

[分布式光伏]

考虑新能源设备经济特性的村级微电网发展研究

文/庞清仑 李孟山
国家电投集团综合智慧能源有限公司

搭建以用电成本最低为目标的优化模型，并以某村实际负荷数据为基础进行仿真模拟，得到最佳容量的光伏和储能设备，在不向电网反送电的情况下使用电成本达到最低，并进一步分析光伏和储能全寿命周期成本变化对村级微电网用电成本的影响。对于从全国层面推广微电网的发展具有一定参考意义，为乡村振兴提供切实保障。

近年来，分布式新能源装机容量快速提升，其出力的随机性和不确定性给电网稳定运行带来更高的考验，电力系统对分布式新能源的就地消纳能力提出更高的要求。随着“千乡万村驭风行动”和“千家万户沐光行动”的展开，农村新能源的发展进一步提速，分布式新能源的本地消纳能力更加重要。

微电网是解决大规模分布式可再生能源消纳，降低其出力随机性和不可预测性对电网带来的冲击，保障区域内负荷供电可靠性的有效手段，因而必将成为未来能源互联网的重要组成部分。

光伏和储能设备是微电网系统的必要组成部分，其高昂的成本限制微电网的发展。近年来，随着技术的进步，光伏组件和储能成本快速下降，使得微电网的推广成为可能。微电网的发展可以为分布式光伏的消纳提供空间，同时用电成本的下降有助于降低村民用电成本，有利于农村产业发展，促进乡村振兴。

现有研究考虑工业负荷可调节特性、多元负荷特性^[1-2]的，多集中于园区类综合智慧能源系统场景的优化控制和仿真研究^[3-6]，对于乡村场景的研究较少。部分学者研究孤网运行情况下的新能源规划配置情况^[7-8]，该模式对电网安全性要求较高，但忽略电网运行的经济性。董京^[9-11]等学者初步考虑光储

经济性，从农村微电网的光伏消纳率和供电可靠性角度进行了研究。

较少有学者关注乡村区域微电网的优化调度以及需求，本文搭建以用电成本最低为目标的优化模型，以某村实际负荷数据以及河南省网购电价为边界条件，仿真计算得到最佳容量的光伏和储能设备，在不向电网反送电的情况下使用电成本达到最低，并进一步分析新能源设备造价变化对微电网用电成本的影响。

微电网光储配置优化模型

1. 村级微电网

对于村级微电网而言，其用电来源有两种：一是微电网内的光伏和储能设备；二是通过上网网购电量。村级微电网示意图如图1所示。

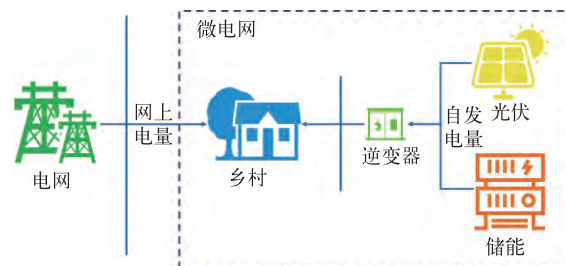


图1 村级微电网示意图

光伏电站所发电量如有剩余,则通过储能设备存储,在其余时段满足乡村用能需求,以实现乡村用能的低碳化、低价化。

2. 村级微电网模型假设条件

本文所提村级微电网模型基于以下假设条件构建:①光伏和储能所发电量只供应乡村直接用电,不向电网反送电量;②村光储供电电价为0.5元/(kW·h),网购电电价为0.56元/(kW·h);③光储一体化所供应电量超过乡村整体用电的80%;④将光伏设备运行寿命25年作为仿真周期。

3. 数学模型

(1) 目标函数

村级变压器容量通常为50~400 kV·A,安装光储系统需根据实际负荷需求进行对比分析,避免过载或资源浪费,同步配置智能管理系统,实现充放电与变压器负荷的动态平衡。

本文构建模型以平均用电成本最小为目标,考虑光资源条件、负荷曲线、储能设备充放电效率等约束,目标函数为

$$C_{\text{average}} = \frac{(C_{\text{sale}}Q_1 + C_{\text{purchase}}Q_2) + (C_{\text{solar}}P_{\text{solar}} + C_{\text{storage}}Q_{\text{storage}} + P_{\text{operation}})}{Q_1 + Q_2}$$

