

Research on Optimal Allocation of Photovoltaic and Energy Storage Capacity in County Microgrids

Jianliang Zheng Hanwen Zhang Xier Yang Luotong Sui Jialiang Zhao

School of New Energy Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China

Abstract

In recent years, clean energy such as photovoltaic and energy storage has been widely built and developed in China. At the national level, new microgrids are actively developed to improve the energy utilization efficiency and power supply stability of poor areas. As an important carrier of distributed energy consumption, the capacity optimization of photovoltaic-energy storage systems is of great significance to improving economy and reliability. Therefore, a multi-objective optimization model is established based on the core evaluation index of standardized unit cost and power outage probability. Secondly, by introducing dynamic cross probability and variation operators to improve the traditional NSGA-II, the convergence and uniform distribution of Pareto solutions are improved. The feasibility of the capacity optimization model and the multi-energy storage collaborative operation strategy proposed in this paper is verified through example analysis.

Keywords

county microgrid; configuration of photovoltaic and energy storage capacity; multi-objective optimization; NSGA-II

县域微电网光储容量优化配置研究

郑健靓 张瀚文 杨夕儿 隋洛同 赵家良

河海大学新能源学院, 中国·江苏·南京 210098

摘要

近年来,我国光伏、储能等清洁能源得到了广泛的建设和发展,国家层面积极发展新型微电网以提升贫困地区的能源利用效率和供电稳定性。县域微电网作为分布式能源消纳的重要载体,其光储系统的容量优化对提升经济性与可靠性具有重要意义。为此,针对县域地区光伏出力波动性、负荷需求多样性以及储能系统调节能力的耦合矛盾,建立以平准化度电成本及缺电概率为核心评价指标的多目标优化模型。其次,通过引入动态交叉概率与变异算子改进传统NSGA-II,提升Pareto解集的收敛性与分布均匀性。并通过算例分析验证了本文所提的容量优化模型和多储能协同运行策略的可行性。

关键词

县域微电网; 光储容量配置; 多目标优化; NSGA-II

1 引言

在全球能源转型与“双碳”目标驱动的背景下,县域微电网作为分布式能源系统的重要载体,因其灵活性和本地化能源消纳能力,成为推动农村及偏远地区能源清洁化、低碳化的关键解决方案。国家能源局发布的《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》明确指出,微电网代表了未来能源发展趋势,是关于能源生产和消费革命的重要措施,是推进能源发展及经营管理方式变革的重要载体^[6]。

县域地区往往面临电网延伸成本高、负荷分散、可再生能源波动性强等问题^[7],而光储微电网通过“源-储-荷”协同,可显著提升供电可靠性与能源自给率。然而,光伏发电与储能系统的容量配置优化问题,始终是制约县域微电网高效运行与经济性提升的核心挑战。现有研究普遍认为,单一储能技术(如锂电池)难以满足微电网对经济性、可靠性

及环境效益的综合需求,混合储能系统通过集成互补性技术成为主流解决方案。例如,文献[8]采用粒子群算法优化混合储能容量,成功解决微电网双目标冲突问题,但在处理大规模系统时,易陷入局部最优解;文献[9]自主研发的能量管理系统采用了分层分级的架构方案,能够实现云边端协同微电网群一体化管理;文献[10]针对配置储能的园区使用混合整数线性规划方法。然而,这些方法多针对负荷集中的工业园区或城市配电网设计,未充分考虑县域场景的时空异质性。本研究旨在探讨县域微电网中光储系统的容量优化配置问题,以实现能源的高效利用和经济成本的最小化。通过分析太阳能光伏发电特性、储能设备的响应特性以及县域的能源需求特点,提出了一种基于改进遗传算法的微电网光储容量优化配置模型和算法,为微电网的设计、规划和运行提供理论依据和实践方案。

2 县域微电网特性分析

2.1 负荷特性

县域负荷具有明显的季节性和日变化特征。夏季制冷负荷和冬季取暖负荷较高,春秋季节负荷相对平稳。在一天中,居民生活用电呈现早晚高峰,商业与工业用电时段较为集中且强度较大。不同区域的负荷特性也存在差异,县城中心区域商业和居民负荷密集,而乡镇地区工业负荷占比较大。这种复杂的负荷特性对微电网的供电能力和稳定性提出了更高要求。

