

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210173

计及社会发展的多场景用户侧储能容量优化配置

史林军¹, 杨帆¹, 刘英², 吴峰¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 湖北白莲河抽水蓄能有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 在能源革命的大背景下, 用户侧配置储能由于可有效地转移负荷, 减少用电峰谷差异, 降低用户用电成本, 因此在近些年来得到广泛运用。但由于储能系统本身价格较为高昂, 如何优化配置储能容量成为关键问题之一。首先, 基于用户侧两部制电价制度, 计及社会发展对储能的影响, 以用户加装储能后获取月综合效益最大为目标建立储能优化配置模型。然后, 考虑到节假日和天气状况等因素, 提出了一种适用于多场景的用户侧储能配置决策方法, 以满足用户侧储能配置的个性化需求。最后, 选取4家典型的大用户的历史负荷数据进行算例仿真, 利用CPLEX求解器进行求解, 分析探讨了储能配置的合理性和经济性。仿真结果表明, 该储能优化配置方法在提高模型精度的同时能进一步提高配置经济性, 为不同用户侧储能的商业化应用提供借鉴。

关键词: 社会发展; 电池储能; 配置优化; 多场景; 用户侧

Multi-scenario user-side energy storage capacity optimization configuration considering social development

SHI Linjun¹, YANG Fan¹, LIU Ying², WU Feng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Hubei Bailianhe PSP Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: Energy storage on the user side has been widely considered and used in recent years because it can effectively transfer load, reduce the difference in power consumption between peaks and valleys, and reduce user electricity costs. However, because the energy storage system itself is relatively expensive, how to optimize the allocation of energy storage capacity has become one of the key issues. First, based on the user-side two-part electricity price system, an energy storage optimization configuration model is established with the goal of obtaining the maximum monthly benefits after installing. This considers the impact of social development on energy storage. Then considering factors such as holidays and weather conditions, a user-side energy storage configuration decision-making method suitable for multiple scenarios is proposed to meet the individual needs of users. Finally, the historical load data of four typical users are selected for simulation with CPLEX solver, and the rationality and economy of the energy storage configuration are analyzed and discussed. The simulation results show that the optimization configuration method can improve the economy and the accuracy of the model, and it also provides a reference for the commercial application of energy storage by different users.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China for International Cooperation and Exchanges (No. 52061635102) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52573520000F).

Key words: social development; battery energy storage; configuration optimization; multi-scenario; user side

0 引言

近年来, 随着我国经济的迅猛发展, 电力工业

也顺应经济的发展逐渐壮大, 用户侧用电的需求量也随之增加^[1]。对于大部分工业大用户来说, 不同时段用电量的差异明显, 增大了峰谷差, 不利于电网的经济运行^[2-3]。因此, 为解决这一问题, 可引导用户在用户侧加装储能。通过用户侧储能, 实现合理分配用电负荷^[4-7], 达到降低投资运营成本以及削

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061635102); 国家电网公司科技项目(52573520000F)

峰填谷的目标,这对于电力工业的发展和电网公司优化分配资源都具有重要的社会意义和研究价值^[8-10]。但由于目前储能电池成本较高,用户难以承担储能高额的投资成本以及之后的运维成本。因此,研究和探讨用户侧储能容量的优化配置,具有重要的意义。

目前,对于储能配置优化的研究可以分为用户侧和电网侧。电网侧储能配置方面,文献[11]从配电网运营商的角度对储能的最优容量和日前调度做了研究,将电池储能分为稳压、降损和削峰三类服务功能,比较了电池储能单独实现一种功能和实现多种功能情况下的容量优化情况。文献[12]同样立足于电网侧,探究了储能电池参与一次调频下的优化配置,从方案的经济性和规划的合理性角度进行了电网侧储能配置优化。文献[13-19]针对含有光能、风能的电网储能系统的优化配置展开研究,以克服因可再生能源出力不稳定而带来的功率波动问题。