式中, Q_1 为微电网自发电量; C_1 为微电网供电电价; Q_2 为上网购电电量; C_2 为上网购电电价。

(2) 约束条件

本文所构建的模型主要考虑光伏发电约束、储能充放电约束、负荷实时平衡约束。

1) 光伏发电约束

$$P_i^{\text{solar}} < P_i^{\text{solar.pre}}$$

2) 储能充放电约束

$$\text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) + \eta_{\text{charge}} P_i^{\text{storage.charge}} + \eta_{\text{discharge}} P_i^{\text{storage.discharge}}$$

$$\text{SOC}(\min) < \text{SOC}(t) < \text{SOC}(\max)$$

$$P_i^{\text{storage.charge}} P_i^{\text{storage.discharge}} = 0$$

$$0 < P_i^{\text{storage.charge}} < P_{\text{max}}^{\text{storage.charge}}$$

$$0 < P_i^{\text{storage.discharge}} < P_{\text{max}}^{\text{storage.discharge}}$$

3) 负荷平衡约束

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{8760} P_i^{\text{solar}} + \sum_{i=1}^{8760} P_i^{\text{storage.discharge}}$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{8760} P_i^{\text{grid}}$$

$$L_i = P_i^{\text{solar}} + P_i^{\text{storage.charge}} + P_i^{\text{storage.discharge}} + P_i^{\text{grid}}$$

4) 光储发电量约束

$$Q_1 \geq 0.8Q$$

(3) 求解算法

本文提出的优化模型为多目标非线性规划模型,考虑到改进粒子群算法的全局寻优能力,使用粒子群优化算法对优化模型进行求解,得到光伏和储能的配置方案。

1) 设初始种群数为100,各时段光伏机组容量、储能设备容量的位置变量为X11-X1T, X21-X2T,各时段的机组变化量为V,速度序号为V11-V1T, V21-V2T。

2) 对每个粒子进行随机初始化。

3) 计算目标函数值并与上一代的值进行比较,更新个体最优值 g_i 和全局最优值 m 。

4) 根据目标函数的适应度更新搜索速度和位置,具体为

$$V_{i,j}^{t+1} = V_{i,j}^t + c_1 r_1 (P_{i,j} - X_{i,j}^t) + c_2 r_2 (g_j - X_{i,j}^t)$$

式中, $X_{i,j}^t$ 和 $V_{i,j}^t$ 分别为第 t 次迭代后第 i 个粒子在第 j 维的位置和速度; $P_{i,j}$ 为 i 个粒子在第 j 维的最优值; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为区间0~1上服从随机分布的随机数。

5) 判断是否达到最大迭代次数,若达到则结束计算,输出全局最优值。

计算流程如如图2所示。

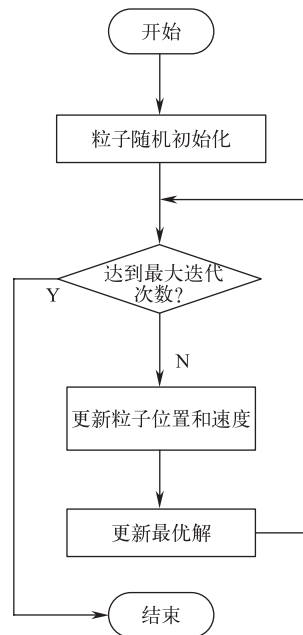


图2 计算流程图

规划仿真结果分析

利用北方农村典型负荷曲线趋势作为输入条件，采用上述模型，光伏全寿命周期成本（含设备购置、工程安装及手续费用等）按照2.5元/kW·h，储能全寿命周期成本按照0.8元/W·h，乡村年用电量按照94万kW·h考虑，电网购电价格求解得到配置方案见表1。

表1 配置方案

单项名称	方案
用电负荷/（kW·h/年）	943 550.22
负荷自用电率（%）	72.35
光伏容量/kW	799.2
储能容量/[kW/（kW·h）]	600/1 200
光伏发电量(首年)/（kW·h/年）	957 729
电网购电量/（kW·h/年）	172 526
弃电量/（kW·h/年）	144 901
弃电率（%）	12.8
储能累计充电量/（kW·h/年）	419 552
储能累计放电量/（kW·h/年）	394 322
储能损耗电量/（kW·h/年）	32 060
首年无衰减可利用小时数/h	1 200

