

考虑多时间尺度应用场景的用户侧储能优化配置研究

关洪浩¹, 余中平¹, 高贵亮¹, 于国康¹, 余金¹, 任娟¹, 欧明强^{2*}, 胡伟洋²

¹国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐

²华北电力大学, 北京

Email: *1282354446@qq.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年4月17日; 发布日期: 2021年4月29日

摘要

随着未来电力市场的开放以及售电公司的成立, 售电公司可以通过给电网末端的电力用户直接配置储能系统, 平滑用户用电曲线。也可以参与调频市场辅助服务以提高经济性。本文以多省份电力辅助服务(调频)市场交易规则为基础, 提出一种同时考虑小时级的调节用户用电曲线场景和5分钟级的参与调频市场辅助服务场景的储能系统优化配置模型。以用户年实际支出费用为目标函数, 综合考虑各种收益、建造成本和运行寿命等因素, 利用Gurobi优化求解器进行求解。算例比较了不同运行寿命、建造成本、调频收益系数对配置结果和年收益的影响, 为用户侧储能系统的优化配置提供建议, 具有一定的工程价值。

关键词

多时间尺度, 用户侧储能, 调频市场辅助服务, 储能设备运行寿命, 负荷特性

Optimal Configuration of User Side Energy Storage Considering Multi Time Scale Application Scenarios

Honghao Guan¹, Zhongping Yu¹, Guiliang Gao¹, Guokang Yu¹, Jin Yu¹, Juan Ren¹,
Mingqiang Ou^{2*}, Weiyang Hu²

¹Institute of Economic and Technological Research, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

²North China Electric Power University, Beijing

Email: *1282354446@qq.com

Received: Apr. 2nd, 2021; accepted: Apr. 17th, 2021; published: Apr. 29th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 关洪浩, 余中平, 高贵亮, 于国康, 余金, 任娟, 欧明强, 胡伟洋. 考虑多时间尺度应用场景的用户侧储能优化配置研究[J]. 智能电网, 2021, 11(2): 174-188. DOI: 10.12677/sg.2021.112017

Abstract

With the opening of the electricity market in the future and the establishment of the electricity selling company, the electricity selling company can directly configure the energy storage system to the power users at the end of the grid to smooth the power consumption curve of users. It can also participate in FM market ancillary services to improve economy. In this paper, based on the trading rules of multi-province power auxiliary service (FM) market, an optimal configuration model of energy storage system is proposed, which takes into account both the hour-level scenario of adjusting users' power consumption curve and the 5-minute level scenario of participating in FM market auxiliary service. Taking the actual cost per user year as the objective function and considering various factors such as revenue, construction cost and operating life, this paper uses an optimization solver in Nairobi to solve the problem. The calculation examples compare the effects of different operating life, construction cost and frequency modulation revenue coefficient on the configuration results and annual revenue, which provides suggestions for the optimal configuration of the user-side energy storage system and has certain engineering value.

Keywords

Multi Time Scale, User Side Energy Storage, FM Market Auxiliary Service, Operation Life of Energy Storage Equipment, Load Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的高速发展，用户的高峰负荷不断增加，给输配线路带来了巨大压力。当前，在《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》引导下，我国储能快速发展[1]。储能设备可用于延缓输配线路升级改造，以及在新能源大规模并网时提供备用容量。但其造价高昂，在建设前需优先规划其获利方式及回报周期。

文献[2] [3] [4] [5]的储能设备采用全寿命周期模型，考虑了在调节负荷曲线以及移峰填谷等场景的应用。在考虑建造费用的情况下优化储能配置的额定功率和额定容量，使其全寿命周期收益最大化，但考虑的应用场景过少。

文献[6]-[13]扩展了应用场景，考虑了需求响应、参与调频服务或容量市场等获利形式，但并没有在结合我国电力市场背景的情况下对所提出的模型进行深入地分析，并且采用的是简化的电池老化模型。文献[14] [15]提出了更精确的电池老化模型，但只应用于调频场景。并且对于延缓电池老化，文献[16]提出通过控制储能的荷电状态来降低成本。但是，以上文献并未考虑在优化储能配置方案以及计算电池老化的情况下，其同时参与调节用户负荷曲线和调频服务的情况。

