

复杂因素下的多用户共享储能系统优化

郝木凯¹, 张伟¹, 董青卫^{2,3,4}, 臧传治^{2,3}, 曾鹏^{2,3}

1. 中华人民共和国工业和信息化部工业和信息化部产业发展促进中心, 北京 100089; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 4. 中国科学院大学, 北京 100049

基金项目: 工业和信息化部产业发展促进中心科技项目(CW-HTSP-2018-031); 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0700300); 国家自然科学基金资助项目(61773368)

通信作者: 董青卫, dongqingwei@sia.cn 收稿/录用/修回: 2019-05-27/2019-09-18/2019-12-10

摘要

储能系统(ESS)具有削峰填谷,降低用户用电成本的作用.针对单用户独立投入储能系统成本过大的问题,提出了一种共享模式下的储能系统调度策略.考虑了一次性投资成本、运行维护、寿命周期、削峰获利等因素,以最小化日均投资运行成本为目标函数,加入了储能系统能量约束、功率约束、日均投资维护成本模型等,建立了混合整数线性规划(MILP)模型.研究了不同放电深度对日均投资成本的影响.仿真结果表明共享储能模式相对于单用户储能模式节省14.17%.

关键词

共享储能系统
智能微电网
需求响应
容量配置
混合整数线性规划
中图法分类号: TP29
文献标识码: A

Optimization of Multi-user Shared Energy Storage System Considering Complex Factors

HAO Mukai¹, ZHANG Wei¹, DONG Qingwei^{2,3,4}, ZANG Chuanzhi^{2,3}, ZENG Peng^{2,3}

1. Industry Development and Promotion Center, Ministry of Industry and Information Technology of People's Republic of China, Beijing 100089, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

The energy storage system (ESS) has the function of shaving peak demand, filling demand valleys and reducing the cost of electricity consumption. To address the problem of excessive cost for a single-user independent ESS, we propose a scheduling strategy for the ESS in a shared model. We consider the factors such as one-time investment cost, operation maintenance, life cycle, and peak-shaving profit income. The objective function is to minimize the daily average investment operation cost. We establish a mixed-integer linear programming model and add some constraints, such as energy constraint, power constraint, and daily investment maintenance cost model of ESS. We also demonstrate the influence of different discharge depth on daily investment cost. Finally, we show that the shared ESS can save 14.17% on costs compared with the single-user independent ESS.

Keywords

shared energy storage system;
smart microgrid;
demand response;
capacity configuration;
mixed integer linear
programming

0 引言

随着经济发展,用电设备的增多,人们对电力的需求越来越大^[1-2].用户对电力的需求往往具有集中性,其负荷会呈现出峰谷差值较大的情况,这给电力系统的运行带

来了极大的挑战.在用电高峰期,用户负荷大,给电网的稳定运行带来了冲击;在用电低谷时段,用户负荷小,部分电力设备闲置,系统经济效益差.因此,以适宜的收费标准引导用户迁移非必要的高峰负荷,可以大大降低用电高峰时段的电力紧张情况,保证电力系统可靠性,同时会

有效降低电力系统为了应对用户用电峰值过高而投入的额外的建设成本^[3]。

需求响应在提高电力市场的经济效益和运行可靠性方面有巨大的潜力^[4-5]。在北美和欧洲,很多国家采用了按照需求收费的收费制度。在该制度下,用户的电费由2个部分组成,一部分是按照用户用电总量来收费,另一部分是按照一定收费周期内用户用电功率的峰值来收费^[6]。这种收费标准可以很好地引导用户的用电行为,鼓励用户通过调整自身的用电模式,降低高峰负荷,进而降低自身的用电费用。由此,也可以缓解电力系统基础设施的运行压力,有效降低建设成本,提高系统的利用率。

使用储能系统是用户优化自身用电模式、降低用电成本的好方式^[7-8]。近年来,很多学者针对储能系统的配置,优化自身的用电模式展开了广泛的研究。丁明等^[9]研究了独立风、光、柴、储微网系统容量优化配置,在保证供电可靠性的同时,提高整个微网系统的经济性。陈光堂等^[10]对蓄电池储能装置在调节负荷、功率平衡、削峰三个方面的价值及投资成本进行了建模分析。Li等^[11]研究了基于经济分析、最优调度策略和预测不确定性的储能系统容量配置方法。Paridari等^[12]提出了一种考虑用户间公平性的储能共享的分布式算法。AmirAli等^[13]研究了在不确定环境下,通过寻找1年内最小成本能量调度来获得最优储能容量配置的方法。