该模式下乡村用电成本为0.52元/（kW·h），全年光伏和储能运行曲线如图3所示。

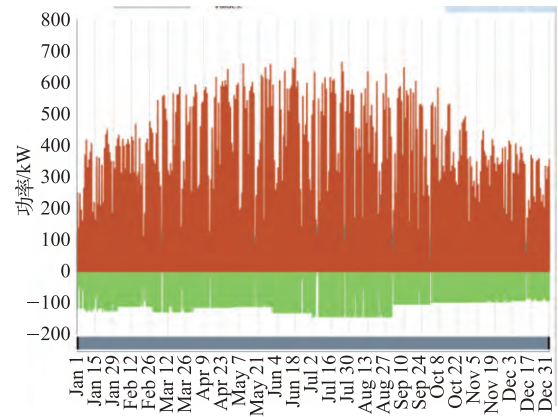


图3 全年光伏和储能运行曲线

某一周的“光伏+储能+负荷+电网购电”曲线如图4所示。

从图4中可以看出，为实现用电成本最低，光伏配置容量偏大，在光伏大发时刻，其发电功率远远大于负荷所需，此时储能尽可能充电以消纳光伏电能，并在光伏未发电时段放电以供给乡村负荷。

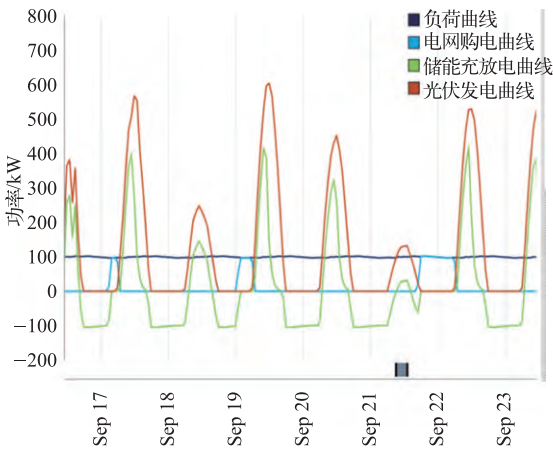


图4 某一周的“光伏+储能+负荷+电网购电”曲线

运行成本分析

1. 全寿命周期成本敏感性分析

进一步考虑光伏和储能全寿命周期成本的变化对光伏和储能容量配置的影响。

（1）光伏全寿命周期成本敏感性分析

分别对光伏的全寿命周期成本在现有基础上提高10%和降低10%情况下的容量配置进行了仿真，仿真结果见表2。

表2 仿真结果

单项名称	10%	-10%
光伏容量/kW	703.3	841.557 6
储能容量/（kW/kW·h）	528/1 056	800/1 600
光伏发电量(首年)/（kW·h/年）	842 801.5	1 008 488.637
电网购电量/（kW·h/年）	171 544.0	83 511.110 37
弃电量/（kW·h/年）	70 795.3	148 449.527 4
弃电率（%）	8.4	14.72
储能累计充电量/（kW·h/年）	384 309.6	48 2484.8
储能累计放电量/（kW·h/年）	361 199.0	453 470.3
储能损耗电量/（kW·h/年）	23 110.7	29 014.5

通过以上仿真可以看出，在光伏全寿命周期成本提高10%之后，光伏容量降低了12.3%，新能源消纳率提高了4.4%；光伏全寿命周期成本降低10%后，光伏安装容量提高了5.3%，新能源消纳率提高了6.32%。

（2）储能全寿命周期成本敏感性分析

分别对储能的全寿命周期成本在现有基础上提高10%和降低10%情况下的容量配置进行了仿真，仿真结果见表3。

表3 仿真结果

单项名称	10%	-10%
光伏容量/kW	736	820.0
储能容量/(kW/kW·h)	540/1080	612/1224
光伏发电量(首年)/(kW·h/年)	881 992.6	982 654.9
电网购电量/(kW·h/年)	172 688.6	43 379.4
弃电量/(kW·h/年)	111 131.0	82 484.1
弃电率(%)	12.6	12.78
储能累计充电量/(kW·h/年)	385 987.8	423 747.5
储能累计放电量/(kW·h/年)	362 776.2	398 265.2
储能损耗电量/(kW·h/年)	23 211.6	25 482.3

