投资成本以及单位功率的投资成本； P_{PV} 、 E_{ESS} 和 P_{ESS} 分别表示分布式光伏发电的配置功率、储能系统的容量以及储能系统的额定功率。

与电网交互所产生的年交易费用 C_{TR} 的计算公式如下：

$$C_{TR}=C_{IN}-C_{OUT}=\sum_{t=1}^T(P_{GL,t}C_{B,t}+P_{GB,t}C_{GB,t}-P_{PVG,t}C_{S,t})$$

(3)

式中， C_{IN} 为与电网的购电费用， C_{OUT} 为上网收入； $P_{GL,t}$ 和 $P_{GB,t}$ 分别为时刻 t 电网提供的负载功率和储能电池的充放电功率； $P_{PVG,t}$ 为时刻 t 电能上网的功率； $C_{B,t}$ 和 $C_{S,t}$ 分别为时刻 t 从电网购入以及向电网售出的电力单价。

分布式光伏的年发电补贴 C_{SUB} 的计算公式如下：

$$C_{SUB}=\sum_{t=1}^TI_{SUB}P_{PV,t}$$

(4)

式中， I_{SUB} 为单位发电补贴。

2.2 约束条件

2.2.1 装机容量约束

考虑到港口实际所处的地理位置及空间限制，允许安装的分布式光伏发电的装机容量具有上限，即：

$$0\leq n\leq n^{\max}$$

(5)

式中， $n^{\max}$ 表示允许安装的最大太阳能电池板数量。

2.2.2 电力负荷功率平衡约束

对任一时刻 t ，系统的电力负荷 $P_{LOAD,t}$ 由分布式光伏供电 $P_{PVL,t}$ 、电网供给负荷 $P_{GL,t}$ 和储能系统放电 $P_{BL,t}$ 三部分组成，即：

$$P_{LOAD,t}=P_{PVL,t}+P_{GL,t}+P_{BL,t}$$

(6)

2.2.3 分布式光伏发电功率平衡约束

对任一时刻 t ，分布式光伏的总出力 $P_{PV,t}$ 可被同时用于负荷供电 $P_{PVL,t}$ ，储能系统充电 $P_{PVB,t}$ ，以及向电网售电 $P_{out,t}$ 三个部分，即：

$$P_{PV,t}=P_{PVL,t}+P_{PVB,t}+P_{out,t}$$

(7)

2.2.4 储能系统电量 SOC 约束

为保证储能系统的电池寿命，荷电状态（State of Charge, SOC）应限制在一定范围内，即：

$$S_t^{\min}\leq S_t\leq S_t^{\max}$$

(8)

且在时刻 t 的 SOC 可由下式给出：

$$S_t^{\min}\leq S+\frac{\sum\frac{u_{ESS,t}P_{ESS,t}}{ESS}}{\leq S_t^{\max}}$$

(9)

式中， S_t 为储能系统在时刻 t 的荷电状态； $S_t^{\min}$ 、 $S_t^{\max}$ 分别为储能系统的下限、上限 SOC 值； S_0 为储能系统初始状态的 SOC 值。

2.2.5 储能系统充放电循环约束

在微电网运行过程中储能系统的充放电周期过于频繁，会极大缩短电池寿命。为了便于计算，不考虑容量衰减，假设储能系统每个周期的初始状态都要进行重置，其表达式为：

$$\sum_{t=1}^T\frac{u_{ESS,t}P_{ESS,t}}{\eta_e}=0$$

(10)

2.3 模型求解

本模型涉及多个非线性约束、分时电价、不同类型的负荷和不确定性因素，采用传统的线性规划或混合整数线性规划可能难以有效求解。因此，本文选择人工蜂群优化算法（Artificial Bee Colony, ABC）求解提出的模型。

3 算例分析

3.1 基础数据

为有效验证模型，本文选取上海市某件杂货码头和某集装箱码头的 35kV 配电系统作为具体算例。最大储能容量为 6000 kWh，充 / 放电效率均为 0.9，储能日成本为 0.265 元 / kWh。ABC 算法中，相关参数设置为：种群规模 population_size = 50，侦察蜂触发阈值 limit = 10，最大迭代次数 max_iterations = 500。上海市电压等级为 35kV 的一般工商业两部制分时电价如表 1

表 1 上海市工业分时电价表

时段分类	时段	电价（元 / kWh）
高峰时段	8:00 — 11:00	1.0493
	18:00 — 21:00	
平时段	6:00 — 8:00	0.6196
	11:00 — 18:00	
	21:00 — 22:00	
低谷时段	22:00 — 次日 6:00	0.2973

所示。

3.2 储能优化配置结果

通过 ABC 算法求解储能优化模型求得储能最优容量为 5640.72 kWh, 每日最小成本为 13441 元。光伏出力在白天时段(大约 6~17 时)较为显著, 最大能量贡献超过 3000kWh, 说明其在光照充足时的供电能力较强。电网供电则在 0~5 时较明显, 18~23 时与储能同时供电。有效负荷曲线反映了不同时刻的用电需求情况。整体来看, 各供电来源相互配合, 共同满足不同时段的负荷需求。在循环初期, 总成本下降较为迅速。此后, 下降趋势变缓。约 200 次循环后, 总成本再次出现明显下降, 随后趋于平稳, 表明算法逐渐收敛到一个相对稳定的总成本值。7 时以前储能电量有小幅波动。随后储能电量急剧上升。10~13 时, 电量显著上升, 在 17 时左右达到峰值, 随后开始快速下降, 至 24 时为 0kWh。储能充电主要集中在 7~15 时内, 在 7 时左右达到峰值, 超过 2500kWh。在 18~23 时, 放电量较大。整体呈现出不同时段充放电量差异较大的特点, 反映了储能系统在一天内根据不同情况进行充放电调节的状态。

4 结语

本文聚焦港口区域光网荷储系统的储能装置容量优化配置, 针对港口负荷分布、光伏出力及分时电价机制, 建立了微电网容量优化配置模型, 并利用人工

蜂群算法求解, 获得了经济成本最低的微电网储能容量配置方案。

参考文献:

- [1] 李嘉丰, 王莹, 程晓绚, 等. 基于双层优化的微电网系统光储容量配置方法 [J]. 分布式能源, 2024, 9(1): 80-88.
- [2] 李雄威, 王昕, 顾佳伟, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度 [J]. 中国电力, 2023, 56(1): 1-7.
- [3] 杨博, 王俊婷, 俞磊, 等. 基于孔雀优化算法的配电网储能系统双层多目标优化配置 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10): 1294-1307.
- [4] 李珂, 邵能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57.
- [5] 杨鹏程, 成健. 海岛微电网优化配置研究 [J]. 科技风, 2017, (17): 177-178.
- [6] 袁昊哲, 叶欢欢, 陈耀廷, 等. 农村微电网光储容量优化配置研究 [J]. 广东电力, 2023, 36 (5): 49-57.
- [7] 郭翠双, 张艺, 刘子晴, 等. 微电网共享储能容量优化配置研究 [J]. 科技与创新, 2025(1): 45-48.
- [8] 靖李静. 考虑源网荷协同的分布式光伏储能容量配置方法 [J]. 电气时代, 2024(11): 159-162.