

[混合发电]

离网型光伏-储能混合发电系统容量优化配置

文/沈建¹ 李剑辉² 张智新²

1. 济南市冷热联供有限公司; 2. 山东和同信息科技股份有限公司

提出一种光伏-储能系统相结合的混合发电系统优化配置方法。基于Python平台采用线性规划单纯形法求解线性规划优化问题, 该模型以电能需求实测数据、太阳辐照度信息为核心输入参数, 将电池荷电状态(SOC)及其充放电上下限设定为关键决策变量。在求解所需计算资源最小化的基础上, 通过与传统光伏系统容量配置方法对比分析评估优化效果。结果表明, 该方法显著提升了光伏与储能系统的能源利用率。

可再生能源发电系统的开发利用对碳减排和探索可持续环保替代能源具有深远影响。它不仅有助于降低环境污染, 减少对化石燃料的依赖, 更对能源供应紧张地区的电气化进程具有显著价值。然而, 由于可再生能源发电系统受资源随机性和天气因素的制约, 通常难以实现全天候持续供电。为此, 混合发电系统应运而生。该系统通常整合两种或两种以上类型的能源(至少包含一种可再生能源), 并辅以发电机或储能系统作为补充, 从而确保供电的连续性与稳定性。

单纯形法作为一种高效的线性规划算法, 能够同时满足能源需求、太阳辐照度和电池性能(如荷电状态)等多重约束条件, 特别适合应用于光伏-储能混合系统的优化设计。通过处理线性关系, 该方法能有效保障系统在发电性能与经济性上的双重优化。在需要平衡可再生能源发电与储能配置的混合系统中, 单纯形法可通过高效搜索可行解空间, 获取最优方案, 实现技术参数与经济指标的综合优化, 对推动可再生能源技术在现代电力系统中的发展具有重要意义。

混合发电系统原理

混合发电系统是由两种或多种能量转换装置

(如发电机或储能装置)的组合构成, 或采用两种及以上燃料的同类型装置组合而成, 这种组合能够克服单一系统固有的局限性。其核心特点在于多能源转换系统的集成(至少包含一种可再生能源转换装置), 从而显著提升整体效率和可持续性, 能够有效替代传统能源系统的应用场景。

混合电力系统主要应用于传统电网难以延伸的偏远地区交流电网、现有配电基础设施中多种能源协同运行的分布式能源整合和为孤岛、农村地区或特殊用途电力负载提供定制化电源解决方案等场景, 其可再生能源发电系统与储能装置协同供电的架构模式如图1所示。

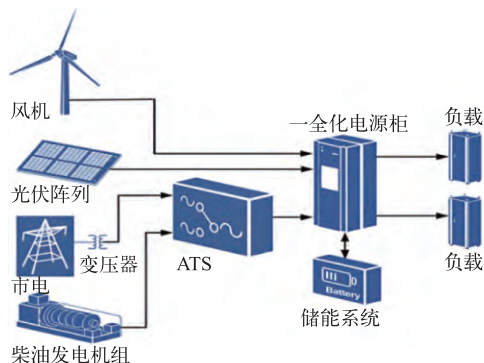


图1 混合发电系统典型架构

单纯形法算法原理

单纯形法通过系统评估可行域的顶点，以确定目标函数的最优值。从几何视角来看，该算法在迭代过程中沿着可行域的顶点移动，直至找到最优解，并通过引入松弛变量确保解始终处于可行域内。从代数角度分析，该方法通过在连续的矩阵表格中反复确定主元列、主元行及最终的主元素，运用高斯-约当消元法进行主元素旋转运算，从而生成新的矩阵表。

1. 混合发电系统容量优化研究方法

本研究旨在确定离网型光伏发电系统与储能系统最优容量配置，进而实现成本最小化与效率最大化的双重目标。该方法以历史太阳辐照度数据及典型用电负荷测试数据作为输入参数进行优化计算。如图2所示的流程图详细阐述了该优化方法的实施步骤，包括关键决策节点与阶段性计算流程。

