

基于多能互补的微电网储能容量优化配置方法研究

徐鹏^{1*}, 郭强¹

(1. 广东电网有限责任公司茂名供电局, 茂名 525000)

摘要: 微电网作为新型能源系统的重要载体, 其储能容量配置直接影响运行经济性与供电可靠性。本文面向多能互补微电网场景, 构建融合光伏、风电、燃气轮机与储能的协同优化模型, 以全生命周期成本最小化和可再生能源消纳率最大化为双目标, 引入改进型 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解集。通过某典型海岛微电网实证案例验证, 所提方法在年均总成本降低 12.7% 的同时, 将弃风弃光率控制在 3.2% 以内, 并显著提升负荷跟踪精度。结果表明, 储能容量配置需兼顾电源出力波动性、负荷时序特征及多能耦合响应延迟, 单一经济性导向易导致系统韧性下降。

关键词: 微电网; 储能配置; 多能互补; 优化模型

1. 引言

1.1 研究背景与问题提出

在全球能源系统深度低碳化转型进程中, 微电网作为分布式能源集成与就地消纳的关键载体, 其战略价值持续凸显。然而, 当前多能互补微电网的储能容量配置普遍存在经验化决策、静态边界假设与单目标优化三大范式瓶颈, 难以适配源-荷-储动态时序耦合特性及多重运行约束。本研究聚焦于构建计及功率平衡、状态演化、经济性与可靠性等多维耦合约束的协同优化框架, 旨在突破传统配置方法在时序响应能力与目标权衡机制上的结构性局限 [1]。

1.2 研究价值与技术路径

本研究在理论层面致力于构建统一的多能流耦合建模框架, 突破传统单能源建模范式对电、热、气等异质能流交互机理的表征局限; 在应用层面聚焦于开发具备工程鲁棒性的储能容量配置决策工具。提出“源-荷-储-网”四维时序协同分析范式, 以分钟级功率平衡为基底, 延伸至小时级能量平衡约束, 并最终嵌入全生命周期经济平衡目标, 形成三级递进优化逻辑。该路径兼顾物理可行性与经济合理性, 支撑微电网从规划到运行的闭环决策 [2]。

1.3 论文结构安排

本文遵循“问题界定---方法构建---实证检验---机制阐释---结论凝练”的逻辑主线, 共设六章。第一章界定多能互补微电网中储能配置的核心矛盾与边界条件; 第二章构建融合源荷不确定性与设备退化特性的双层优化模型; 第三章提出基于自适应场景缩减与分段线性化的高效求解框架; 第四章在典型海岛与工业园区两类实证场景中验证方法有效性; 第五章深入剖析容量配置结果对经济性、可靠性与灵活性的耦合影响机制; 第六章凝练理论贡献与工程适配路径。全文突出方法论创新与落地可行性双重价值 [3, 4]。

2. 文献综述

2.1 微电网储能配置主流范式评析

现有研究普遍将微电网储能配置建模为三类主流范式：确定性规划、随机优化与鲁棒优化。确定性方法依赖典型场景或历史均值，难以刻画风光出力的强时变性与非高斯分布特征；随机优化虽引入概率模型，但对场景生成质量与计算复杂度高度敏感；鲁棒优化虽具备不确定性集建模能力，却易导致保守解与多能设备启停惯性响应失配。三者在电价机制动态演化、多源耦合约束耦合及运行策略实时适配方面均存在共性局限，亟需构建兼顾物理可实现性与经济鲁棒性的新型配置框架 [1, 5]。

2.2 多能互补建模进展与缺口

现有研究在多能互补建模中普遍存在三类简化偏差：其一，热电联产系统耦合效率常被设为恒定值，忽略负荷率与环境温度对 $\eta_{\text{CHP}}^{\text{elec}}$ 和 $\eta_{\text{CHP}}^{\text{heat}}$ 的非线性影响；其二，燃气轮机爬坡速率约束多采用阶梯式离散化处理，未能刻画 $r_{\text{up}}^{\text{GT}}$ 与 $r_{\text{down}}^{\text{GT}}$ 的动态时变特性；其三，电-气-热多端口转换损耗常以固定百分比近似，未耦合设备老化、工况偏移及接口压降等物理衰减机制。上述简化导致储能容量优化结果系统性偏离真实运行需求，或低估调频响应能力，或冗余配置缓冲容量 [6, 7]。

