文章编号：1003-0417(2020)11-44-05

户用光伏＋储能系统的容量配置及经济性计算方法研究

蒋建彗*，倪志春，陈成锦，蔡　霞，钱洪强，胡雷振，
余　嫦，石　刚，曹海波，陆文华，吴　镇
（苏州腾晖光伏技术有限公司，常熟　215542）

摘　要：首先介绍了户用光伏＋储能系统的市场现状，分析了此类系统的工作模式，并根据用户的用电需求、项目所在地的电价及补贴政策提出了在 3 种工作模式时系统的容量配置；最后，对系统的工作模式进行经济性分析，从中选出最优经济性方案。计算过程中简化了系统模型，给出适用于不同电价及补贴政策地区的通用计算方法，方便设计人员进行户用光伏＋储能系统的设计与工作模式的选择。

关键词：户用；光伏＋储能系统；容量配置；经济性计算；工作模式
中图分类号：TM615　　**文献标志码**：A

0 引言

随着光伏产业的技术发展及国家补贴政策的变化，近几年光伏组件的价格快速下降，特别是在“531 政策”之后，光伏产业陷入空前低迷的同时，也进一步促使了光伏组件价格的下降。而组件价格的降低使户用光伏发电系统迎来了春天。对于农村用户和别墅用户而言，光伏组件价格的降低使用户从原来的高投入转变为现在的低投入、高回报[1]；与此同时，2019 年发布的光伏新政对于户用光伏发电系统补贴的单独划分，更大地刺激了户用光伏市场的发展，户用光伏发电系统的用户可灵活选择“自发自用，余量上网”或“全额上网”模式，使经济收益最大化。

将光伏发电与储能系统相结合是光伏产业未来的发展方向之一。自 2018 年起，我国锂电池技术的提升使储能电池的成本大幅下降，使光伏发电与储能系统的结合具有较好的经济性。近两年，在光伏技术发展较快的德国、意大利等欧洲国家，以及居民电价较高的澳大利亚，户用光伏＋储能系统得到迅速发展，且这些国家针对户用光伏＋储能系统提供了各种优惠及补贴政策，极大地促进了户用光伏＋储能系统的发展。

目前我国尚无专门针对户用光伏＋储能系统的相关政策，但是由于大型集中式或商业型光伏发电系统与储能结合的方式对电网起到了提高电能质量、减少光伏发电系统对电网的冲击、降低电网峰谷用电差值等作用，可以看出光伏＋储能系统结合应用的方式具有一定优点；且可通过灵活调节系统工作模式[2]，使采用该系统的用户的经济性最大化，并保障了用户用电的稳定性。比如，当电网断电时，用户可使用储能系统为常用电器供电，实现电器不断电。综上，“光伏＋储能”的方式具有良好的应用前景。

本文以户用光伏＋储能系统在国内外的快速发展为背景，针对目前国内户用光伏＋储能系统还未有较为系统的容量配置及经济性计算方法的现状，根据户用光伏+储能系统的不同工作模式[3]，提出了一种户用光伏＋储能系统的容量配置及经

收稿日期：2019-12-11
通信作者：蒋建彗 (1991—)，男，硕士、中级工程师，主要从事光伏及其储能系统的开发与设计。jianhui.jiang@talesun.com

2020-11杂志.indd　44　　2020-11-26　09:12:09

济性计算方法。

1 户用光伏 + 储能系统的工作模式介绍

现有的户用光伏 + 储能系统的发展已相当成熟，该系统主要由光伏阵列、储能逆变器、储能电池、双向电表及负载组成。其中，储能逆变器包含光伏控制器、双向逆变器和双向充电器等部分[4]。户用光伏 + 储能系统的原理图如图 1 所示。