综上,目前对储能应用的研究主要集中在储能系统与风能、太阳能等随机性可再生能源互补性优化调度上。但是,对于最广泛的电力用户共享储能系统配置的研究却很少。现如今,储能系统的投资成本,运行维护成本居高不下^[14]。一次性投入成本过高,回报周期过长,对单个用户进行规模配置经济上不合理。为了解决这个问题,本文研究了由运营商搭建储能系统平台、多用户参与的共享储能系统优化配置方法,在考虑寿命周期成本的情况下,使得整体的费用支出成本最低。

本文的创新性在于提出了一种运营商主导的共享储能模式,可以在满足用户用电需求的前提下,降低储能容量配置,降低用电日均投资成本且分析了放电深度对运营投资成本的影响。

1 共享储能控制模式

在已有的研究中,常规的储能控制模式主要是独立的储能模式,即在微网内配置储能系统,平抑可再生能源出力波动,平滑负荷曲线,进而提高微网经济效益,如周楠等^[15]以光伏利用率最大和年净利润最大为目标,研究了基于需求响应的光伏微网储能多目标容量优化配置;孙秀娟等^[16]在考虑多类型需求响应方式下,建立了以微网总成本和光伏消纳率为目标函数的储能容量优化配置模型;程瑜等^[17]对微网内含光伏及储能的民用负荷需求响应策略与效益进行了分析;吴小刚等^[18]为提高独立光伏系统的供电可靠性和光伏利用率,提出了以负荷缺电率和能量溢出比为指标的光伏、储能容量联合配置方法。

可以看出,上述关于储能的研究都是都是在微网的内

部进行优化。近年来,共享经济的成功,带来了很多典型的商业案例,共享思维在储能方面的应用也引起了关注。Liu等^[19]对此进行了研究,提出了云储能这一概念;Liu等^[20]又在随后的研究中解释了云储能的概念,并对云储能的商业模式进行了理论上的分析;康重庆等^[21]分析了云储能的运营模式,对其经济性进行了论证。这些研究针对的都是分时电价的下的共享储能的研究,而有更好的经济效益和运行可靠性的需求响应模式下的共享储能却未被考虑。

由于行业差异、行为差异,不同类型用户的电力负荷具有很好的互补性。例如,餐饮行业的用电高峰时段为中午及夜晚时段,写字楼行业的用电高峰时段则集中在上午和下午,有别于用餐时段。可以预见,合理的搭配不同的用户类型,可以有效的降低储能系统的投资成本。

在共享模式下,用户之间可以进行信息、能量的交流。多个用户共同使用运营商提供的储能系统,运营商负责信息获取及能量优化调度。信息的共享,可以使运营商获悉用户的负荷使用情况。当各个用户需要充放电时,可以虚拟地对各个用户同时进行充放电,以调节各个用户的峰值。如当用户A有削峰需求时,用户B此时的负荷未达到自身的用电峰值。此时,两者名义上是储能系统对用户A放电,用户B对储能系统充电。但是实际上,储能系统只对不足部分补偿,对多余的部分接收。通过这样的控制策略,既满足了用户的削峰需求,又进一步减小储能系统的容量配置,同时不会增加储能系统的充放电频率。

由运营商进行建设投入,搭建储能系统平台,对用户提供储能服务,则用户既能节省峰值电费,又不会一次性投入过高的成本,有利于吸引更多的用户参与。使用共享储能系统后,用户的日均费用不超过单储能模式下的最优成本。

2 共享储能优化建模

在本节中,先是提出了目标优化函数,再对其中的各分量进行描述,并辅以约束条件,即以最小化日均投资运行成本为目标,对运营商向电网缴纳的日均电费额、储能系统日均投资维护成本、运营商为用户提供服务而获得的收益进行建模,并添加储能系统能量约束和功率约束。

目标函数:

$$\min f = EB + TIPD - TB \quad (1)$$

目标函数为最小化日均投资运行成本,其中,EB为每天运营商向电网缴纳的的电费额,TIPD为储能系统日均投资维护成本,TB为运营商为用户提供服务而获得的收益。

2.1 运营商向电网缴纳的日均电费额

在需求响应收费下,运营商每日向电网缴纳的的电费由峰值费用和平时电价组成。在每一个调节时段,运营商负责向电网端缴纳用电费用,结算负载为各用户优化后的负载之和:

$$EB = \sum_{t=1}^N P_{total}(t) \cdot \Delta t \cdot C_E + P_{peak} \cdot \Delta t \cdot C_{peak} \quad (2)$$

$$P_{\text{total}}(t) = \sum_{j=1}^M P_{\text{load},j}(t) + P_{\text{cd},j}(t) \quad (3)$$

其中, C_E 为按用户用电总量来收费的平时电价; C_{peak} 为按用电周期内用户最大用电功率来收费的峰值电价(\$/kW); P_{total} 为运营商向电网端结算时的负载功率; P_{peak} 为运营商向电网端结算时的峰值功率; Δt 为每个调节时段的时长; $P_{\text{load},j}$ 为第 j 个用户实际负载; $P_{\text{cd},j}$ 为储能系统对第 j 个用户的充放电功率, 当值大于零时表示充电, 当值小于零时表示放电; N 为划分的调度时段; M 为用户的个数.