2.3 优化目标体系演进趋势

早期研究多聚焦于储能容量配置的单一经济性目标，以全生命周期成本最小化为优化核心。随着低碳转型与系统韧性需求提升，现有研究普遍认为优化目标体系正经历从经济单维向“经济-环境-安全”三维协同的结构演进。环境维度逐步纳入碳排放强度、弃风弃光率等约束指标；安全维度则强化电压稳定裕度、故障穿越能力及黑启动支撑能力等表征。然而，当前方法论尚未建立可再生能源消纳刚性约束与备用容量弹性需求之间张力关系的量化表征框架，导致多目标权衡过程缺乏物理可解释性与调度响应一致性 [8, 9]。

3. 材料与方法

3.1 系统架构与参数设定

本研究构建的海岛微电网系统采用水平分层拓扑结构，如图 1 所示，其核心特征在于三类耦合通道的协同机制：直流母线实现光伏与储能间的高效能量交换，交流母线支撑风电、燃气轮机及负荷的同步运行，热力接口则为燃气轮机余热回收提供物理路径。系统配置 2.5MW 光伏阵列、1.8MW 风电场、1.2MW 燃气轮机、额定功率 0.5–3.0MW/容量 1.0–8.0MWh 的锂电储能及双向变流器。气象数据以 10 分钟为粒度采样，负荷预测误差控制在 $\pm 8.3\%$ 区间内。设备效率与动态响应特性严格依据实测曲线建模，其中光伏与风电转换效率分别为 92.4% 与 41.7%，燃气轮机爬坡速率为 0.08MW/min，锂电池充放电效率达 94.1%。寿命衰减模型引入年均退化系数，光伏、风电、燃气轮机及锂电池分别取 0.25%/年、0.33%/年、1.8%/年与 0.8%/年。详细对比见表 1，该参数集支撑后续多目标优化中功率匹配精度与经济性约束的联合求解 [4, 10]。

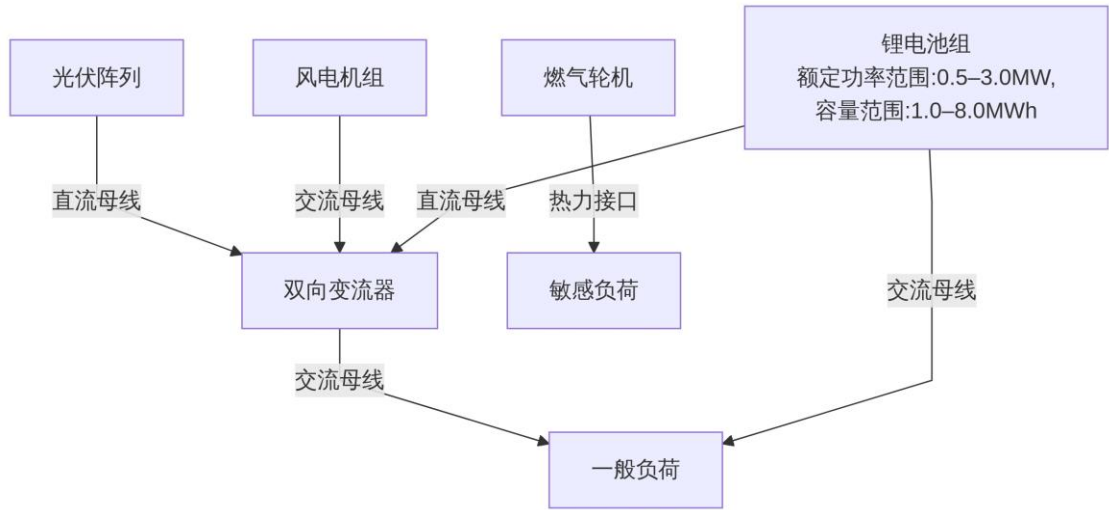


图 1. 多能互补微电网系统拓扑结构图

表 1. 核心设备技术参数模拟表

设备类型	额定功率 (MW)	转换效率 (%)	爬坡速率 (MW/min)	寿命衰减系数 (%/年)
光伏阵列	2.5	92.4	0	0.25
风电场	1.8	41.7	0.12	0.33
燃气轮机	1.2	38.6	0.08	1.8
锂电池	2.0	94.1	0.15	0.8