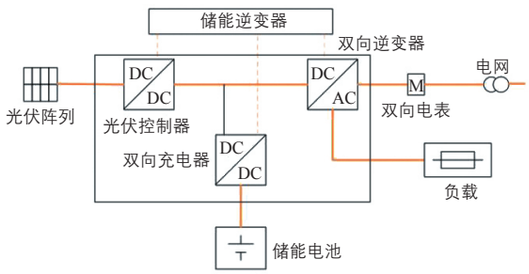


图 1 户用光伏 + 储能系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of household PV+ storage energy system

户用光伏 + 储能系统中储能系统的核心部件是储能电池与储能逆变器。常用的户用型储能系统主要包括铅酸电池和锂电池 2 种，从安全性的角度考虑，铅酸电池更加稳定、安全；从能量密度、体积、美观性的角度考虑，锂电池则更具有优势，且锂电池中的磷酸铁锂电池也能够满足户用光伏 + 储能系统对安全性的要求。随着近两年锂电池成本的快速下降及客户对美观性需求的提升，预计未来锂电池将成为储能电池的主要选择。储能逆变器是户用光伏 + 储能系统的核心控制部件，其主要控制光伏发电系统交、直流电量转换，储能电池的充、放电量，上网电量等；通过调整储能逆变器，户用光伏 + 储能系统可设置成不同的工作模式，以适用于不同的场景[5]。其主要的工作模式有：

1) 通用模式。本工作模式的工作原理是：负载优先、电池次之、余量上网。即若户用光伏 + 储能系统中有负载工作时，光伏发电系统的发电量优先供给负载使用，若光伏发电系统的发电量小于负载所需电量，则需要由储能电池供给其余所需电量，但如果此时储能电池无多余电量，则需要由电网供给；若光伏发电系统的发电量大于负载所需电量，则多余电量会优先供给储能电池，为储能电池进行充电，若储能电池电量已满，此时多余电量将会供给电网，即所谓的“余量上网”模式。

2) 经济模式。本工作模式的工作原理是：谷值电价时充电，峰值电价时放电。针对采用峰谷电价的国家或地区，可对户用光伏 + 储能系统进行充、放电时间设置，当电价处于谷值时，户用光伏 + 储能系统从电网调电为储能电池充电；当电价处于峰值时，户用光伏 + 储能系统从储能电池放电，以供负载使用或进行上网。该模式不仅可以充分利用峰谷电价差值使经济性最大化，同时对电网还具有削峰填谷的作用，优化电网供电的稳定性。但经济模式应用的前提是当地居民电价采用峰谷电价，且峰谷电价差值越大，该模式的经济性就越好；与此同时，补贴也是影响经济收益的重要因素之一。因此采用该模式时，经济收益与国家或地区的电价及补贴政策密切相关。

3) 离网模式。该模式主要是针对偏远及海岛等与大电网隔绝的地区，因此该模式的使用具有一定局限性，且户用光伏 + 储能系统的容量配置主要是依据当地的用电情况及连续阴雨天数而定。在对系统进行设计时，需要满足离网用户的日常用电需求，所有用电量均由光伏发电系统提供，若光伏发电系统的发电量大于负载用电量，则多余电量可为储能电池充电；若储能电池满电，则多余电量便会浪费。因此，户用光伏 + 储能系统在采用本模式时，首先要考虑系统的最佳容量设计。

上述户用光伏 + 储能系统通常具备的 3 种工作模式中，通用模式和经济模式可依据不同地区的上网电价、用电成本、电价政策、补贴标准、用户用电量及用电规律进行灵活选择；而离网模式由于应用条件受限，很难得到大规模地推广。因此，本文重点分析通用模式及经济模式下户用光伏 + 储能系统的容量配置。