2.2 微电网结构与运行模式

县域微电网通常包含分布式电源、储能装置、负荷及配电线路等。其运行模式分为并网和孤岛两种^[2]。并网模式下,微电网与主网互联互通,可进行功率交换,实现余电上网和缺电补充;孤岛模式则在电网故障或主动离网时独立运行,依靠自身电源和储能维持负荷供电。不同运行模式对光储容量的配置有着不同的需求,根据具体地方能源系统构成进行分析,建立大致光伏微电网供电系统,系统结构如图1所示,县域微电网包括光伏发电系统、储能系统、工商业、农业和居民生活等多种类型负荷。

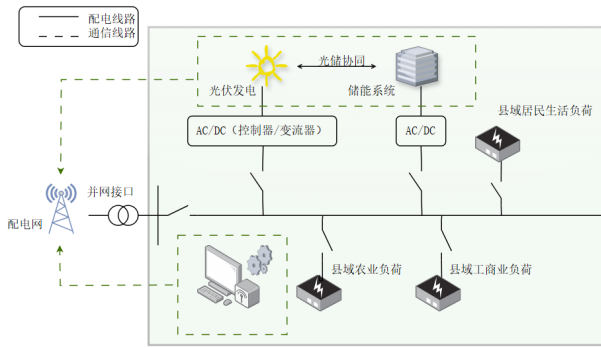


图1 典型县域光伏微电网系统结构

3 光储容量优化配置模型

3.1 目标函数

本项目拟建立光储容量优化配置模型,选取储能电池容量作为优化变量,以满足光伏系统最低投入成本和最低能量损耗,在目标函数中计入平准度电成本和缺电概率。

平准化度电成本(Levelized Cost of Energy,LCOE)指在光伏项目的整个生命周期内,将所有成本进行平准化处理后,再除以生命周期内的总发电量,得到的单位电量成本,用来评估一个光伏发电项目在其全生命周期内单位电量的平均成本。

$$LCOE = \frac{\sum(I_t + M_t + S_t)}{\sum(E_t)}$$

式中: I_t 为第 t 年的初始投资成本,元/kW; M_t 第 t 年的运维成本,包含光伏运维成本和蓄电池运维成本,

元/kW; S_t 为其他费用,元/kW; E_t 为第 t 年的发电量,kWh; t 为项目运营年数。

缺电概率(Loss of Power Supply Probability,LPSP)是指一定时间内系统不能满足负荷需求的概率,其值等于负荷需求未满足的部分除以总负荷需求量。

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{m_s} P_l(t) - P_{pv}(t) - P_{ES}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_l(t)}$$

式中, $P_l(t)$ 为 t 时刻系统的负荷功率,kW; $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏系统的发电功率,kW; $P_{ES}(t)$ 为 t 时刻储能系统输出功率,kW; m_s 为系统无法满足负荷需求的小时数。

综上,目标函数的表达式为:

$$\min F(x) = (LPSP(x), LCOE(x))^T$$

3.2 配置模型

3.2.1 光伏发电模型

光伏电池的输出功率主要与太阳辐射和温度有关。其数学表达式为:

$$P_{pv} = P_{STC} \cdot (1 + \beta_T(T_b - T_{STC}))I / I_{STC}$$

$$T = T_{amb} + 30I / I_{STC}$$

式中, P_{pv} 为光伏阵列输出功率,kW; P_{STC} 表示标准测试状况下的最大输出功率,kW; I_{STC} 是标准测试条件下太阳光照强度,kW/m²; I 是太阳光照强度,kW/m²; β_T 表示温度系数,一般取-0.47%/K; T_b 表示光伏电池表面运行温度,℃; T_{STC} 为标准测试条件下光伏电池表面温度,25℃; T_{amb} 表示环境温度,℃。

光伏组件选用天合光能 TOPCon610W 双玻组件,额定功率610W,转换效率90%。

3.2.2 储能蓄电池模型

表1 储能系统仿真参数

参数	值
蓄电池额定工作电压/V	240
蓄电池额定容量/Ah	100
初始荷电状态	60%
直流母线电压/V	800
滤波电容/ μ F	1000
负载电阻/ Ω	60
蓄电池充放电效率	0.96
蓄电池充放电深度	0.8