2.2 共享储能系统日均投资维护成本

由于锂电池具有能量密度高, 循环寿命周期长, 功率密度高, 充放电次数多、深度放电能力强的优势^[22], 本文选用锂电池作为储能系统的能量存储载体. 采用文^[23]的成本模型, 描述储能系统的日均投资成本. 储能系统的投资成本主要由一次投资成本和每年的维护成本组成:

$$\text{TIPD} = \frac{\text{AC}}{365} = \frac{(c_r \cdot c_p + \text{OM}) \cdot P_{\text{ESS}}^{\text{max}} + c_r \cdot c_e \cdot C_{\text{ESS}} + c_r \cdot c_0}{365} \quad (4)$$

$$\text{AC} = c_r \cdot \text{TI} + P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \cdot \text{OM} \quad (5)$$

$$\text{TI} = c_p \cdot P_{\text{ESS}}^{\text{max}} + c_e \cdot C_{\text{ESS}} + c_0 \quad (6)$$

$$c_r = \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} \quad (7)$$

其中, TIPD 为储能系统的日均投资维护成本, AC 为每年的投资成本, OM 为修理维护费用, $P_{\text{ESS}}^{\text{max}}$ 为储能系统的最大充放电功率, C_{ESS} 为储能系统的容量, TI 为储能系统的一次投资成本, c_r 表示总的投资成本等年值系数, c_p 为与储能系统额定功率有关费用, c_e 为与储能系统容量有关费用, c_0 为其它固定投入费用, r 为资金年利率, l 为储能系统的可使用年限.

2.3 共享储能系统的能量约束

由于能量守恒, 储能系统中的能量是连续变化的, 所以应该满足等式(8)的约束. 由于储能系统的物理容量限制, 其每一时段的能量应该小于储能系统的物理容量; 由于放电深度会影响储能系统的使用寿命, 其每一时段的能量应该大于最低设定容量, 如约束(9)所示. 约束(10)描述了在一个调度周期内储能系统的初末能量值的关系. 在实践中, 由于每天的用电情况并不完全一样, 故在每个调度周期内, 初末时刻储能系统的能量值应该有一个弹性的范围. 本文规定初末时刻的能量值的波动范围在 $\pm 0.1 C_{\text{ESS}}$. 式(11)设定了储能系统在周期开始时刻的剩余电量值.

$$E_{\text{ESS}}(t) = \begin{cases} E_{\text{ESS}}(t - \Delta t) + P_{\text{cd}}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_c, & P_{\text{cd}}(t) \geq 0 \\ E_{\text{ESS}}(t - \Delta t) + P_{\text{cd}}(t) \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{\eta_d}, & P_{\text{cd}}(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$(1 - \text{DOD}) \cdot C_{\text{ESS}} \leq E_{\text{ESS}}(t) \leq C_{\text{ESS}} \quad (9)$$

$$-0.1 \cdot C_{\text{ESS}} \leq E_{\text{ESS}}(N) - E_{\text{ESS}}(0) \leq 0.1 \cdot C_{\text{ESS}} \quad (10)$$

$$E_{\text{ESS}}(0) = (1 - \text{DOD}_{\text{ini}}) \cdot C_{\text{ESS}} \quad (11)$$

其中, $E_{\text{ESS}}(t)$ 为储能系统在 t 时刻的能量值, $P_{\text{cd}}(t)$ 为 t 时刻储能系统的充放电功率, η_c 为储能系统的充电效率, η_d 为储能系统的放电效率, Δt 为每一个调节时段的时长, DOD 为储能系统的放电深度, $E_{\text{ESS}}(N)$ 为储能系统在末时刻的剩余电量, $E_{\text{ESS}}(0)$ 为储能系统在初始时刻的剩余电量.