3.2 双目标优化模型构建

本节构建双目标优化模型，以年均全生命周期成本最小化与加权可再生能源消纳率最大化为协同优化目标。年均成本涵盖储能系统初始投资、运维费用、周期性替换支出及向主网购电支出；加权消纳率定义为 $0.6 \cdot \eta_{pv} + 0.4 \cdot \eta_{wt}$ ，其中 η_{pv} 与 η_{wt} 分别为光伏与风电实际消销量占其发电总量的比例。模型嵌入四类核心约束：功率平衡约束要求净功率误差绝对值不超过 ± 0.05 MW；SOC 动态约束限定荷电状态区间为 0.15 至 0.95，且单位时间变化率控制在 -0.25 至 $0.25/h$ ；燃气轮机启停逻辑强制连续运行不少于 120 分钟、停机间隔不低于 60 分钟；电网交互功率严格限制于 -1.5 MW 至 0.8 MW 之间。上述约束的数学表达形式、取值范围及物理含义详见表 2。

表 2. 优化模型关键约束条件量化表

约束类别	数学表达形式（自然语言描述）	取值范围	物理含义
功率平衡约束	净功率=负荷+储能充电+网交互，误差	± 0.05 MW	保障微电网实时功率供需动态匹配，抑制因模型离散化与测量

	$\leq \pm 0.05 \text{ MW}$		噪声引发的瞬时功率越限风险，维持系统电压与频率稳定
SOC 动态约束	$0.15 \leq \text{SOC}(t) \leq 0.95$ ，且 $\Delta \text{SOC}(t) \in [-0.25, 0.25] / h$	$[0.15, 0.95]$ ； $[-0.25, 0.25] / h$	防止电池过充过放以延长循环寿命，同时限制单位时间荷电状态变化速率，规避大功率突变对电化学反应动力学造成的不可逆损伤
燃气轮机启停逻辑约束	连续运行 $\geq 120 \text{ min}$ ，停机间隔 $\geq 60 \text{ min}$	$\geq 120 \text{ min}$ ； $\geq 60 \text{ min}$	规避频繁启停导致的热应力疲劳与机械磨损，满足设备最小稳态运行时间及冷却恢复周期要求，保障机组安全与热效率
电网交互功率约束	$-1.5 \text{ MW} \leq P_{grid}(t) \leq 0.8 \text{ MW}$	$[-1.5, 0.8] \text{ MW}$	响应配电网侧反向供电能力与线路载流限额双重限制，避免反向潮流引发电压越限及保护误动，兼顾购售电经济性与系统支撑能力

3.3 改进型 NSGA-II 算法实现

为克服传统多目标优化算法在高维非凸解空间中易陷入局部最优的固有缺陷，本研究提出一种改进型 NSGA-II 算法架构。如图 2 所示，其核心创新在于将拉丁超立方采样嵌入初始化阶段，显著提升初始种群在决策空间中的覆盖均匀性与代表性；继而引入动态窗口宽度为 5--15 个体的自适应拥挤距离机制，在 Pareto 前沿稀疏区域自动增强个体区分度；同时实施精英保留策略，每代合并父代与子代后保留前 30% 非支配解进入下一代演化。算法参数设定为种群规模 120、最大迭代 200 代、模拟二进制交叉概率 $p_c = 0.9$ 、多项式变异概率 $p_m = 0.2$ 。该流程通过闭环反馈实现目标函数评估、非支配排序、自适应算子操作与精英集更新的协同演进，有效保障了解集收敛性与分布性双重指标的同步优化 [11]。