由于用户侧储能配置有着更个性化的配置要求,因此上述的电网侧的研究不能直接应用于用户侧。文献[20]从用户需求出发,考虑了电价和用电需求的不确定性,建立了按季节划分典型日的储能优化模型,并对储能改善效果做评估。文献[21]建立了较为全面的储能全寿命周期成本模型,针对储能配置进行了优化,但未考虑到储能运行调度约束对于配置优化的影响;文献[22]提出了环境、效益、经济等多目标结合的储能运行调度优化,但未对储能配置进行优化。文献[23]针对安装储能后通过实时调峰削减电费中的电度电费从而产生削峰填谷收益,但没有考虑到实现实时调峰的同时也会使月用电量降低;文献[24]则只针对了削减月需量从而达到降低基本电费的目的。文献[23-24]没有对调峰产生的削峰填谷收益和减需产生的需量削减收益同时进行考虑。文献[25]在储能配置优化的建模中没有考虑经济发展的因素,没有对今后几年的技术和经济发展所带来的成本降低、收益增加问题进行衡量,并且选取的算例较为单一,没有对多种类型的大用户进行比较。

针对用户侧储能优化配置中存在的问题,本文将基于大用户用电费用的计费规则,考虑社会发展对储能的影响,建立同时考虑调峰和需量削减的储能容量优化配置模型;为进一步提高储能配置的经济性,提出一种考虑天气情况和节假日等诸多场景的储能容量决策方法。通过选取4家典型大用户的历史负荷数据进行算例仿真,验证了优化结果的正确性和合理性,并探究了不同类型用户对于储能配置的差异性和经济性。

1 用户侧加装储能收益及储能运行约束

1.1 用户加装储能收益

对于大用户,电费一般分为基本电费和电度电费两部分^[23-24]。其中对于基本电费而言,收取电费的标准有很多种,目前最普遍的是根据每月最大用电量作为衡量标准,即把需量电费作为基本电费;对于电度电费则通过用户实时的用电量进行计算并收取。

如果用户加装储能,其收益就包括基本电费和电度电费两部分。首先,对于基本电费,利用储能,通过合理的调度分配负荷,改善用户的用电行为,实现了月最大用电量的大幅削减,进而产生需量削减收益。其次,对于电度电费,由于峰谷分时电价制度,加装的储能电池在谷时充电、在峰时放电,利用峰谷电价差异从而实现收益,这一部分称之为削峰填谷收益。将以上两部分收益公式化,如式(1)、式(2)所示。

$$B_j = \alpha(P_{Bmax,j} - P_{Amax,j}) \quad (1)$$

$$B_i = -\sum_{t=1}^{96} P_{ESS,i,t} d_t \Delta t \quad (2)$$

式中: B_j 为第 j 月的需量削减收益; α 为基本电费的单位价格; $P_{Bmax,j}$ 和 $P_{Amax,j}$ 分别为该月加装储能前的用户月最大负荷值和加装储能后可以实现的月最大负荷值,两者的差值即为可以削减的月需量值; B_i 为第 i 天的削峰填谷收益,每日有 96 个时刻点; $P_{ESS,i,t}$ 为第 i 天第 t 个时刻所配置储能的实时运行功率,该功率有正负之分,充电时功率为正,放电时功率为负; d_t 为该日第 t 个时刻所对应的峰谷分时电价; Δt 为两时刻点间的间隔长度。

1.2 储能运行约束

1.2.1 储能实时功率约束

储能电池的实时运行功率不能超过储能的额定功率:

$$-P_N \leq P_{ESS,i,t} \leq P_N \quad (3)$$

式中, P_N 为储能配置的额定功率。

1.2.2 储能电池容量约束

储能电池在工作的每个时刻中其电量应在一定的上限和下限之间。

$$0.17S_N \leq S_{ESS,i,t} \leq S_N \quad (4)$$

式中: $S_{ESS,i,t}$ 为第 i 天第 t 个时刻储能电池的实时电量; S_N 为储能配置的额定容量。

对于电量下限一般不能达到或者很接近零,这是为了保证储能电池安全可靠运行,需要留出一定

的缓冲区域。本文选取的电池荷电量下限为 $0.17S_N$ ，并将该值作为初始荷电量。

1.2.3 储能电池能量倍率约束

储能电池的额定功率和额定容量之间存在一个固定的倍数关系：

$$S_N = \beta P_N \quad (5)$$

式中， β 为储能电池的能量倍率。

1.2.4 用户侧实时功率约束

如图 1 所示，在用户侧加装储能后，经过储能电池的充放电调整，此时的用户侧实际负荷需要在原来未安装储能时的用户负荷基础上叠加一个储能电池的实时出力。

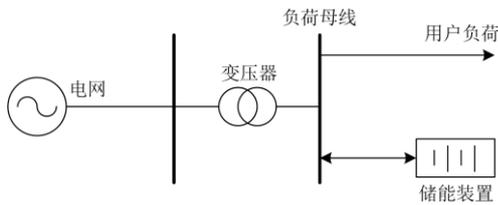


图 1 用户侧加装储能示意图

Fig. 1 Diagram of user-side energy storage system

因此，在储能运行情况下需要对用户历史实际负荷加上储能的实时运行功率的数值进行约束限制。首先，这个值不能小于 0，否则将向电网倒送功率；其次，这个值不能超过用户月最大需量值，即不能超过这个月内负荷的最大值，否则使得削减需量这个优化目标失去效果。约束如下：

$$0 \leq P_{L,i,t} + P_{ESS,i,t} \leq P_{B,max,j} \quad (6)$$

式中， $P_{L,i,t}$ 为该月第 i 天第 t 个时刻点用户的实时负荷。

2 储能配置优化模型及决策方法

2.1 考虑社会发展对储能影响的参数设定

储能电池的成本包含投资时的购买成本和运行时的运维成本。同时，安装储能电池有一定的使用年限，所以其成本是和电池使用寿命密切相关的。而求解的目标是最大的月综合效益，所以将电池成本平摊到每个月。根据相关电池参数可以计算得到月折算储能成本费用 C ，具体的折算公式为

$$C = \frac{c_S S_N + c_P P_N + c_{op} P_N}{12Y} \quad (7)$$

式中： c_S 为储能单位容量每千瓦时的投资单价； c_P 为储能每千瓦的购买单价； c_{op} 为储能每千瓦的运维成本； Y 为储能的寿命，以年为单位。

由于储能电池有一定的使用寿命，本文特别加

入了社会发展对储能的影响系数，用以考虑储能投入后几年内社会发展所产生的费用变化。该参数考虑了社会经济发展中的物价和支付等方面的影响，量化为通货膨胀率和贴现率，以年为单位考虑今后几年的收益变化和运维成本变化。该参数如式(8)所示。

$$\gamma(y) = \left(\frac{1 + \lambda_{inf}}{1 + \lambda_{dis}} \right)^y \quad (8)$$

式中： $\gamma(y)$ 为第 y 年需要考虑的社会发展对储能影响的系数； λ_{inf} 为通货膨胀率； λ_{dis} 为贴现率。

在储能运维成本和加装储能收益的表达式中考虑该系数，使得模型更加精准和具有发展性。式(7)修正后按月折算的储能成本表达式如式(9)所示。

$$C = \frac{c_S S_N + c_P P_N + c_{op} P_N \sum_{y=1}^Y \gamma(y) / Y}{12Y} \quad (9)$$

2.2 储能配置优化模型

储能配置优化模型以用户侧加装储能后月效益最大为目标，优化求解储能配置的额定功率及额定容量。

储能配置优化模型的目标函数 F 为储能收益与折算储能成本的差值，并加入考虑社会发展对储能的影响参数，具体计算如式(10)所示。

$$\max F = \left(\sum_{j=1}^m B_j + \sum_{i=1}^d B_i \right) \cdot \sum_{y=1}^Y \gamma(y) / mY - C \quad (10)$$

式中， m 和 d 分别为仿真周期内总的月数和天数。该模型的仿真周期为若干个月，可根据用户实际负荷情况进行设置。

本文的储能优化配置的目的是帮助有需求的大用户通过加装储能电池的方式实现调峰和需量削减，从而改善用户负荷状况并从中获得收益。

2.3 基于多场景的储能配置决策方法

在仿真周期内，用户可能经历季节和天气变化、气温高低、节假日等不同场景。有时较高负荷的场景出现频次可能较低，此时就可以对初步配置的储能电池额定功率进行修正，使其在满足要求的同时进一步降低配置成本。

本文提供一种简单的决策方法。即通过选定一个高负荷标准，计算高负荷的时刻在整体仿真周期中出现的频率，将这个频率作为修正参数对初始仿真结果进行修正，并最终决策确定储能的配置。该高负荷标准的选定办法是选取对高负荷有代表性的月最大负荷值较大的六个月，对其取平均值，即为高负荷标准。如式(11)所示。

$$P'_N = (1 - f_h) P_N \quad (11)$$

式中： P'_N 为最终决策确定的储能额定功率； f_h 为高负荷出现的频率。

3 储能配置优化算法

本文利用 YALMIP 工具箱调用 CPLEX 求解器求解式(10)的储能配置优化模型。CPLEX 求解器具有收敛速度快、对线性问题鲁棒性好等优势，适用于本文优化模型的求解^[26]。具体方法是基于已有研究成果做出的储能选型，利用第 2 节中提出的配置优化模型，结合用户历史负荷数据进行优化求解储能的配置参数，并通过多方面因素的经济性分析、评估，确定该用户储能配置的合理性。