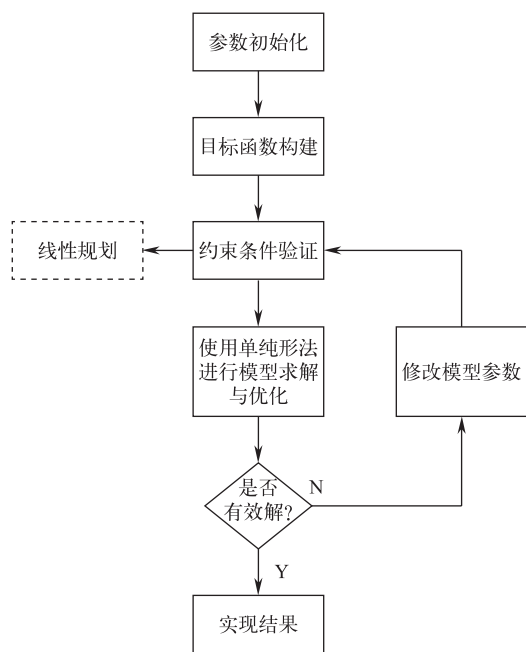


图2 优化方法流程

2. 混合发电系统设计与优化

光伏系统的发电量与其装机容量呈线性正相关，即系统容量的增加将直接带来发电量的提升。在混合能源系统的设计中，综合考虑光伏阵列、储能系统及功率转换环节的损耗后，设定系统转换总效率为20%。

其中，电池储能系统数学模型分为两种工作状态：放电阶段与充电阶段。电池放电阶段，电池剩

余电量（SOC）计算方法为

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t)(1 - \sigma) + \left[P_{pv}(t)\eta_{pv} - \frac{P_{load}(t)}{n_{inv}} \right] \frac{1}{\eta_{dis}} \Delta t \quad (1)$$

式中， σ 为时间间隔 Δt 内的电池自放电率； η_{pv} 为光伏系统效率； η_{inv} 为逆变器效率； η_{dis} 为电池放电阶段效率。

电池充电阶段，剩余电量SOC(t)为

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t)(1 - \sigma) + \left[P_{pv}(t)\eta_{pv} - \frac{P_{load}(t)}{n_{inv}} \right] \eta_{ch} \Delta t \quad (2)$$

式中， η_{ch} 为电池充电阶段的效率；蓄电池在工作过程中，其荷电状态（SOC）需维持在设定的上限SOC_{max}与下限SOC_{min}之间。因此，必须明确界定SOC(t)的允许波动范围，公式为

$$SOC_{max} \geq SOC(t) \geq SOC_{min} \quad (3)$$

SOC_{min}由最大允许放电深度决定，并影响储能装置的寿命，定义为

$$SOC_{min} = (1 - DOD) SOC_{max} \quad (4)$$

式中，电池荷电状态上限SOC_{max}取95%；电池荷电状态下限SOC_{min}取20%。

电池充放电功率需满足以下限值

$$-P_{ch,t} \leq P_{ch,max} \eta_{ch} ch_t \quad (5)$$

$$P_{dis,t} \leq P_{dis,max} \eta_{dis} dis_t \quad (6)$$

式中， $P_{ch,t}$ 为时刻 t 电池充电功率； $P_{ch,max}$ 为电池最大充电功率； ch_t 为电池充电状态（0或1）； $P_{dis,t}$ 为时刻 t 电池放电功率； dis_t 为电池放电状态（0或1）。

需要注意的是，电池不能同时充电和放电。因此约束条件为

$$ch_t dis_t = 0 \quad (7)$$

系统总成本最小化目标函数定义为

$$\min_{PV-B} = PV_s cost_{pv} + B_{max} cost_b + \lambda pe_{soc} \quad (8)$$

$$\lambda = f(SOC_{min}, DoD) \quad (9)$$

式中， $\min_{PV-B}$ 为混合系统总成本； PV_s 为光伏系统容量； $cost_{pv}$ 为光伏系统单位成本； B_{max} 为储能系统容量； $cost_b$ 为储能系统单位成本； λ 为放电惩罚系数； pe_{soc} 为储能放电惩罚项，用以约束电池放电深度（DoD），防止过度放电，若电池累计放电量超过阈值，惩罚项 pe_{soc} 将增加总成本。采用Python编程工具求解该线性规划模型。

结果与讨论

本研究利用24 h太阳辐照度及日常电力需求数据,对系统进行了深入的分析与验证。以一个典型居民用电模式负荷特性为例,假设峰值负荷约为1.4 kW,最低负荷约为0.2 kW,具体如图3所示。图4展示了测试太阳辐照度曲线,日间辐照高峰时段为9:00—16:00,清晰地反映了太阳辐射的日常变化特征。