鉴于此，本文为简化模型所设置的优化目标不是全寿命周期收益，而是将所有收益和建造、运维成本折算到一年，得到的用户在安装储能设备后的年实际支出总费用，优化后应使其将至最低。并且对于不同时间尺度应用场景的整合，本文提出各场景所占用储能设备容量相互独立的解决方案。决策变量包括储能设备的额定容量、额定功率，以及分别参与调节用户负荷曲线与调频场景的储能出力。算例结果

表明优化得到的储能配置方案及充放电策略可以使用户在电池退役前获得收益。

2. 调节用户负荷曲线场景

平、谷电价时段，储能设备从电网购电进行充电，高峰电价时段，储能设备放电供给用户用电，以调节用户负荷曲线，储能设备在系统中的接入情况如图 1 所示。

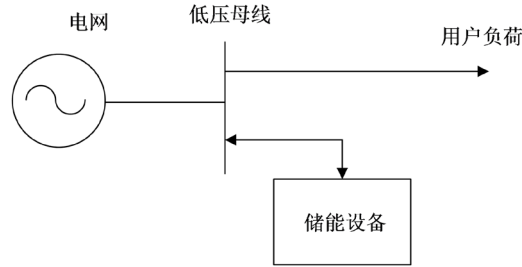


Figure 1. Working diagram of energy storage equipment
图 1. 储能设备工作示意图

建设储能设备后电度电费：

$$C_{load} = \sum_{h=1}^H (P_h - r_h^{shift,dis}) \cdot \Delta h \cdot \varpi_h \quad (1)$$

C_{load} 为装设储能设备后的用户用电费用； $r_h^{shift,dis}$ 为调节用户负荷曲线场景下储能 h 时刻的放电功率； P_h 为用户配置储能设备前 h 时刻的实际用电功率； Δh 为时间间隔； ϖ_h 为 h 时刻的度电单价。

容量电费计算：

$$C_{base} = \lambda_{base} \cdot P_{peak} \quad (2)$$

λ_{base} 为容量电费单价； P_{peak} 为用户负荷曲线峰值。

储能设备从电网购电的费用：

$$C_{ch} = \sum_{h=1}^H r_h^{shift,ch} \cdot \Delta h \cdot \varpi_h \quad (3)$$

C_{ch} 为调节负荷用户曲线场景下储能设备从电网购电的费用； $r_h^{shift,ch}$ 为当前场景下储能设备 h 时刻的充电功率； Δh 为时间间隔； ϖ_h 为 h 时刻的度电单价， H 为 24。

延缓变压器升级改造获得的收益：

$$\delta = \frac{P_{peak} - P_{peak}'}{P_{peak}} \times 100\% \quad (4)$$

$$f_{tran} = (1 + \alpha) C_d \frac{\delta P_{peak}}{K \cos \varphi} \quad (5)$$

以典型日负荷曲线代表全年日均负荷情况。 δ 为年负荷削峰率； P_{peak} 为用户原始年负荷最大值； P_{peak}' 为用户进行储能调节后的年负荷最大值； f_{tran} 为用户年峰值负荷减少所降低的变压器成本； α 为变压器安装费用占设备造价比率； C_d 为工业用户侧变压器单位造价； K 为变压器的负载率； $\cos \varphi$ 为功率因数。

3. 参与调频辅助服务场景

调频里程收益：

$$K_D = \left(\sum_{t=1}^T (r_t^{reg,dis} + r_t^{reg,ch}) \cdot \varpi_f \cdot K_{Ap} \right) \quad (6)$$

K_D 为调频里程收益； $r_t^{reg,ch}$ ， $r_t^{reg,dis}$ 为调频场景下安装储能 t 时刻的充、放电功率； K_{Ap} 为调频机组在执行日的综合调频性能指标； ϖ_f 为调频服务里程价格； T 为 288。