仿真结果表明，储能全寿命周期成本在提高10%之后，光伏安装容量降低7.9%，新能源消纳率降低0.2%；储能全寿命周期成本降低10%后，光伏容量提高2.6%，新能源消纳率降低0.02%。

结束语

仿真研究表明，光伏与储能系统的经济性参数对村级微电网发展具有关键性制约作用。当新能源设备全寿命总成本下降10%时，系统新能源渗透率可提升12~18个百分点，户均用电成本可降低0.03~0.05元/(kW·h)，但新能源消纳率将同步下降6~9个百分点。研究数据表明，储能系统通过时间平移特性提升光伏消纳能力，其配置容量与负荷特性的匹配度直接影响系统运行经济性。

值得注意的是，本研究所构建的100~300 kW级微电网模型主要面向低负荷密度村落。针对南方乡村地区普遍存在的农副产品加工等高耗能场景，其10 kV配电变压器容量普遍达到2 000 kV·A以上，具备发展分布式风电的潜力。仿真数据显示，在相同投资规模下，风电-储能联合系统的平准化度电成本较光伏系统低0.05~0.08元/kW·h，且其反调峰特性可与光伏形成有效互补。

从发展前景分析，随着全国统一电力市场体系建设推进，村级微电网集群可通过虚拟电厂形式参与调频、备用等辅助服务市场。此外，碳市场机制的完善将为乡村微电网带来新的减排收益渠道，预计每兆瓦时新能源发电量可产生50~80元的碳汇收益。

最后，本文着重探讨新能源系统全生命周期成本变化对微电网发展的影响，而非单纯关注组件价格波动。建议采用系统化成本优化策略，通过标准

化设计降低非技术成本占比，而非陷入低质低价竞争。数据显示，当非技术成本占比从35%降至20%时，项目内部收益率可提升2.3~3.1个百分点，这将为乡村振兴背景下的新能源投资创造更可持续的发展模式。EA

(收稿日期：2025-05-12)

参考文献

[1] 张光儒, 张家午, 范迪龙, 等. 电动汽车充放电对直流微电网稳定性影响分析[J]. 电力电子技术, 2025, 59(4): 94-99.

[2] 邓振宇, 张润之, 张文韬, 等. 风光电解水制氢平准化成本优化空间分析[J]. 广东电力, 2024, 37(7): 22-31.

[3] 龙敏. 工业微电网筑基零碳园区[N]. 中国信息化周报, 2025-04-21(008).

[4] 黎佳涛, 张少敏, 王保义. 基于区块链的多微电网跨链电力交易用户隐私保护方案[J/OL]. 电力科学与工程, 1-11[2025-05-11].

[5] Kang N J, Liu L, Liu L, et al. Operation strategy for a net-zero emissions park microgrid with multi-stakeholders: A multi-objective with bi-level optimization approach[J]. Energy, 2025. 135524.

[6] Ameresco Awarded 10-MW Slemon Park Microgrid Project[J]. Wireless News, 2022,

[7] 雷基林, 余林兴, 别玉, 等. 孤岛微电网能量管理系统研究综述[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 370-385.

[8] 杨涛, 崔国亮. 离网型风光柴储微电网容量优化配置研究[J/OL]. 石油石化绿色低碳, 1-8[2025-05-11].

[9] 董京, 何武, 刘雪飞, 等. 基于合作联盟的农村微电网光储协同配置与收益分配策略[J/OL]. 电力自动化设备, 1-22[2025-05-11].

[10] 张雄, 宋海博, 何玉灵, 等. 基于主从博弈的有源配电网多利益主体协同优化[J]. 电力科学与工程, 2025, 41(4): 52-62.

[11] 张静, 熊国江. 基于两阶段调度策略的多端柔性配电网运行优化方法[J/OL]. 电子科技, 1-10[2025-05-11].