储能配置优化的整体思路如图 2 所示，详细步骤如下所述。

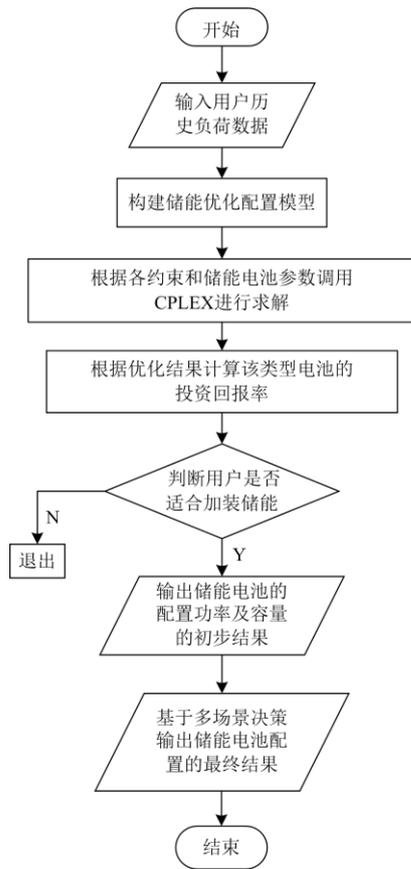


图 2 储能配置优化流程图

Fig. 2 Optimizing flowchart of user-side energy storage

步骤 1：对于有需求且初步判定适合加装储能的大用户，读入其用户历史负荷数据。

步骤 2：建立考虑发展因素的储能优化配置模型，以储能月综合效益最大为目标，设置储能运行约束条件。

步骤 3：基于历史负荷数据和搭建好的储能优

化配置模型，选取市面上广泛投入的电池类型，利用 CPLEX 求解器分别求解储能配置的额定容量及额定功率。

步骤 4：通过计算投资回报率评定加装储能的经济性，确定该用户储能配置功率及容量并作为初步优化结果输出。

步骤 5：对有个性化需求的用户，基于不同场景出现的频率，对储能配置的初始结果进行修正和最终决策。

步骤 6：与事先给定的评定指标进行多方面经济性比较，确定该用户安装储能的合理性，并提供配置建议。

4 算例分析

4.1 算例参数

为验证以上模型和算法的合理性，本文选取了江苏省内 4 家典型大用户进行储能优化配置分析。在 4 家典型大用户中，用户 A 为小型工业用户，用户 B 为大工业用户，用户 C 为商业用户，用户 D 为学校用户。

在历史负荷数据方面，4 家大用户均选取一年 12 个月作为仿真周期，每月用一个典型日表示，且每个典型日划分为 96 个负荷采集点时刻。

在电费计价方面，4 家用户均采用江苏省两部制电价制度计价^[25]，其中基本电费为 40 元/(kW·月)，峰谷平实时电价分布由于 4 家用户的类型不同而不同，分时电价价格如表 1—表 3 所示。

表 1 用户 A、用户 C 峰谷分时电价

Table 1 Time-sharing electricity price for user A and user C

时段	时间	电价/(元/kW h)
谷	0:00-8:00	0.315 5
平	12:00-17:00、21:00-24:00	0.646 5
峰	8:00-12:00、17:00-21:00	1.077 5

表 2 用户 B 峰谷分时电价

Table 2 Time-sharing electricity price for user B

时段	时间	电价/(元/kW h)
谷	0:00-8:00	0.313 9
平	12:00-17:00、21:00-24:00	0.641 8
峰	8:00-12:00、17:00-21:00	1.069 7

表 3 用户 D 峰谷分时电价

Table 3 Time-sharing electricity price for user D

时段	时间	电价/(元/kW h)
谷	0:00-8:00、21:00-24:00	0.658 3
峰	8:00-21:00	0.858 3

在储能选型方面, 根据已有的研究成果, 本文直接选取市面上广泛使用的铁锂电池为例^[27], 其基本参数如下: 电池能量倍率为 2, 充放电效率为 90%, 寿命为 8 年, 单位功率购买成本和运维成本分别为 600 元/kW 和 155 元/kW, 单位容量的投资单价为 1 600 元/(kW h)。