调频出力不匹配惩罚：

$$C_b = \left(\sum_{t \in r_t^{reg} > 0} (C_t \cdot r_t^{reg} - r_t^{reg,dis}) + \sum_{t \in r_t^{reg} < 0} (-C_t \cdot r_t^{reg} - r_t^{reg,ch}) \right) \cdot \varpi_{pen} \quad (7)$$

C_b 为调频出力不匹配惩罚； C_t 为储能 t 时刻上报的调频容量；一个调度周期内的归一化调频信号如图 2 所示， r_t^{reg} 为 t 时刻的归一化调频信号值； $r_t^{reg} > 0$ 时，表示功率缺额为正值，需要储能放电，此时储能的放电功率应不超过实际的调频需求； $r_t^{reg} < 0$ 时，表示功率缺额为负值，需要储能充电，此时储能的充电功率也应不超过实际的调频需求； ϖ_{pen} 为储能实际出力与调频需求出力不匹配时的罚金单价。

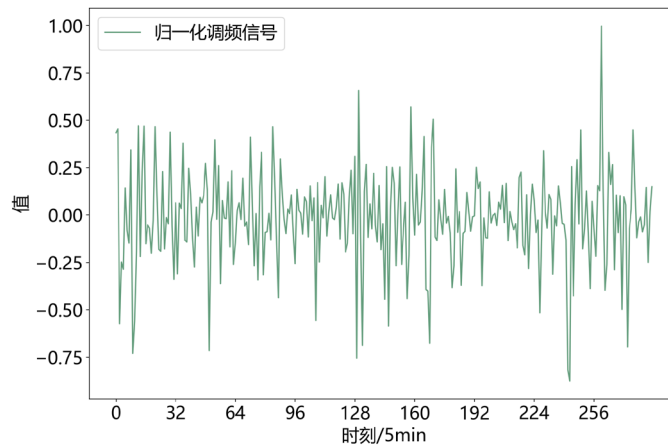


Figure 2. Normalized FM signal

图 2. 归一化调频信号

日调频收益：

$$K_{reg} = K_D - C_b \quad (8)$$

K_{reg} 为日调频收益； K_D 为调频里程收益； C_b 为调频出力不匹配惩罚。调频信号在一个调度周期内不断地快速波动，并且均值为 0，所以本文不计调频过程中可能存在的低储高发套利行为。

4. 储能设备成本

储能设备建造成本

$$C_{inv} = (R^{rate} \cdot \varpi_{R_{inv}} + E \cdot \varpi_{E_{inv}}) \quad (9)$$

C_{inv} 为储能设备投资建设总成本； $\varpi_{R_{inv}}$ 为储能单位功率建设成本； R^{rate} 为待建电池储能最大功率； $\varpi_{E_{inv}}$ 为电池储能的单位容量建设成本； E 为待建电池储能安装容量。

储能设备年运维成本

$$C_{ope} = C_{op} R^{rate} \quad (10)$$

除了一次性的固定投资，储能设备每年还有一定的运维成本，与安装设备的最大功率直接相关。 C_{op} 为储能电池单位充/放电功率的年运维成本。

年金系数

$$AF = \frac{r(1+r)^L}{r(1+r)-1} \quad (11)$$

对于一次性的投资/收益，需要将其折合成每年的成本/收益。 L 为年限； AF_{ess} 为储能设备建设费的年金系数； AF_{tran} 为延缓变压器升级获得收益的年金系数。

5. 用户侧储能优化配置模型

5.1. 目标函数

本文将用户侧所有收益和成本折算到一年，得到了用户在安装储能设备后的年实际支出总费用。优化后，其不仅应低于安装储能设备前的年用电总费用，而且应使其将至最低。

$$C_{sum} = 365 \times (C_{load} + C_{ch} - K_{reg}) + C_{base} + C_{inv} \cdot AF_{ess} - C_t \cdot AF_{tran} + C_{ope} \quad (12)$$

C_{sum} 为折算后的用户年实际支出总费用； C_{load} 为配置储能设备后用户的日直接购电费用； C_{ch} 为储能设备充电的日充电费用； K_{reg} 为日调频收益， C_{base} 为容量电费。