2.4 共享储能系统的功率约束

在多用户储能系统中, 每个用户的充放电功率和储能系统实际的充放电功率应该满足一系列的约束. 对用户而言, 在每一时段内不能同时充放电. 对于用户之间的调度, 若用户 A 有充电需求, 而用户 B 有放电需求, 可以将用户 A 、用户 B 的充放电功率值仅进行数学上的处理. 这样操作, 既能保证用户调峰操作的灵活性, 又能减少对储能系统频繁充放电所带来的损耗, 还能大大降低对储能系统容量的需要. 例如, 第 3 时段用户 A 要求向储能系统充电 3 kWh, 而用户 B 此时段需要储能系统放电 4 kWh. 若在独立储能情况下, 用户 A 需要 3 kWh 的容量, 用户 B 需要 4 kWh 的储能容量. 但是在使用共享储能系统中, 只需要 1 kWh 的储能容量即可满足要求.

在每一时段, 储能系统的实际充放电功率由式(12)表示; 式(13)和式(14)表示了在一时刻, 单个用户充放电功率的约束情况, 注意充放电功率均为非负值; 式(15)约束了储能系统的实际充放电功率的上下限. 对于单个用户, 由式(16)~式(18)描述了其不能在同一时段充放电.

$$P_{\text{cd}}(t) = \sum_{j=1}^M P_{c,j}(t) - \sum_{j=1}^M P_{d,j}(t) \quad (12)$$

$$0 \leq P_{c,j}(t) \leq P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \cdot u_{c,j}(t) \quad (13)$$

$$0 \leq P_{d,j}(t) \leq P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \cdot u_{d,j}(t) \quad (14)$$

$$-P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \leq P_{\text{cd}}(t) \leq P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \quad (15)$$

$$u_{c,j}(t) = \{0, 1\} \quad (16)$$

$$u_{d,j}(t) = \{0, 1\} \quad (17)$$

$$u_{c,j}(t) + u_{d,j}(t) \leq 1 \quad (18)$$

其中, $P_{c,j}(t)$ 表示 j 用户在 t 时段的充电功率; $P_{d,j}(t)$ 表示 j 用户在 t 时段的放电功率; M 为用户的个数; $P_{\text{ESS}}^{\text{max}}$ 表示每个用户的最大充放电功率; $u_{c,j}(t)$ 和 $u_{d,j}(t)$ 均为 0、1 二值变量. 对于 $u_{c,j}(t)$, 0 表示 t 时段 j 用户不充电, 1 表示 t 时段 j 用户充电. 对于 $u_{d,j}(t)$, 0 表示 t 时段 j 用户不放电, 1 表示 t 时段 j 用户放电.

3 仿真分析

3.1 参数设置

本节验证了运营商主导的共享储能模式在用户费用不高于单储能模式的情况下, 运营商可以获得的最大收益, 并且分析了放电深度对日均运营投资成本的影响.

本文选用了 4 个典型的用户, 其在一天中每小时的负荷功率数据, 如图 1 所示. 用户 A 、用户 B 、用户 C 、用户 D 分别对应娱乐行业、办公行业、餐饮行业、酒店行业. 由图 1 可见, 4 用户的用电峰值时间差异较大, 其用电峰谷有明显的互补, 这为减少总的容量配置, 获得更大的利润提供了可能.

在储能系统优化调度的研究中, 通常 1 天为 1 个调度周期, 每次的调度时间为 15 min 或者 1 h. 本文每隔 1 h 调度一次, 即 1 天中有 24 次调度, 式(2)中 $N=24$.

设定需求响应收费电价, 用户的峰值电价为 4.64 \$/kW, 平时电价为 0.060 84 \$/kWh^[6]. 储能系统所需的参数^[21, 24]如表 1 所示. 锂电池的循环寿命与放电深度的关系^[25]如表 2 所示.

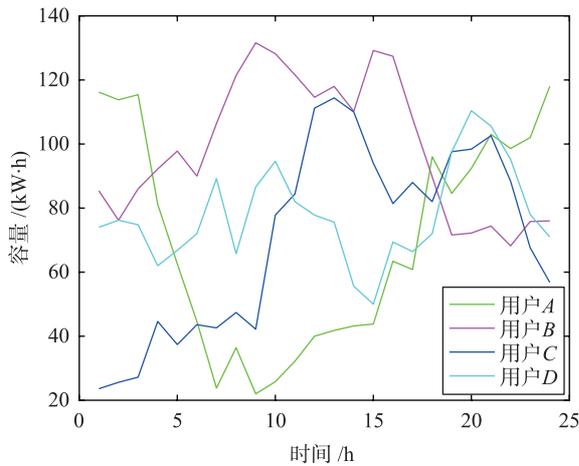


图1 典型用户每小时负荷功率数据
Fig.1 Typical user hourly load power data

表1 储能系统仿真参数
Tab.1 The parameters of ESS

参数	参数含义	数值
c_p	功率相关成本	400 \$/kW
c_e	容量相关成本	1 000 \$/(kW·h)
c_0	固定建设成本	30 000 \$
OM	年修理维护费用	58.4 \$/(kW·a)
P_{ESS}^{max}	ESS 最大功率	300 kW
η_c	电池充电效率	95%
η_d	电池放电效率	95%
DOD_{ini}	初始放电深度值	0.4