2020-11杂志.indd　45　　2020-11-26　09:12:10

2 户用光伏 + 储能系统的容量配置方法

设计户用光伏 + 储能系统时，应依据不同地区的电价及补贴政策，以及不同用户的用电情况进行针对性设计。关于大型集中式或商业型光伏 + 储能系统容量配置的文献通常以电网的稳态为约束条件进行容量配置设计，但本文的研究方向是户用光伏 + 储能系统，由于户用光伏发电系统的光伏装机容量较小，最大光伏装机容量不超过 100 kW，因此其对电网稳态的影响可以忽略不计。因此，本文旨在为用户找到一种简单的进行户用光伏 + 储能系统容量配置，并保证用户的经济收益最大化的方法。

户用光伏 + 储能系统在进行容量配置时，首先要对项目地基本信息进行搜集，完成后，还需依据不同工作模式分别设计不同的容量配置方案作为待选，然后依据不同容量配置方案时的经济性分析结果来最终确定最优容量配置方式。下文对户用光伏 + 储能系统的容量配置流程进行详细介绍。

2.1 搜集项目地的居民电价及补贴政策

搜集项目地的居民电价及补贴政策 [6] 主要涉及是否执行峰谷电价、峰谷电价差值是多少、是否执行阶梯电价、补贴标准是多少，并利用专业软件计算出项目地的日均峰值日照小时数 h，以便于后面计算光伏发电系统的发电量。

根据项目地的居民电价及补贴政策来决定户用光伏 + 储能系统采用何种工作模式，一般的原则为：若当地无峰谷电价，则采用通用模式；若当地具有明确的峰谷电价，且差值较大，则选择经济模式；若当地为偏远地区，无电网，则只能选择离网模式进行设计。

2.2 调查用户的用电情况及用电规律

调查用户的用电情况及用电规律，主要包括用户的日用电量 P、日用电规律等基本信息；并依据日用电量进行光伏发电系统及储能电池的容量设计，设计原则为：在考虑光伏发电系统光电转换效率的前提下，保证用户的基本用电需求。

2.3 依据调研结果进行不同方案的容量配置设计 [7]

依据上述调研结果，结合不同的工作模式，对光伏 + 储能系统进行不同容量配置方案设计。

2.3.1 采用通用模式时的容量配置方案设计

1) 首先进行光伏发电系统的容量设计。在不超过户用光伏发电系统最大装机容量 100 kW 的前提下，光伏发电系统的容量 W 至少应满足：

$$W>\frac{P}{PR\bullet h} \tag{1}$$

式中，PR 为户用光伏 + 储能系统直流端到交流端的系统转换效率，该值的经验值选取范围为 80%～85%。

2) 其次进行储能电池的容量设计。储能电池的容量 V，需满足：

$$V=\frac{P_{夜}}{\omega\mu\varepsilon} \tag{2}$$

式中，$P_{夜}$为用户的夜间用电量 (夜间用电时段以各地电价政策为准)；ω 为储能电池的放电效率，即双向逆变器的工作效率；μ 为储能电池的能量转换效率，即储能电池放出电量与储能电池充入电量的比值；ε 为储能电池的放电深度，即储能电池放电量与储能电池额定容量的百分比。

2.3.2 采用经济模式时的容量配置方案设计

当项目地的居民电价有明确峰谷电价时，可考虑采用经济模式，然后将经济模式与通用模式进行经济性对比分析，选择更优的容量配置方式。一般而言，峰谷电价差值越大，户用光伏 + 储能系统的经济性越好，此时更适合使用经济模式。

1) 首先进行光伏发电系统的容量设计。在不超过户用光伏发电系统最大装机容量 100 kW 的前提下，此时 W 至少应满足：

$$W>\frac{P-V}{PR\bullet h} \tag{3}$$

2) 其次进行储能电池的容量设计，此时 V 需满足：

$$V>\frac{P_{夜}}{\omega\mu d} \tag{4}$$

式中，d 为连续阴雨天气时希望储能系统能够保证用户电器正常运行的天数，一般依据当地

2020-11杂志.indd 46　　2020-11-26 09:12:10

气候条件并结合用户要求来确定。

需要说明的是，公式 (4) 中左右两侧的关系为大于而不是等于，这主要是因为在经济模式下，储能电池的容量首先应满足用户最基本的用电需求，然后再根据项目特点及用户要求进行一定的调整。但容量变化后的经济性需结合后文的经济性计算方法进行比较分析，然后再选择合适的容量。