C_{inv} 为储能设备建设费； C_t 为延缓变压器升级获得的收益； C_{ope} 为储能设备年运维费用； AF_{ess} 为储能设备建设费的年金系数； AF_{tran} 为延缓变压器升级获得收益的年金系数。

5.2. 约束条件

1) 不同时间尺度的储能设备出力整合

$$\begin{aligned} R_t^{dis} &= r_{[t/12]}^{shift,dis} + r_t^{reg,dis} \\ R_t^{ch} &= r_{[t/12]}^{shift,ch} + r_t^{reg,ch} \end{aligned} \quad (13)$$

R_t^{ch} ， R_t^{dis} 为 t 时刻所有应用场景的储能冲、放电功率之和； h 为小时时间尺度下的时间变量， t 为 5min 时间尺度下的时间变量。在 Gurobi 中时刻编号从 0 开始， $h = [t/12]$ 使用了取整函数。

$$\begin{aligned} 0 \leq R_t^{ch} \leq R^{rate} \\ 0 \leq R_t^{dis} \leq R^{rate} \end{aligned} \quad (14)$$

所有应用场景的储能出力之和不能越界。

2) 储能设备出力约束

调节用户负荷曲线场景：

用 0~1 变量来控制储能设备在同一应用场景下设备不可同时进行充电和放电行为。

$$\begin{aligned} r_h^{shift,ch} &\leq x_h^{shift,ch} \cdot P^{\max} \\ r_h^{shift,dis} &\leq x_h^{shift,dis} \cdot P^{\max} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} r_h^{shift,ch} &\leq R^{rate} \\ r_h^{shift,dis} &\leq R^{rate} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} x_h^{shift,dis} + x_h^{shift,ch} &\leq 1 \\ x_h^{shift,dis}, x_h^{shift,ch} &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (17)$$

$x_h^{shift,dis}$, $x_h^{shift,ch}$ 为 0~1 变量, 表示调节用户负荷曲线场景下 h 时刻储能设备是否进行充放电行为。
 P^{\max} 为原用户负荷峰值。

调频场景:

$$\begin{aligned} \text{if } r_t^{reg} > 0: r_t^{reg,dis} &\leq r_t^{reg} \cdot C_t \\ \text{if } r_t^{reg} < 0: r_t^{reg,ch} &\leq -r_t^{reg} \cdot C_t \end{aligned} \quad (18)$$

$$C_t \leq R^{rate} \quad (19)$$

t 时刻储能参与调频的功率不超过实际需求, $r_t^{reg} > 0$ 时, 表示功率缺额为正值, 需要储能放电; $r_t^{reg} < 0$ 时, 表示功率缺额为负, 需要储能充电。上报的调频容量不超过储能设备额定最大功率。

$$\begin{aligned} r_t^{reg,ch} &\leq x_t^{reg,ch} \cdot P^{\max} \\ r_t^{reg,dis} &\leq x_t^{reg,dis} \cdot P^{\max} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} r_t^{reg,ch} &\leq R^{rate} \\ r_t^{reg,dis} &\leq R^{rate} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_t^{reg,dis} + x_t^{reg,ch} &\leq 1 \\ x_t^{reg,dis}, x_t^{reg,ch} &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (22)$$

此处的 P^{\max} 为一较大的合理参数便于线性化, 也可采用其他参数。 $x_{i,t}^{reg,dis}, x_{i,t}^{reg,ch}$ 为 0~1 变量, 表示调频场景下 t 时刻储能设备是否进行充放电行为, 1 表示进行, 0 表示不进行。

3) 多时间尺度应用场景的整合

本文考虑使不同应用场景占用的储能设备容量相互独立。

对于调频过程, 调频信号波动大, 设备的充放电行为是相互交替的, 充电过程中占用了一部分设备容量, 但之后又会快速地放电, 所以其在整个优化周期内所占用的容量相对较小。

对于调节用户负荷曲线, 设备需要在低谷时段充电, 在用电高峰时段放电, 需要经历长时间的充电和放电来进行能量的时间转移。在这个过程中, 存储的电能不能马上释放, 所以调节用户负荷曲线场景占用的设备容量相对较大。