本文建立的运营商主导的共享储能模型是一个混合整数规划模型, 采用商业求解器 CPLEX12.8 进行求解, 采用 Matlab 2016 进行图形绘制与数据分析.

3.2 运营商主导的共享储能模式仿真

首先使用文[9]的独立用户储能配置调度算法, 获得

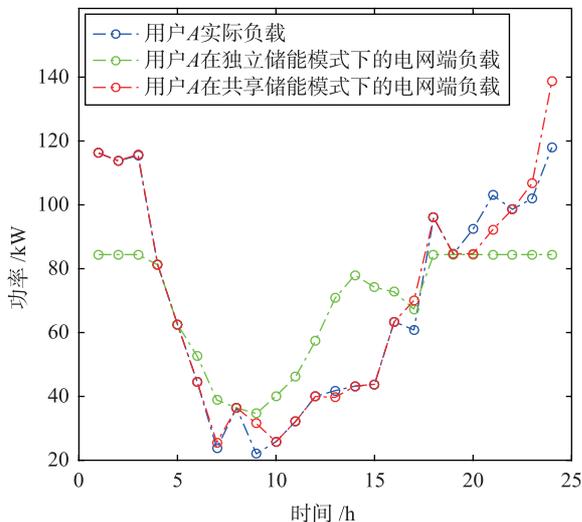


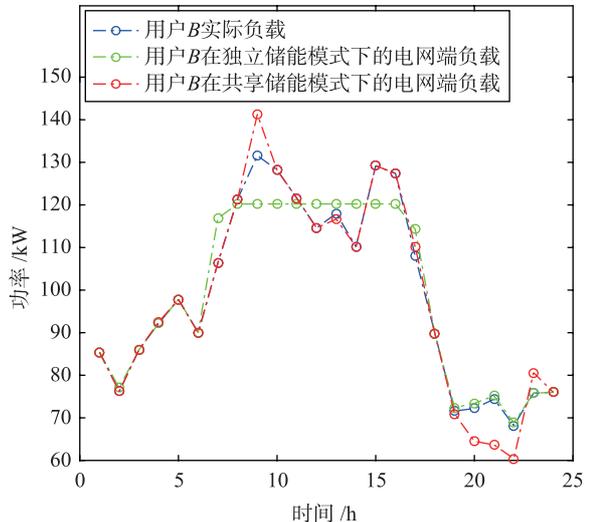
表2 储能系统的循环寿命和放电深度的关系
Tab.2 The relationship between cycle life and DOD of ESS

DOD	循环寿命	DOD	循环寿命
5	4 300	55	1 300
10	3 800	60	1 100
15	3 300	65	900
20	2 800	70	800
25	2 400	75	650
30	2 000	80	500
35	1 800	85	450
40	1 600	90	430
45	1 500	95	400
50	1 400	100	390

独立用户储能模式下的最优日均费用额及最优容量. 进一步以各用户独立储能模式下最优日均费用之和, 与运营商主导的共享储能模式的最优日均费用进行比较. 本文设定放电深度为 80%, 储能系统的可使用年限为 10 a, 资金的利率值 q 为 5%.

图2 为用户实际负载、用户在独立储能模式下的电网端负载、用户在共享储能模式下的电网端负载的对比图. 在独立用户储能模型中, 根据用户个体需求响应收费模式的需要, 削峰填谷, 降低用户的峰值负荷; 而在共享储能系统模型中, 考虑整体的削峰需求, 使整体的日均投资费用最低.

从图2的负荷对比曲线可以看出, 为了在需求响应收费模式中降低自身的日均成本, 利用储能系统削峰填谷, 较大的降低了用户的峰值负荷. 而在共享储能模式下, 单个用户的负荷并不需要太大的削峰, 只要满足整体的利益最大即可. 由于单个用户的费用是与运营商结算的, 运营商统一与主电网进行结算, 所以只要整体的费用低, 运营商给予用户收费补偿, 用户的成本是可以低于使用独立储能模式时的成本的.