3 户用光伏 + 储能系统的经济性计算 [8]

在完成不同工作模式下户用光伏 + 储能系统的容量配置方案设计后，需对几种待选方案进行经济性验证，用户可根据经济性计算结果最终选择最具经济性的系统工作模式及容量配置。户用光伏 + 储能系统的经济性计算思路流程图如图 2 所示。

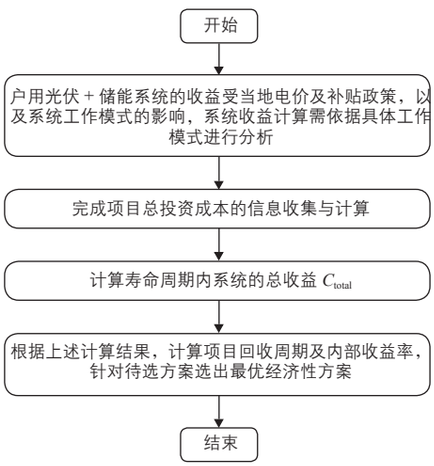


图 2　户用光伏 + 储能系统的经济性计算思路流程图

Fig. 2　Economic calculation thought flow chart of household PV + storage energy system

本文依据国内外的电价特点，对户用光伏 + 储能系统的经济性计算方法进行了简化，依据不同工作模式，给出推算户用光伏 + 储能系统经济收益的简单方法。

3.1 通用模式下系统的月收益

为提高能源利用效率，国家对居民用电实行阶梯电价。阶梯电价是指将户均用电量设置为若干个阶梯，分段或分档次定价计算电费。

通用模式下的户用光伏 + 储能系统的月收益 C 的计算公式为：

$$C=Q_1(E_1+S)+Q_2(E_2+S)+Q_3(E_3+S)+Q(E+S) \quad (5)$$

式中，Q_1 为第 1 阶梯自用光伏电量；Q_2 为第 2 阶梯自用光伏电量；Q_3 为第 3 阶梯自用光伏电量；E_1 为第 1 阶梯电价；E_2 为第 2 阶梯电价；E_3 为第 3 阶梯电价；Q 为上网电量；S 为光伏电价补贴；E 为当地脱硫燃煤电价。

公式 (5) 为考虑阶梯电价因素后进行的收益计算，若用户用电量仅达到 Q_2，那么 Q_3 的取值为零，并不影响计算结果；同时，本公式未考虑峰谷电价差值。

3.2 经济模式下系统的月收益

存在峰谷电价差值且差值较大时，户用光伏 + 储能系统在经济模式下具有更好的经济效益。该模式下系统的月收益 C 的计算公式为：

$$C=Q_1(E_1+S)+Q_2(E_2+S)+Q_3(E_3+S)+V(P_{峰}-P_{谷})+Q(E+S) \quad (6)$$

式中，$P_{峰}$为峰值电价；$P_{谷}$为谷值电价。

公式 (6) 综合考虑了峰谷电价差值及阶梯电价因素，是较为详细的收益计算方法。

3.3 户用光伏 + 储能系统投资的可行性分析

为了研究户用光伏 + 储能系统投资的可行性，完成公式 (5)、公式 (6) 的计算后，可进一步进行如下计算：

1) 计算户用光伏 + 储能系统总投资成本 I。

2) 计算寿命周期内系统的总收益 C_{total}，计算公式为：

$$C_{total}=12Cn-I \quad (7)$$

式中，n 为系统的寿命周期。

3) 根据上述计算结果，最终计算得出项目回收周期及内部收益率，选择项目回收期最短或内部收益率最高的系统容量配置方案。

4 结论

本文根据户用光伏 + 储能系统的市场现状，结合现有户用光伏 + 储能系统的工作模式，从用

2020-11杂志.indd　47　　2020-11-26　09:12:10

户经济收益最大化的角度，介绍了户用光伏＋储能系统的容量配置方式，并提供了简单的经济性计算方法。得到如下结论：

1) 户用光伏＋储能系统的工作模式主要有通用模式、经济模式及离网模式 3 种，模式的选择需依据当地的电价及补贴政策，以及峰谷电价差值，并针对经济性计算结果进行选择。