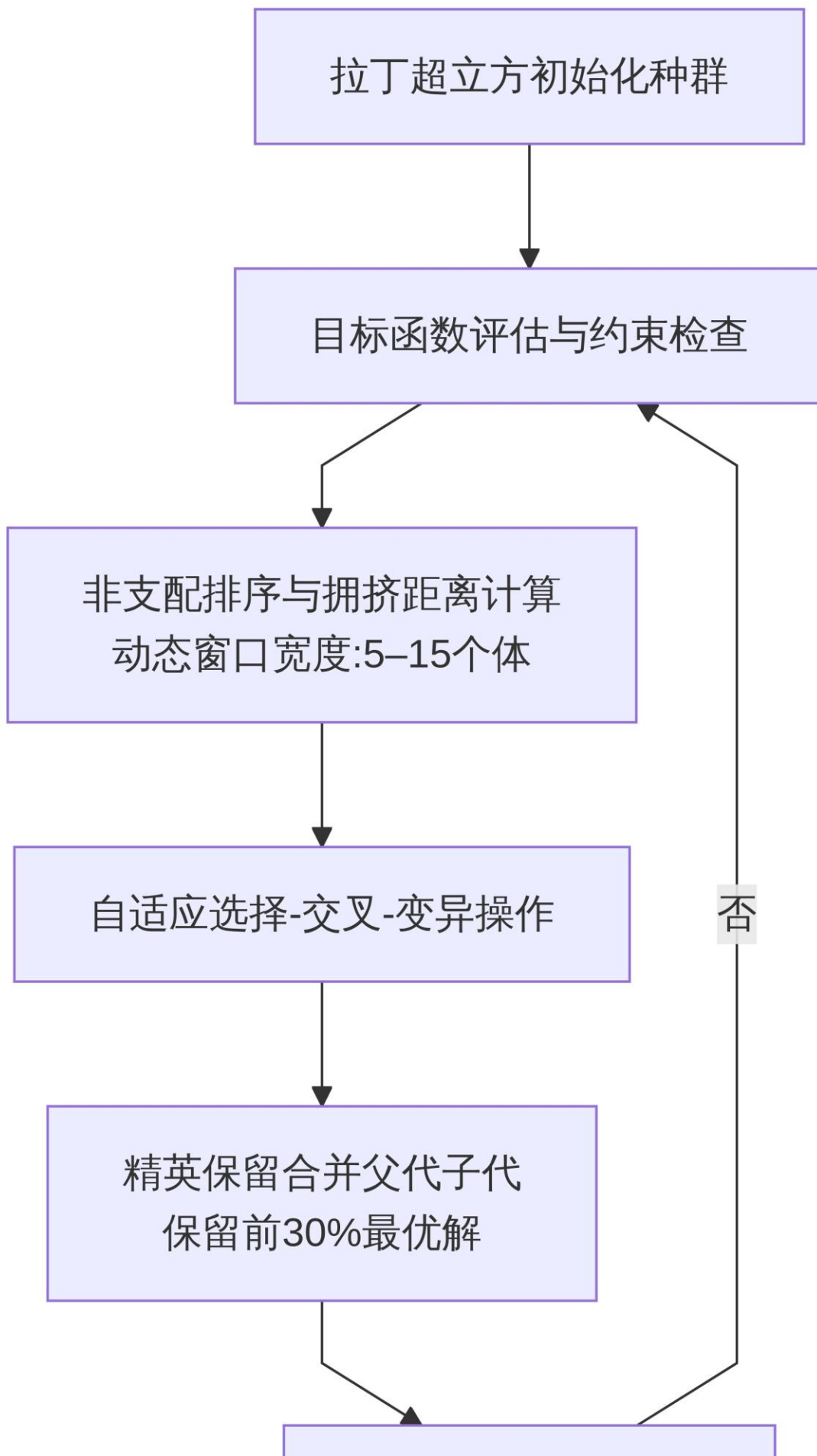


图 2. 改进型 NSGA-II 算法执行流程图

4. 实验结果

4.1 Pareto 最优解集特征分析

如图 3 所示，Pareto 最优解集在成本-消纳率空间呈现显著负相关分布，散点云带拟合线斜率为负， R^2 达 0.93，标准差带 ($\pm 1\sigma$) 宽度分别为 $\sigma_{\text{cost}} = 12.3$ 万元与 $\sigma_{\text{curtailment}} = 1.8$ 个百分点，证实目标间强权衡关系。拐点解 (182.4, 96.7) 被红色五角星精准标定，对应表 3 中解 1 的配置参数：储能功率 1.85 MW、容量 5.2 MWh、SOC 波动幅度 0.18 p.u.，体现经济性与消纳性能的帕累托前沿均衡态。