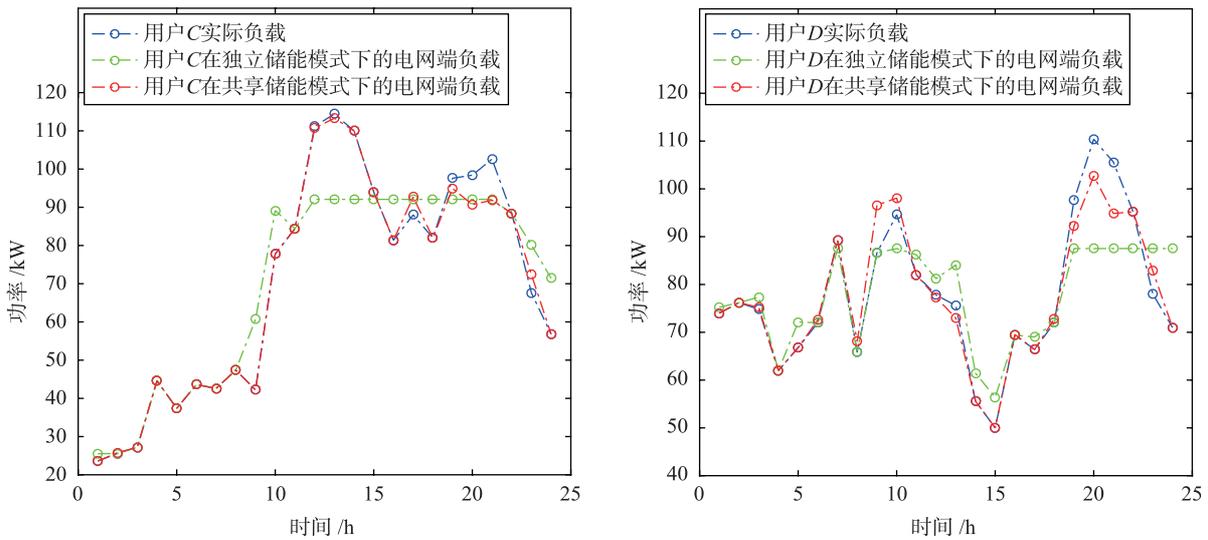


图2 用户的优化负荷对比
Fig.2 Comparison of optimized load for users

可以看出,在使用共享储能模式时,用户有时的负荷甚至会高于自己的峰值负荷.这是因为,在该时段,共享储能系统整体的用电量较低,储能系统进行了充电.如第9时段,用户A、用户B、用户D的电网端负荷高于用户的实际负荷,此时3个用户在对储能系统进行充电;用户C的电网端负荷与实际负荷持平,此时该用户不对储能系统进行充放电操作.

个用户的削峰需求仅服从于整体的削峰需求.这样用户不需要对自己的峰值进行削峰,可以带来更大的用电灵活性.图4反映了储能系统电量的变化情况.

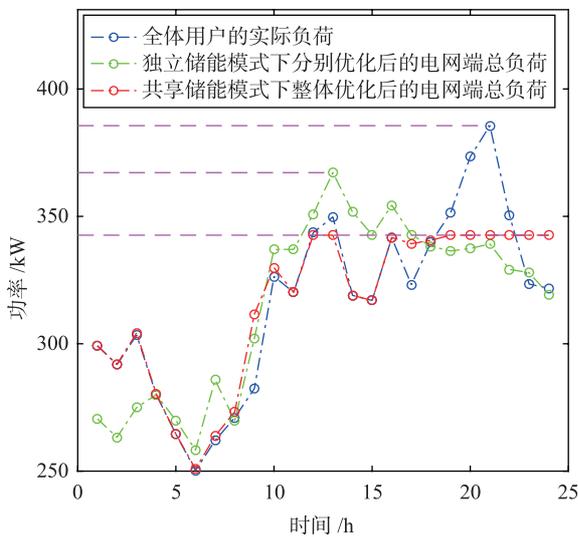


图3 实际负荷与两种模式下的负荷对比图
Fig.3 Comparison of the load between the actual load and the two modes