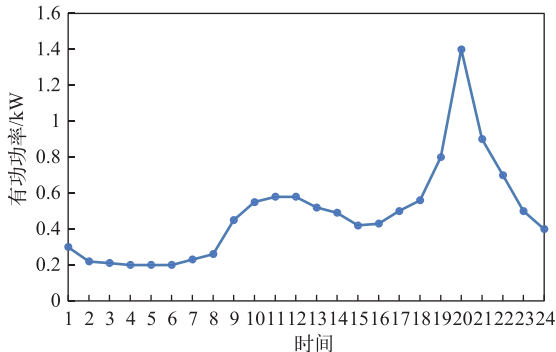


图3 负荷曲线测试数据

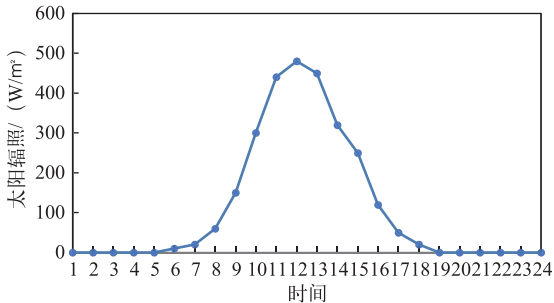


图4 项目区域冬季太阳辐照度数据

经对辐照度曲线进行分析,光伏系统在每日特定时段(下午19:00—凌晨5:00)无法发电,此时须依赖储能系统维持电力供应,其中部分时段恰好与用电高峰时段重叠,这种供需失衡现象凸显了储能系统供电的重要性。

通过以上公式,结合月度能源消耗数据,可对光伏系统容量进行综合估算,以预测年发电量,从而保障能源供应的可靠性与高效性。

$$P_{PV} = \frac{E_m \times 12}{\eta \times 8760} \quad (10)$$

通过采用太阳辐照度最大时段充电、用电高峰时段放电的运行模式,实现了发电量与负荷需求之间的动态平衡。这种双向能量调控机制构建了一个具备高可靠性与弹性的能源供应体系,符合预期的

性能标准,如图5所示。

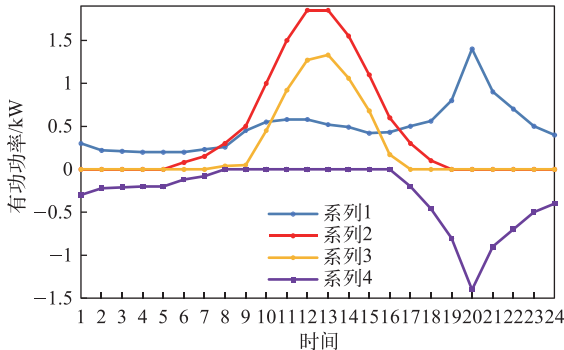


图5 混合系统优化运行情况

以济南市某离网光伏-储能混合发电系统为样本,通过对图3所示负荷曲线的深入分析,采用典型光伏容量因数 $\eta=0.2$ 进行计算,优化前光伏系统预定容量为2.55 kW。

通过以上运行参数,采用本文方法对混合发电系统进行了优化,优化后的混合发电系统容量配置情况见表1,该配置符合前文中提出的特定条件和要求。

表1 混合发电系统容量配置结果

系统	容量
光伏系统/kW	1.85
储能电池容量/(A·h)	168.4

表1所示优化结果表明,优化后的混合发电系统中,光伏部分的成本降低了约27.45%,同时能够精确计算所需储能系统的容量,确保在用电需求高峰时段实现可靠供电,从而保障能源供应的稳定性与高效性。

结束语

本文基于单纯形法构建了线性规划优化模型,该方法无须大量计算资源即可充分契合混合发电系统数学模型的特性。既可用于评估光伏系统发电量与太阳辐照资源可用性的匹配关系,也可用于发电系统的整体设计(包括太阳能电池板数量与储能系统容量的优化配置等),其优势在于计算效率高,适合中小规模线性问题。其局限性是对非线性约束(如电池衰减模型)需线性化处理,可能影响精度。总之,基于线性规划的优化模型(尤其是单纯形法)在计算效率、能源估算与系统设计精度之间实现了有效平衡。EA

(收稿日期:2025-05-13)