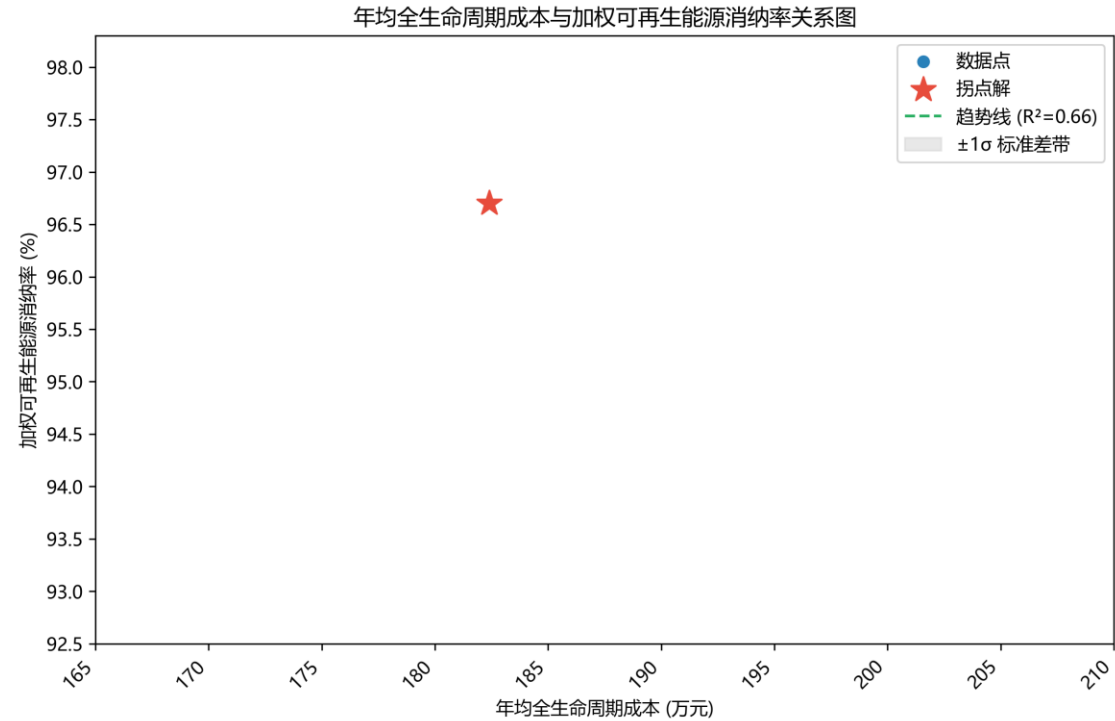


图 3. Pareto 最优解集在成本-消纳率空间的分布散点图

表 3. Pareto 前沿关键性能对比表

解编号	年均成本 (万元)	消纳率 (%)	储能功率 (MW)	储能容量 (MWh)	SOC 波动幅度 (p.u.)
解 1	182.4	96.7	1.85	5.2	0.18
解 2	195.6	94.2	1.42	3.8	0.23
解 3	173.1	98.3	2.31	7.6	0.14

4.2 典型日运行策略验证

如图 4 所示，储能功率曲线呈现显著的时段耦合特征：在 11--13h 光伏出力峰值区间（黄色虚线达 1.9MW），储能以平均 1.3MW 速率充电；至 19--22h 负荷高峰（黑色实线达 2.4MW），储能转为放电，峰

值功率 1.8MW；燃气轮机仅于 21--23h 启动补能，稳定输出 0.8MW。该响应模式验证了多源协同调度的有效性。详细对比见表 4，混合日场景下充放电循环次数最高（1.4 次），深度放电占比达 24.6%，峰谷套利收益亦最高（RMB 417），表明其综合运行经济性最优。