在社会发展对储能影响方面, 选取通货膨胀率为 2%, 贴现率为 10%。

4.2 储能优化配置及评估

基于以上 4 家大用户的历史负荷数据和峰谷电价, 采用 2.2 节中的储能配置优化模型, 分别对 4 家用户建立各自的储能配置优化模型, 并在 1.2 节中的各约束条件下进行优化求解, 投资回报率即总效益与投资成本之比, 通过投资回报率进行比较, 优化结果如表 4 所示。

表 4 储能配置优化结果

Table 4 Optimized results of energy storage configuration

用户	配置功率/ kW	配置容量/ (kW h)	投资成本/ 万元	月综合效益/ 万元	投资 回报率/%
A	298	596	117.86	1.0431	84.96
B	17 635	35 270	15 688	235.593 7	114.17
C	117	234	103.91	0.53 64	49.56
D	231	462	205.72	0.489 8	22.86

由表 4 可以得出, 用户 A 和用户 B 的投资回报率显然高于用户 C 和用户 D, 即工业用户加装储能后所得收益会高于商业和学校用户, 说明工业用户更适合加装储能。结合负荷特性可以看出, 工业用户每日的负荷峰谷差异较大, 储能的负荷分配和调峰减需的作用也体现得更为明显; 反观商业用户和学校用户, 虽然也有着负荷峰谷差异, 但负荷曲线相较于工业用户更为平缓, 所以储能所带来的收益不如工业用户。但由于商业用户所产生的收益仍较为可观, 所以同样适合配置储能。

以用户 A 为例, 考虑多场景对储能优化结果做最终配置。该用户典型日负荷曲线如图 3 所示。分析其原始负荷数据, 其较高的负荷峰值主要出现在 2 月、7 月和 8 月的典型日中, 选定 847 kW 这个负荷值作为标准, 计算超过该负荷值的时刻在仿真周期里出现的频次, 在 12 个月的典型日中出现的时刻共 55 次, 由 2.3 节中的公式(11)可得到用户 A 最终配置功率为 283.77 kW, 进一步削减了储能的配置成本, 实现了综合效益的进一步提高。

同时, 通过对比用户 A 和用户 B, 可以看出对于普通工业用户来说, 其配置储能的收益会略低于工业大用户, 这是因为其峰谷差距不如工业大用户

明显, 使得其调峰效果不如工业大用户。通过成本与收益进一步计算用户 A 和用户 B 的储能电池投资回收年限^[28], 可以得出二者投资回收期分别为 3.7 年和 4.3 年, 都可以较快地拿回成本并逐步获利。

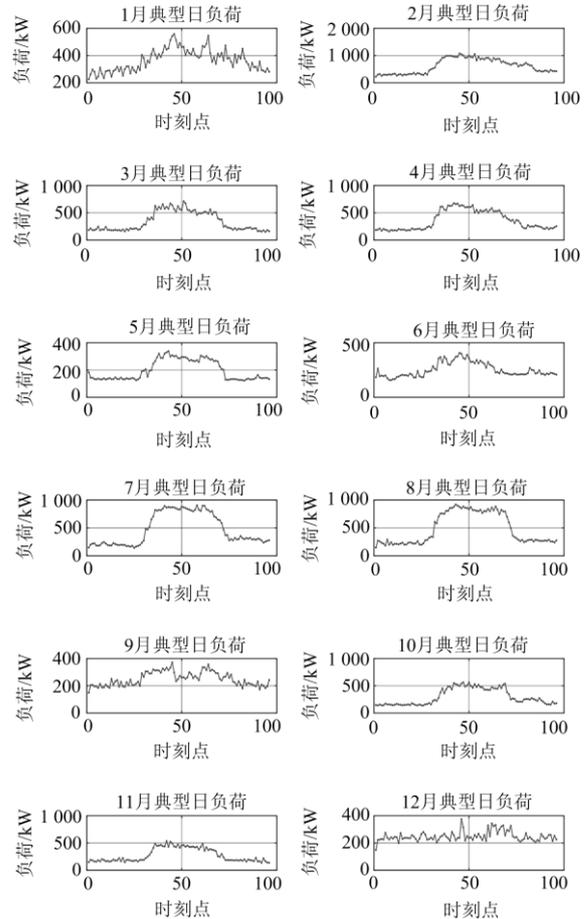


图 3 用户 A 各月典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve of user A in each month