2) 户用光伏＋储能系统进行容量配置时，除需考虑不同地区的电价及补贴政策、用户用电需求等基本信息外，还可结合各方案的经济性计算结果，选取最具经济性的工作模式。一般而言，峰谷电价差值较大的地区，更适合采用经济模式；无峰谷电价差值时，电价越高的地区，越适合采用通用模式。

3) 由于相较于其他大型集中式或商业型光伏发电系统，户用光伏发电系统对电网的稳态影响很小，因此本文未考虑户用光伏＋储能系统并网时电网对储能系统的限制，简化了计算模型，提供了一种更直观、更简单的户用光伏＋储能系统的容量配置方法。

[参考文献]

[1] 杨昭 . 户用光伏发电系统的容量配置和能量管理策略研究 [D]. 秦皇岛 : 燕山大学 , 2013.

[2] 吕双辉 . 分布式光伏与储能系统的经济性分析与政策研究 [D]. 天津 : 天津大学 , 2014.

[3] 苏剑 , 周莉梅 , 李蕊 , 等 . 分布式光伏发电并网的成本 / 效益分析 [J]. 中国电机工程学报 , 2013, 33(34): 50 － 57.

[4] 吕双辉 , 蔡声霞 , 王守相 . 分布式光伏 - 储能系统的经济性评估及发展建议 [J]. 中国电力 , 2015, 2(2): 13 － 144.

[5] 孙波 , 廖强强 , 刘宇 . 分布式光伏储能电池混合系统的经济性分析 [J]. 电力建设 , 2016, 37(8): 102 － 107.

[6] 李欣然 , 姜学皎 , 钱军 , 等 . 基于用户日负荷曲线的用电行业分类与综合方法 [J]. 电力系统自动化 , 2010, 34(10): 56 － 61.

[7] LEMAIRE-POTTEAU E, MATTERA F, DELAILLE A, et al. Assessmentof storage ageing in different types of PV systems technical and economical aspects[C]//24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, September 21-25, 2009 , Hamburg, Germany, 2009.

[8] 吴琼 , 任洪波 , 高伟俊 , 等 . 基于动态负荷特性的家用光伏发电系统经济性评价 [J]. 可再生能源 , 2014, 32(2): 133 － 138.

CAPACITY CONFIGURATION AND ECONOMIC CALCULATION OF HOUSEHOLD PV + STORAGE ENERGY SYSTEM

Jiang Jianhui，Ni Zhichun，Chen Chengjin，Cai Xia，Qian Hongqiang，Hu Leizhen，Yu Chang，Shi Gang，Cao Haibo，Lu Wenhua，Wu Zhen

(*Suzhou Talesun Solar Technologies Co.，Ltd.，Changshu* 215542，*China*)

Abstract：Firstly，the market status of household PV + storage energy system is introduced，the working mode of the system is analyzed，and three working modes of the system are proposed according to the electricity demand of users，the electricity price of the project location and the subsidy policy；Mode carries on the system capacity configuration；Finally，carries on the economic analysis of working modes of system，chooses the most economical mode from among them. In the calculation process，the system model is simplified，and a general calculation method suitable for different electricity price and subsidy policy regions is given，which is convenient for designers to design and work mode selection of household PV+ storage energy system.

Keywords：household；PV + storage energy system；capacity configuration；economic calculation；working mode

2020-11杂志.indd 48　　2020-11-26 09:12:10