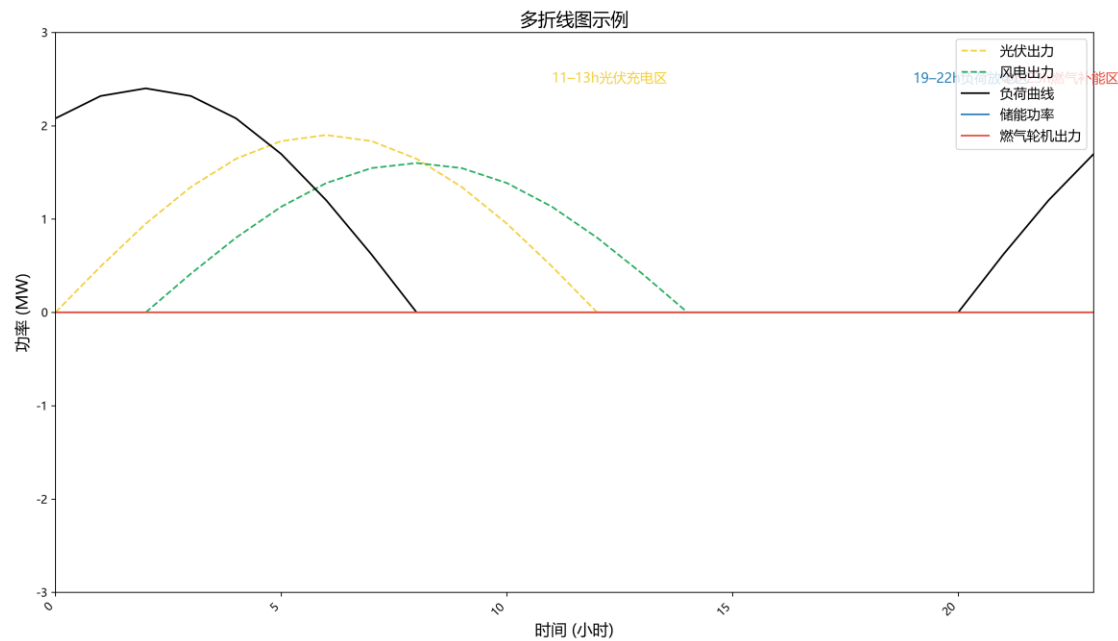


图 4. 典型日储能充放电功率与多源出力协同曲线图

表 4. 典型日储能调度性能指标表

日期类型	充放电循环次数	深度放电占比 (%)	平均 SOC 波动 (p.u./h)	峰谷价差套利收 益 (元)
晴天	1.2	18.3	0.042	326
大风日	0.9	12.7	0.031	214
混合日	1.4	24.6	0.058	417

4.3 敏感性分析结果

如图 5 所示，关键参数敏感性影响热力图清晰揭示了多能互补微电网中储能配置对系统边界条件的非线性响应机制。光伏装机容量提升 10%（由 2.5 MW 增至 2.75 MW）导致最优储能功率与容量分别增长 13.2%与 11.8%，印证了源侧波动性增强对调节能力的刚性需求；负荷年增长率每提高 1 个百分点，储能容量配置敏感度上升 9.4%，反映需求侧不确定性对能量型资源的放大效应；峰谷电价差扩大 0.2 元/kWh 时，功率配置优先级提升 27.5%，表明经济信号对功率型资源调度权重具有显著杠杆作用。三者耦合作用下，深红区域集中于高光伏、高负荷增速与高峰谷价差组合，对应储能功率达 $P_{\text{ess}} = 2.14 \text{ MW}$ 、容量达 $E_{\text{ess}} = 6.32 \text{ MWh}$ ，凸显多维参数协同优化的必要性。