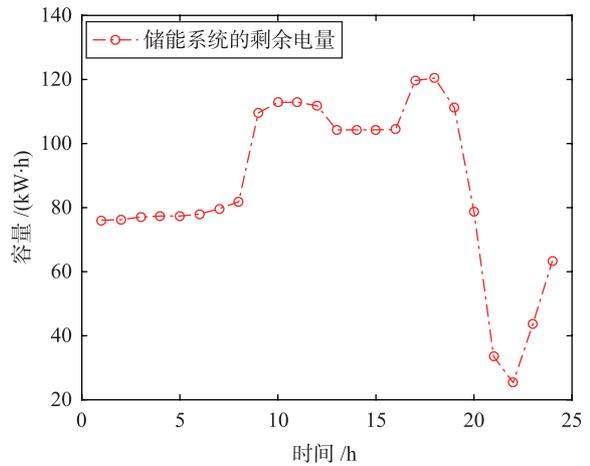


图4 储能系统电量的变化情况
Fig.4 Changes in the energy of the energy storage system

表3 共享储能模式与单用户储能模式的对比

Tab.3 The comparison between the shared ESS and the single-user ESS

对比项	单用户储能模式	共享储能模式	节省
容量配置/(kW·h)	593.7	126.78	78.65%
日均费用/¥	2561	2198	14.17%

从图3可以看出,共享储能模式下分别优化后的电网端总负荷的峰值低于独立储能模式下电网端总负荷的峰值.比较图2与图3可见,虽然在独立储能模式中,用户的峰值有较大的削减,但是对于主电网来说,峰值仍然高于共享储能模式下的峰值,这说明共享储能模式给电网带来的峰值负载更小,系统更稳定.在共享储能模式下,单

由表3可知,单用户储能模式下用户的最优容量之和为593.70 kW·h,其日均费用之和为2 561\$.而在运营商主导的多用户共享储能模式下,所需的最优容量为126.78 kW·h,最优日投资费用为2 198\$.可以看出,在共享储能模式下,节省储能容量78.65%,节省日均费用14.17%.仿真结果表明,共享储能模式相对于单用户储能模式降低了成

本,有较大的成本优势.对节省的日均费用设置合理的分配策略,即可令运营商获得满意的收益,也使用户大大降低储能系统日均投资成本.

3.3 不同放电深度对日均投资成本的影响

储能系统的寿命和放电深度成负相关,随着放电深度(DOD)的增加,储能系统的循环寿命逐渐下降^[26].若设置系统的放电深度较小,则系统具有较长的使用寿命,但需要的储能容量会增加.若设置系统的放电深度较大,则所需的储能容量会相对较小,但是带来了系统寿命相对较短的问题.考虑到最小化日均投资成本,则会存在一个放电深度和循环寿命的最优组合.图5反映了这一变化.

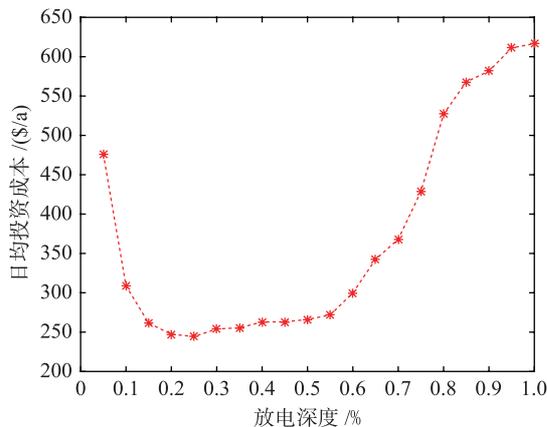


图5 放电深度与日均投资费用的关系

Fig.5 The relationship between DOD and daily cost

经过仿真发现,在改变储能系统放电深度,并获得相同的调峰效果时,储能系统的剩余电量最大最小值的差值不变,把这部分容量值称为参与调峰容量值.本文以获得的参与调峰容量值作为定值,则储能系统的安装容量会随放电深度的不同而变化,进而日均投资成本也会随之变化.

参考文献

- [1] 颜志敏,王承民,郑健.配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J].电力自动化设备,2013,33(2):57-61.
Yan Z M, Wang C M, Zheng J. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57-61.
- [2] Yi P Z, Dong X H, Iwayemi A, et al. Real-time opportunistic scheduling for residential demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 227-234.
- [3] Wang Z M, Gu C G, Li F R. Active demand response using shared energy storage for household energy management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1888-1897.
- [4] Albadi M H, El-Saadany E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1989-1996.
- [5] Zhang Q, Wang X F, Wang J X, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [6] 韩超.面向用户的削峰填谷储能系统优化调度研究[D].杭州:浙江大学,2017.
Han C. Research on optimal scheduling of energy storage system for user-oriented peak shaving[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [7] 曹筱欧,王冬,周静,等.含储能及新能源发电的居民侧需求响应[J].信息与控制,2017,46(3):379-384.
Cao X O, Wang D, Zhou J, et al. Residential demand side response considering energy storages and renewable energy sourced generators[J]. Information and Control, 2017, 46(3): 379-384.
- [8] 李越.面向用户侧储能系统的电力负荷优化调度研究[D].杭州:浙江大学,2018.
Li Y. Research on power load optimal scheduling based on user-side energy storage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

由图5可知,放电深度过大或过小都会造成日均投资成本的增加.当放电深度为25%时,储能系统的日均投资成本最小,为244.4\$.