4.3 储能配置经济性分析

4.3.1 储能配置优化结果分析

为进一步阐释不同储能配置对用户综合效益的影响, 并验证以上储能配置优化结果的正确性和合理性, 以用户 A 为例, 通过改变储能配置的额定功率做多次优化, 得到其不同配置额定功率情况下的效益变化关系, 以此探究是否在以上优化求解的最优值处取到效益最大值。通过多次优化仿真的结果, 拟合得到不同储能配置条件下用户 A 可实现的效益关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可见, 随着储能电池配置的额定功率的增大, 月综合效益曲线和全寿命周期预计收益曲线均呈现先增后降的趋势, 且两条曲线均在储能配置功率为 298 kW 时达到各自的最大值, 即均在用户

A 的储能最优配置功率处实现最大效益。这就验证了优化求解结果的正确性，进而验证了本文的储能优化配置模型和算法的合理性。同时，由图 4 还可以看出，当越过这个最大值点后，随着额定功率的继续增大，储能电池产生的收益增加量无法抵消电池额外增加的高额成本，使得效益曲线不升反降。

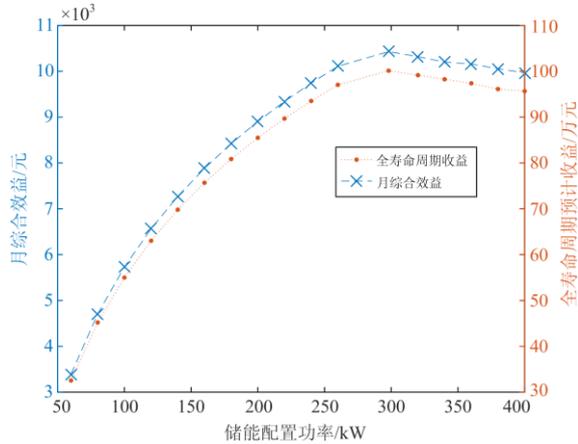


图 4 用户 A 不同储能配置下收益变化

Fig. 4 Revenue change under different energy storage allocations in user A

4.3.2 储能特性对经济性的影响分析

不同类型储能的成本和效率不同，对储能配置也有影响。

首先，储能技术的发展必然会带来储能电池成本的降低，这对于储能电池配置的经济收益会产生多大影响，其经济性是否有比成本降低幅度更大的提升？以用户 A 为例来进行说明。分别假设储能电池的成本降低 10%、20% 和 30%，成本包括购买成本、容量投资成本以及运维成本。将成本降低后的参数代入储能优化配置模型中进行优化求解，得到对应情况下的经济效益。优化结果如表 5 所示。

表 5 不同成本下的储能配置综合效益

Table 5 Total profits of energy storage allocation under different costs

成本/原始成本	90%	80%	70%
现综合效益/万元	124.22	150.30	172.41
增加效益/原效益	24.05%	50.09%	72.17%

由表 5 可见，当储能电池的成本下降时，全寿命周期的综合效益有很明显的提高。对于用户 A 来说，当成本分别降到原成本的 90%、80% 和 70% 时，即成本分别降低 10%、20% 和 30% 时，量化后数据表明效益的增幅明显大于成本的降幅。因此，对于目前来说，降低储能电池的成本仍然是提升储能配

置经济性的重要解决方法，想要进一步提高储能配置的经济效益，需要重点关注储能电池的成本降低问题。

接着探讨储能电池效率对经济性的影响。同样以用户 A 为例，探究当储能电池的能量转换效率改变时，其总效益的变化情况。以铁锂电池的效率 0.9 为基准，在其周围以每 1% 为间隔，选取 0.87~0.93 作为效率变化的区间，分别求解各自的优化结果，如图 5 所示。