3.3 约束条件

3.3.1 系统装机容量约束

微电网系统里,光伏组件、储能蓄电池容量受到地理位置环境等因素受到限制,约束公式如下:

$$\begin{cases} N_{pv,\min} \leq N_{pv} \leq N_{pv,\max} \\ N_{bat,\min} \leq N_{bat} \leq N_{bat,\max} \end{cases}$$

式中, $N_{pv,\min}$ 、 $N_{pv,\max}$ 分别代表光伏组件最小、最大安装数量; $N_{bat,\min}$ 、 $N_{bat,\max}$ 分别代表蓄电池最小、最大安装数量。

3.3.2 功率平衡约束

在每个时刻, 微电网内光伏发电功率、储能充放电功率与负荷功率之间需满足功率平衡关系。即:

$$P_{pv}(t) + P_d(t) = P_l(t) + P_c(t)$$

式中, $P_d(t)$ 为 t 时刻储能系统放电功率, kW; $P_c(t)$ 为储能系统充电功率, kW。

3.3.3 储能充放电功率与荷电状态约束

储能系统需满足充电放电功率约束、荷电状态 (state of charge, SOC) 约束, 防止过充过放^{[41][11]}。即:

$$SOC_{(t)} = (1 - \xi)SOC_{(t-1)} + \frac{P_c(t)\Delta t \cdot \eta_c}{E_c} \times 100\%$$

$$SOC_{(t)} = (1 - \xi)SOC_{(t-1)} - \frac{P_d(t)\Delta t}{E_c \cdot \eta_d} \times 100\%$$

$$\begin{cases} SOC_{\min} < SOC(t) < SOC_{\max} \\ 0 \leq P_{c,ess} \leq P_{c,max} \\ P_{d,max} \leq P_{d,ess} \leq 0 \end{cases}$$

式中, $SOC_{(t)}$ 、 $SOC_{(t-1)}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻结束时蓄电池的荷电状态; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别为储能系统最小和最大荷电状态, E_c 为蓄电池的额定容量, ξ 为蓄电池的自放电率, η_c 、 η_d 分别为蓄电池的充、放电效率; Δt 为前后相邻时刻的时间间隔; $P_{c,ess}$ 、 $P_{d,ess}$ 是储能的充电功率和放电功率, kW; $P_{c,max}$ 、 $P_{d,max}$ 和分别是储能最大充电功率和最大放电功率, kW。

3.3.4 主网孤网切换约束

当主网异常需在毫秒至秒级时间内检测到主网电压/频率超限、断电等异常, 从检测到异常到完全脱离主网的时间需符合标准, 避免对主网维修或微网设备造成冲击。

$$\Delta P = P_L - (P_{PV} + P_d - P_c) \leq K \cdot \Delta t$$

$$D_{DOD} \leq 80\%$$

式中, K 为储能调节速率; Δt 为调节时间; D_{DOD} 为电池放电深度。

3.3.5 储能充放电状态约束

储能系统在同一时刻下只能以一种状态运行, 即仅处于充电状态或放电状态或备用状态^[12]。

$$x_c + x_d = 1$$

式中, x_c 和 x_d 分别代表着储能的充电状态和放电状态的布尔变量。

3.4 求解模型

为优化县域微电网光储容量配置, 引入多目标非支

配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II), 采用自适应交叉算子和变异率对算法进行改进。该算法兼顾经济效益与缺电概率, 对相关模型实施多目标优化求解。其流程如图 2 所示, 其中方框部分展示了优化算法计算目标函数值的过程。具体而言, 模型依据初始光储容量及状态参数, 计算系统总成本。同时, 通过分析县域微电网一日内的负荷特性和光伏出力特性, 明确能量交换状态, 并结合县域分时电价算出各时段购电成本, 最终得出微电网每日的平准化度电成本与缺电概率, 生成 Pareto 最优解。