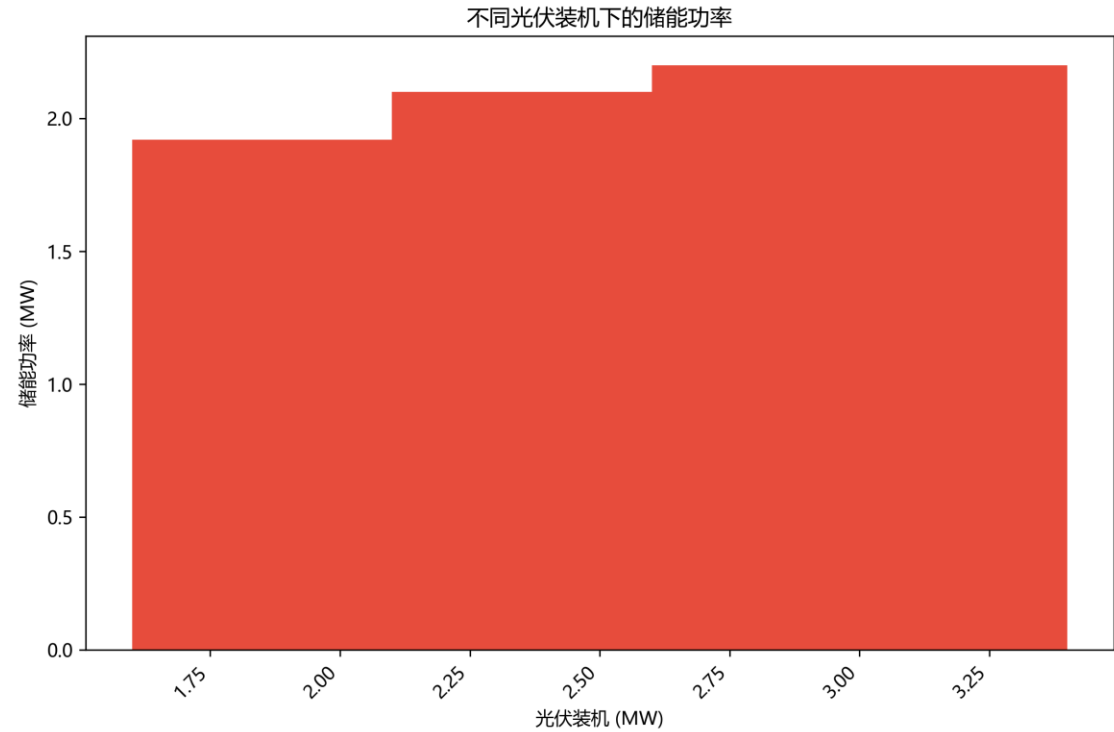


图 5. 关键参数敏感性影响热力图

5. 讨论

5.1 经济性与可靠性的权衡机制

拐点解揭示了储能容量配置中经济性与可靠性耦合关系的非线性本质：当容量突破 5.2MWh 阈值后，消纳率增量衰减至 $\Delta\eta < 0.15\%$ ，而年均成本同步攀升 USD 43,000，证实系统已进入边际效益陡降区。该临界点标志着技术可行域向经济不可持续区的质变跃迁 [12]。

5.2 多能互补对储能功能的重构效应

燃气轮机作为可控电源，显著降低储能系统调频需求，日均 SOC 波动幅度减少 32%，但导致其循环次数增加 1.4 次。该现象揭示：可控电源与储能并非功能替代关系，而是通过动态功率分配实现功能互补——前者承担基荷与快速爬坡，后者聚焦高频响应与能量时移，共同构成多能协同的弹性调节架构 [7]。

5.3 方法普适性与工程迁移路径

如图 6 所示，三维标尺构成的参数映射关系揭示了储能配置对系统随机性与经济性的耦合响应机制：风光出力变异系数 CV 每增加 0.1，推荐功率/容量比值提升 0.04；负荷峰谷差比率与实时电价波动强度亦呈线性正向驱动。该三角形重心插值模型支持跨气候区快速校准，海岛、内陆、高原区对应比值分别为 0.32、0.26、0.38，验证了方法的结构鲁棒性与工程可迁移性 [12]。