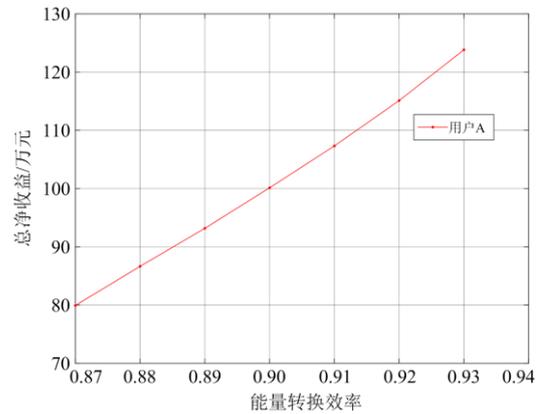


图 5 用户 A 不同转换效率下收益变化

Fig. 5 Revenue change under different energy storage efficiency in user A

由图 5 可见，效率的提升能带来显著的效益提高，且效益提升的幅度远高于储能效率提升的幅度。粗略计算可得，在储能电池转换效率的 0.9 附近，每提升 1% 的效率，在净收益方面提升了大约 7%。因此，提高储能电池的能量转换效率，也是提高经济性的有效途径。

综上所述，想要提高储能配置的经济效益，除了对于电池配置功率及容量需要进行优化外，也需要考虑储能电池特性本身的影响因素。研发新技术手段实现储能电池投资成本的降低与运行效率的提高同样是寻求最大化的储能配置经济性的重要渠道。

5 结论

本文针对 4 种典型的大用户类型，基于现有电价计费制度，并考虑今后几年的发展情况，对用户侧储能优化配置进行了研究。结论如下：

1) 提出了考虑调峰和削减需量两方面收益的储能优化配置模型，将储能运行时各种状态加以约束。同时，特别引入了考虑近些年技术进步和经济发展的系数，以及多场景的储能配置条件，使得配置优化模型更精准、更具有实际效用。

2) 本文分析并验证了4类典型大用户对于储能的适用性。经优化求解可以看出工业用户对于储能的适用性更好, 但商业和学校的大用户也可以根据自身情况加装储能, 实现经济效益。这为储能多渠道商业化应用提供了新思路。

3) 本文利用投资回报率和投资回收年限的衡量指标比较了典型用户实际安装储能后的效益, 并分别给出配置建议。同时, 从储能配置出发, 说明了优化结果的合理性; 从储能自身特性出发, 说明了降低成本和提高效率都是显著提升经济效益的手段。

本文仅对典型大用户的储能配置优化作了分析和研究, 下一步工作主要是针对储能运行对配置优化的影响做分析, 根据用户情况搭建更加细化的配置优化模型。

参考文献

- [1] LIU Zifa, CHEN Yixiao, ZHUO Ranqun, et al. Energy storage capacity optimization for autonomy microgrid considering CHP and EV scheduling[J]. *Applied Energy*, 2017, 210: 1113-1125.
- [2] ABDULLA K, DE HOOG J, MUENZEL V, et al. Optimal operation of energy storage systems considering forecasts and battery degradation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2086-2096.
- [3] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1): 21-34. DOI: 10.1186/s 41601-017-0074-9.
- [4] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 76-83.
- [5] 陈玉敏, 赵冬梅. 含风电的多种形式储能协调调度多目标优化模型[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(23): 71-78.
CHEN Yumin, ZHAO Dongmei. Multi-objective optimization model for multi-form energy storage coordinated scheduling with wind power[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23): 71-78.
- [6] 蒋辰临, 张超. 考虑用户舒适度的智能用电模式优化方法研究[J]. *供用电*, 2020, 37(4): 71-77.
JIANG Chenlin, ZHANG Chao. Research on optimization method of smart power consumption mode considering user comfort[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(4): 71-77.
- [7] 陆青, 张治新, 冷亚军, 等. 计及光伏储能的家庭智能用电系统调度模型[J]. *智慧电力*, 2019, 47(12): 30-36.
LU Qing, ZHANG Zhixin, LENG Yajun, et al. Scheduling model of smart home electricity consumption system considering photovoltaic energy storage[J]. *Smart Power*, 2019, 47(12): 30-36.
- [8] 杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 103-109.
DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 103-109.
- [9] 陈轶玮, 钱啸, 汤易, 等. 两部制电价引导下储能系统优化运行方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(2): 98-103, 112.
CHEN Yiwei, QIAN Xiao, TANG Yi, et al. Operation optimization method of energy storage system with two-part tariff[J]. *Electric Power*, 2021, 54(2): 98-103, 112.
- [10] 赵宇明, 丁庆, 秦毅, 等. 深圳电网分布式电源与用户侧储能技术实践与思考[J]. *供用电*, 2019, 36(3): 76-82.
ZHAO Yuming, DING Qing, QIN Yi, et al. Practice and Reflection of distributed generation and user side energy storage in shenzhen power grid[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(3): 76-82.
- [11] JAYASEKARA N, MASUOM M A S, WOLFS P J. Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 250-261.
- [12] 黄际元, 李欣然, 常敏, 等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(21): 112-121.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(21): 112-121.
- [13] 田蓓, 王朝晖, 张爽, 等. 面向风光综合消纳的电力系统广域储能容量优化配置研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(6): 67-72.
TIAN Bei, WANG Zhaohui, ZHANG Shuang, et al. Wide-area optimized allocation of energy storage capacity considering wind/photovoltaic power accommodation in power systems[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 67-72.
- [14] RIFFONNEAU Y, BACHA S, BARRUEL F, et al. Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(3): 309-320.