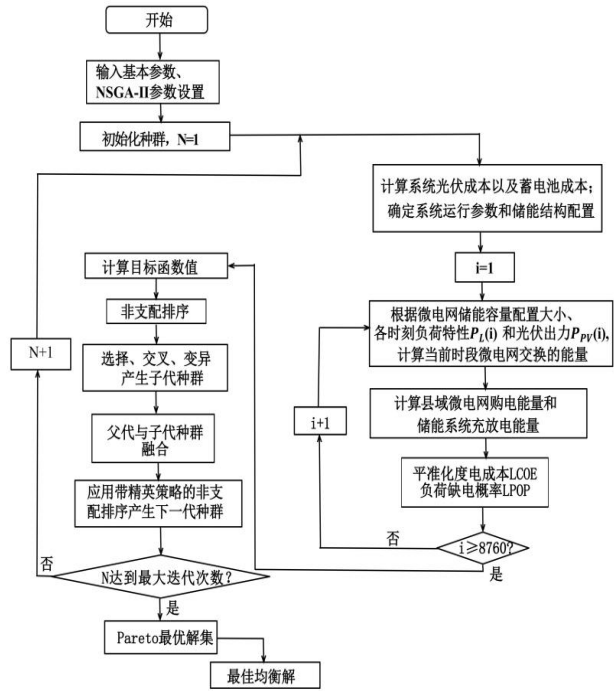


图 2 改进遗传算法计算流程

4 算例分析

4.1 县域微电网参数设定

以江苏某典型县为例, 年负荷曲线和年光伏出力数据已知。该地区冬季 1 日负荷特性和光伏出力特性如图 3 所示, 其中光伏出力呈正态分布, 这与冬季太阳一天内的光照变化规律相契合。

县域居民负荷从凌晨开始, 随着人们逐渐起床活动, 负荷量逐步上升, 在上午 7-8 点左右出现一个小高峰, 约为 380kW 左右, 这与人们起床后使用各类电器设备有关。随后略有下降并保持相对平稳, 到下午 17-18 点左右负荷量急剧上升, 在 19 点左右达到接近 600kW 的峰值, 之后缓慢下降, 这表明傍晚时分家庭用电设备大量开启。

根据该地区日负荷总量、光伏日发电量差值确定装机容量, 同时考虑天气影响预留 10%~20% 余量, 初定装机容量为 1000kW。光伏初始成本 800 元/kwh, 运维成本 60 元/kwh。储能初始成本 900 元/kwh, 运维成本 30/kwh。

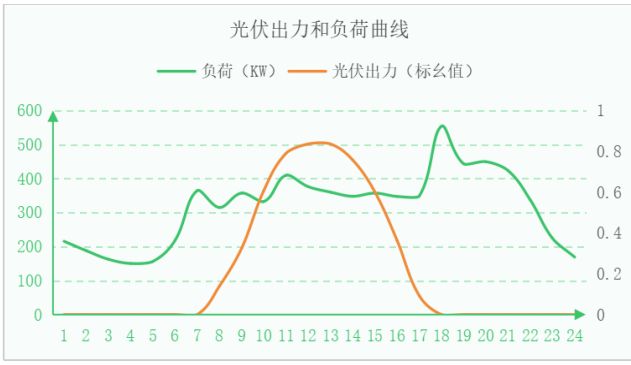


图3 典型日负荷曲线和年光伏出力曲线

4.2 优化结果分析

本文借助 NSGA- II 算法, 在 MATLAB R2024a 环境下对光伏系统容量展开双目标优化配置。算法设定种群数量为 200, 最大迭代次数为 120, 交叉与变异算法的分布指数均为 20。经算法搜索, 得到 Pareto 前沿, 据此选出平准化度电成本和缺电概率的整合最优解。