表4 最优放电深度结果

Tab.4 The results of optimal depth of discharge

参数	数值
日均投资费用 / (\$/d)	244.4
储能系统的最优放电深度 / %	25
储能系统的最优循环寿命	2 400
储能系统的最优使用年限 / a	6.58

4 结论

本文基于需求响应背景,从共享储能的角度出发,建立了多用户共享储能调度的混合整数线性规划模型,采用分支定界法进行了求解.以运营商主导的多用户共享储能系统,对于解决用户储能系统建设过程中投资成本过高,利用率较低起到了非常重要的作用.

1) 在运营商主导的共享储能系统中考虑其寿命周期成本,提高了目标函数计算的准确性,使获得的配置方案更符合实际.

2) 分析讨论了储能系统带来的经济效益及运行模式、控制策略等诸多因素对微电网负荷优化分配结果的影响.

3) 根据典型用户的用电数据,考虑系统约束条件,通过混合整数线性规划方法,研究了不同用电类型用户共享的最优容量配置.比较了独立用户储能模式和共享储能模式下的容量配置差别.为包含多个用户的储能系统的容量规划提供了一定的参考.

4) 分析了储能系统放电深度与日均投资成本的关系,为储能系统设定合理的放电深度提供了依据.另外,对多用户共享储能相对于单用户储能节省的费用,在运营商和用户间进行合理分配的策略有待进一步研究.

- [9] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575–581.
Ding M, Wang B, Zhao B, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575–581.
- [10] 陈光堂, 邱晓燕, 林伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 85–91.
Chen G T, Qiu X Y, Lin W. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85–91.
- [11] Li Y, Tang X Y, Wang S Z, et al. Energy storage sizing taking into account forecast uncertainties in distributed energy management system [C]//9th International Conference on Modelling, Identification and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 987–992.
- [12] Paridari K, Parisio A, Sandberg H, et al. Demand response for aggregated residential consumers with energy storage sharing[C]//54th IEEE Annual Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 2024–2030.
- [13] Nazari A, Keypour R. A two-stage stochastic model for energy storage planning in a microgrid incorporating bilateral contracts and demand response program[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 21: 281–294.
- [14] Xu T, Meng H, Zhu J, et al. Considering the life-cycle cost of distributed energy storage planning in distribution grids[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2615.
- [15] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709–1716.
Zhou N, Fan W, Liu N, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709–1716.
- [16] 孙秀娟, 张鹏飞, 卞晓雪. 计及多类型需求响应的光伏微网储能容量优化配置[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 108–114.
Sun X J, Zhang P F, Bian X X. Battery storage optimization for capacity configuration of photovoltaic-based microgrid with multi-type demand response[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 108–114.
- [17] 程瑜, 赵鹏飞. 含光伏及储能的民用负荷需求响应策略与效益分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1055–1062.
Chen Y, Zhao P F. Demand response strategy and benefit analysis of residential load with PV and energy storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(4): 1055–1062.
- [18] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭. 独立光伏系统光储容量优化配置方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1271–1276.
Wu X G, Liu Z Q, Tian L T. Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1271–1276.
- [19] Liu J, Ning Z, Kang C, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: A business case study[J]. Applied Energy, 2017, 188: 226–236.
- [20] Liu J, Zhang N, Kang C, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5512–5521.
- [21] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 8–14.
Kang C Q, Liu J K, Zhang N. A new form of energy storage in future power system: Cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 8–14.
- [22] Zhou C K, Qian K J, Malcolm A, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041–1050.
- [23] Nguyen Tu A, Crow M L, Elmore A C. Optimal sizing of a vanadium redox battery system for microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015(6): 729–737.
- [24] Zakeri B, Syri S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 569–596.
- [25] Reza H. Optimal design and operation of energy storage systems and generators in the network installed with wind turbines considering practical characteristics of storage units as design variable[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 680–693.
- [26] Guan Y J, Vasquez J C, Guerrero J M. Coordinated secondary control for balanced discharge rate of energy storage system in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5019–5028.

作者简介

郝木凯(1986–), 男, 硕士, 高级工程师. 研究领域为智能电网.

张伟(1984–), 男, 本科, 高级工程师. 研究领域为智能电网.

董青卫(1995–), 男, 硕士. 研究领域为智能电网, 深度强化学习.