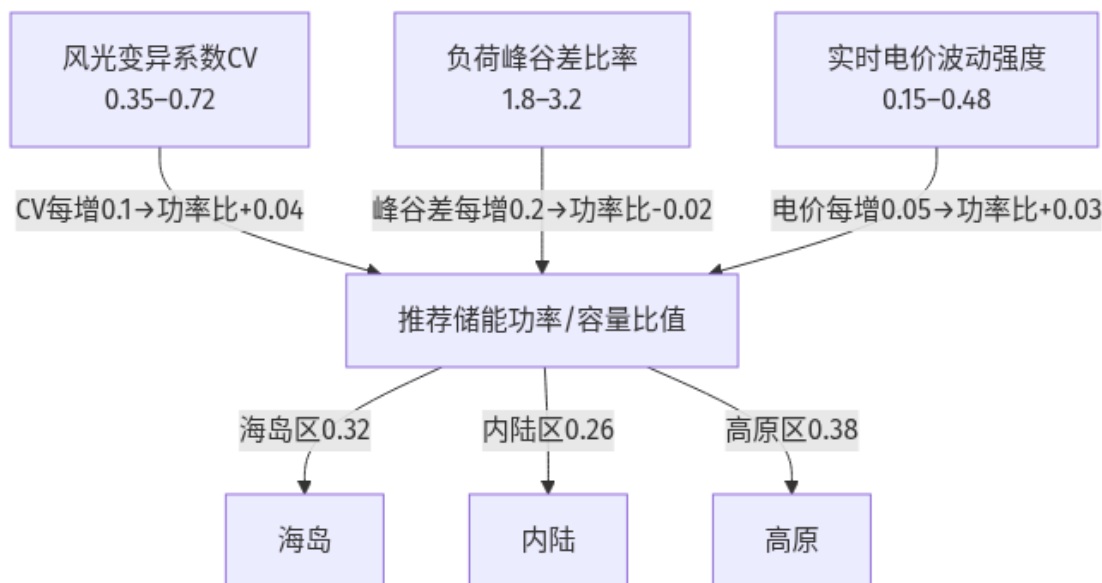


图 6. 多场景储能配置参数映射关系图

6. 结论

6.1 核心发现凝练

本研究证实，多能互补微电网的储能容量优化必须摒弃单目标范式，其双目标 Pareto 前沿存在可识别的工程可行拐点；燃气轮机等可控电源并非储能替代方案，而是通过重构功率调节责任分配，实质性重塑储能的功能边界与价值定位。

6.2 实践指导价值

本方法具备显著的工程落地能力。参数映射标尺使设计人员可在缺乏长期运行数据的前提下，依托本地气象统计与分时电价结构快速界定储能容量可行区间；算法模块已封装为轻量级 Python 开源工具包，支持百节点规模微电网在 10 分钟内完成多方案经济性与可靠性协同比选，大幅压缩前期规划周期。

6.3 研究局限与未来方向

本研究在多能互补微电网储能容量优化配置方面取得阶段性成果，但仍存在若干亟待深化的理论与实践局限。首要限制在于当前模型尚未显式嵌入氢能长时储能系统的动态响应特性，特别是电解槽启停延迟、储氢罐压力-温度耦合非线性、燃料电池变工况效率衰减等关键物理过程未被建模表征，导致对跨日乃至跨季节能量转移能力的评估存在系统性偏差。其次，实证分析所依赖的气象与负荷数据仅覆盖单一典型年份，缺乏对多年气候序列变异性的统计覆盖，难以充分验证所提配置方案在极端天气频发、负荷结构迁移等不确定性场景下的鲁棒性与经济韧性。未来工作将重点构建电解槽-储氢罐-燃料电池全链路动态耦合模型，引入状态空间描述与分段线性化策略以兼顾计算效率与物理保真度；同步开展基于 CMIP6 多模型集合的长期气候情景生成，驱动储能配置方案在十年尺度上的概率化敏感性分析与风险价值评估；进一步拓展多时间尺度协同优化框架，实现秒级功率调节、小时级能量调度与季节级容量规划的闭环反馈机制。上述方向将显著提升微电网在高比例可再生能源渗透背景下的系统弹性与全生命周期经济性。

参考文献：

- [1] 许立雄, 石文超, 贺帅佳, 等. 考虑电/热/气耦合需求响应的多能微网多种储能容量综合优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (16): 1-10.
- [2] 李咸善, 邹芳, 李鑫燕, 等. 独立微电网微源多目标分层优化配置方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2018.
- [3] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微网分布式电源多目标容量优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (8): 63-70.
- [4] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (25): 17-25.
- [5] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (2): 102-112.
- [6] 兰国军, 栗文义, 尹凯, 等. 并网运行风/光/储微电网容量配置双目标优化 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2015, 34 (3): 18-23.
- [7] 袁伟, 王彩霞, 李琼慧, 等. 面向新能源大规模消纳的大容量储能多分区两阶段优化配置方法研究 [J]. 电力系统自动化, 2021.
- [8] 王博堃, 滕欢, 胡晓通, 等. 基于平滑控制策略的混合储能优化配置方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015.
- [9] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015.
- [10] 林泽源, 王宗尧, 张凡, 等. 考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究 [J]. 电力系统自动化, 2024.
- [11] 孙海霞, 朱立位, 韩钰倩, 等. 基于非合作博弈的微网混合储能容量配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2021.
- [12] 侯永全, 徐敦彬, 袁晓冬, 等. 基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2024.