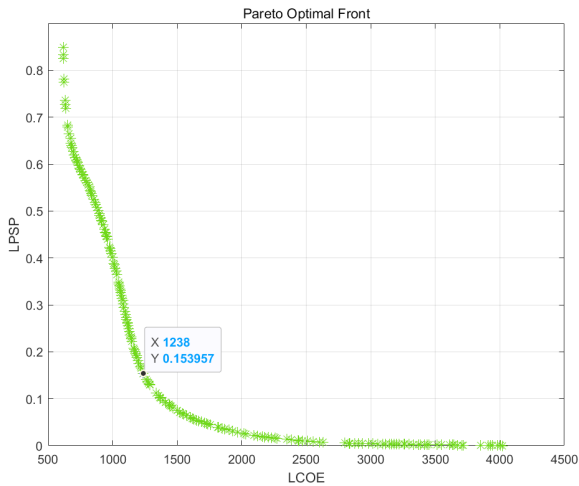


图4 优化后的 Pareto 前沿

由优化结果可知, 降低平准化度电成本, 需减少储能容量或光伏冗余, 但缺电概率将显著上升; 降低缺电概率, 需增加储能配置或光伏超配, 导致平准化度电成本攀升。平准化度电成本约为 1238 元/小时, 缺电概率约为 0.153957 时, 该点是从 Pareto 前沿中选出的平准化度电成本和缺电概率整合最优解, 说明在这个配置方案下, 能较好地平衡发电成本与供电可靠性。此时光伏装机容量为 2117KW, 选用天合光能 TOPCon610W 双玻组件 3471 块, 蓄电池装机容量为 538kW。

根据优化结果, 可以将不同方案适配不同场景, 如表 2 所示。

5 结论与展望

本文通过构建“多模式切换 - 多目标协同”优化模型, 结合县域能源结构、负荷特性及政策经济约束, 优化了光储

容量配置中经济性、可靠性与低碳性的动态关系。

表 2 不同方案场景配置

方案	优化倾向	参数特征	适用场景
1	高可靠性优先	LCOE≈1500 元/kWh LPSP≈5%	对供电稳定性要求高的地区(经济强县)
2	均衡性配置	LCOE≈1300 元/kWh LPSP≈10%	兼顾经济性与可靠性(农业主导县)
3	低成本优先	LCOE≈1000 元/kWh LPSP≈25%	初始投资受限的贫困县或低负荷密度区域(偏远贫困县)

通过对县域微电网光储容量优化配置的研究, 构建了综合考虑投资成本、运行成本的优化模型, 并利用 NSGA- II 优化算法求解。算例分析表明, 合理配置光储容量能显著提升县域微电网的运行性能和经济效益, 实现能源的高效利用与清洁发展, 但仍需通过算法创新与政策协同实现更低成本的可靠性提升。未来研究可聚焦不确定性建模与多能互补技术, 推动平准化度电成本与缺电概率均减少。

县域微电网光储容量的优化不仅是一场技术与经济的博弈, 更是对可持续发展智慧的考验。唯有在精准建模中包容不确定性, 在政策设计中嵌入灵活性, 方能在乡村振兴与碳中和的交汇点上, 点亮绿色发展的星火。

参考文献

- [1] 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(05):49-57.
- [2] 陈景文.光储直流微电网容量优化配置与协调控制策略研究[D].陕西:陕西科技大学,2020.
- [3] 唐洪伟,于涛,王玥沁,等.基于改进遗传算法的微电网负荷优化分配方法[J].电气技术与经济,2025,(02):316-318+321.
- [4] 谢菁,吴政声,万航羽,等.微电网风光储容量优化配置[J].云南电力技术,2024,52(04):19-24.
- [5] 周楠,樊玮,刘念,等.光伏微电网的多主体合作运营模式及效益分配[J].电网与清洁能源,2016,32(5):134-141.
- [6] 本刊编辑部.国家能源局发布《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》[J].农村电气化,2015,(09):1.
- [7] 付保川,朱建业,魏良江.光伏微电网出力不确定性应对方法综述[J].苏州科技大学学报(自然科学版),2024,41(04):51-59.
- [8] 谭岭玲,李欣然,陈辉祥,等.多能互补型微电网储能配置及优化[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(12):66-72.
- [9] 张奎仲.双碳背景下新型工商业园区光储充微电网系统[J].电气时代,2025,(01):42-44.
- [10] 刘姝,赵闯,邹文广,等.基于MILP的园区微电网风光储协调优化配置[J].东北电力技术,2024,45(12):5-10.
- [11] 赵娜,张莲,李多,等.基于改进蜜獾算法的风光氢储微电网容量优化配置方法[J].电气工程学报,2025,20(01):338-351.
- [12] 周保志.光储联合发电系统的控制及储能容量优化研究[D].中国矿业大学,2023.
- [13] 王广玲.微网风光储容量优化配置[D].北方工业大学,2021.