- [15] 朱青, 曾利华, 寇凤海, 等. 考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储优化配置方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 23-31.
ZHU Qing, ZENG Lihua, KOU Fenghai, et al. Research on optimal allocation method of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage in industrial parks considering energy storage's grid-connected operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 23-31.
- [16] 吴仁光, 郑立, 李凯鹏, 等. 面向综合能源配电网的储能系统优化配置方法[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 42-50.
WU Renguang, ZHENG Li, LI Kaipeng, et al. Optimized configuration method of energy storage system for integrated energy distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 42-50.
- [17] 黄宗龙, 江修波, 刘丽军. 低碳化背景下配电网“源一储一荷”多目标优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 36-45.
HUANG Zonglong, JIANG Xiubo, LIU Lijun. Multi-objective optimal allocation of "generation-storage-load" under the low-carbon background[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 36-45.
- [18] 袁晓冬, 郁正纲, 张宸宇, 等. 计及光伏区间预测和储能 SOC 均衡的配电网优化[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 598-607.
YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, ZHANG Chenyu, et al. Optimization operation of distribution network considering photovoltaic interval prediction and energy storage SOC equilibrium[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 598-607.
- [19] LAN Hua, LI Zhengyang, WANG Yunran. Research on the influence of wind-solar hybrid power supply system to the reliability of distribution network[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(6): 92-96, 106.
- [20] 周欣怡, 齐先军, 吴红斌, 等. 提高需求响应可靠性的储能优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 107-114.
ZHOU Xinyi, QI Xianjun, WU Hongbin, et al. Research on optimal allocation of energy storage to improve the reliability of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 107-114.
- [21] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2471-2476.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2471-2476.
- [22] 杨锡运, 张璜, 修晓青, 等. 基于商业园区源/储/荷协同运行的储能系统多目标优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3996-4003.
YANG Xiyun, ZHANG Huang, XIU Xiaoqing, et al. Multi-objective optimal configuration of energy storage systems based on coordinated operation of source/storage/load in commercial park[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3996-4003.
- [23] LU Chao, XU Hanchen, PAN Xin, et al. Optimal sizing and control of battery energy storage system for peak load shaving[J]. Energies, 2014, 7(12): 8396-8410.
- [24] NADEESHANI J, PETER W, MOHAMMAD A S. An optimal management strategy for distributed storage in distribution networks with high penetrations of PV[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(11): 147-157.
- [25] 赵乙潼, 王慧芳, 何奔腾, 等. 面向用户侧的电池储能配置与运行优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 121-130.
ZHAO Yitong, WANG Huifang, HE Benteng, et al. Optimization strategy of configuration and operation for user-side battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 121-130.
- [26] YANG Bo, WANG Junting, CHEN Yixuan, et al. Optimal sizing and placement of energy storage system in power grids: a state-of-the-art one-stop handbook[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 1-30.
- [27] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. Introduction of several types of energy storage batteries for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 47-53.
- [28] 陈丽娟, 吴甜恬, 柳惠波, 等. 基于需量管理的两阶段大用户储能优化模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 194-200.
CHEN Lijuan, WU Tiantian, LIU Huibo, et al. Demand management based two-stage optimal storage model for large users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 194-200.

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-03-05

作者简介:

史林军(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源、储能及电力系统分析与控制; E-mail: eec@hhu.edu.cn

杨帆(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为储能系统在电力系统中的应用。E-mail: yf199808@163.com

(编辑 魏小丽)