为使这两个过程所占用的设备容量相互独立, 本文考虑可以使一个优化周期内各应用场景的净充放电量为 0。

调节用户负荷曲线场景:

$$e_h^{shift} = e_{h-1}^{shift} + \Delta h \cdot r_h^{shift,ch} \cdot \eta_{ch} - \Delta h \cdot r_h^{shift,dis} / \eta_{dis} \quad (23)$$

$$e_0^{shift} = e_H^{shift} = 0 \quad (24)$$

e_h^{shift} 、 e_{h-1}^{shift} 为本时刻和上一时刻用于调节用户负荷曲线场景的储能电量; H 为 24。

调频场景:

$$e_t^{reg} = e_{t-1}^{reg} + \Delta t \cdot r_t^{shift,ch} \cdot \eta_{ch} - \Delta t \cdot r_t^{shift,dis} / \eta_{dis} \quad (25)$$

$$e_0^{reg} = e_T^{reg} = 0 \quad (26)$$

e_t^{reg} 、 e_{t-1}^{reg} 为本时刻和上一时刻用于调频场景的储能电量, T 为 288。

储能设备实际电量:

$$e_t = e_{t-1} + \Delta t \cdot R_t^{ch} \cdot \eta_{ch} - \Delta t \cdot R_t^{dis} / \eta_{dis} \quad (27)$$

$$e_t = e_0 + e_t^{shift} + e_t^{reg} \quad (28)$$

此两条约束等价。 e_t 、 e_{t-1} 为本时刻和上一时刻的储能实际能量。 Δt 为5 min时间间隔， Δh 为一小时的时间间隔； η_{ch} 、 η_{dis} 分别为充放电效率，无量纲。

$$e_{i,0} = e_{i,T} \quad (29)$$

在每个优化周期内，储能设备在各应用场景的净充放电量及总充放电量都为0。
荷电状态约束：

$$SOC^{\min} \cdot E \leq e_t \leq SOC^{\max} \cdot E \quad (30)$$

SOC^{\min} 、 SOC^{\max} 为荷电状态范围。

4) 储能设备运行寿命约束

电池全寿命周期总充放电量不大于电池退役前总可充放电量：

$$L \cdot 365 \cdot \sum_{t=1}^T (R_t^{dis} + R_t^{ch}) / 12 \leq E \cdot 2N \cdot (SOC_{\max} - SOC_{\min}) \quad (31)$$

L 为电池运行寿命； R_t^{dis} 、 R_t^{ch} 为*i*节点*t*时刻储能设备在所有应用场景的总放电/充电功率； E_i 为*i*节点配置储能设备的容量； N 为电池循环寿命； SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 为当前循环寿命下的荷电状态范围。1/12小时表示5 min时间间隔， T 为288。

6. 算例分析

6.1. 最优配置结果

由表1可知，设定不同的储能设备运行寿命得到的最优配置结果不同。但随着运行寿命的增加，配置结果趋于稳定。在运行寿命达到5年之后，需要配置的最大功率在8 MW左右。由于配置容量是影响运行寿命的重要因素，所以其不断增加，但稳定在25到30 MWh之间，在某种充放电策略的情况下，可以保证电池的实际运行寿命达到预定值。

Table 1. Optimal configuration results for different battery life

表 1. 不同电池运行寿命下的最优配置结果

电池运行寿命/(年)	用户年费用/(亿元)	配置储能/(MW/MWh)	本金回报周期/(年)
3	3.358694	1.34/1.90	2.27
4	3.356476	1.06/1.94	2.34
5	3.348691	8.76/14.19	3.35
6	3.344089	8.32/17.53	3.65
7	3.342426	8.68/22.57	4.10
8	3.341962	8.09/24.99	4.47
9	3.341627	7.43/27.63	4.83
10	3.342068	6.99/29.56	5.17

由图3可知，在储能设备运行寿命达到9年时，折合用户年实际支出费用最低，为3.3416亿元，此时其本金回报周期为4.83年。将设备运行寿命看成一个整数变量，则在其等于9时，目标函数取得最优

解, 此时配置结果为: 7.43 MW/27.63 MWh。但在项目实际建设前, 还需考虑当地的储能参与电力辅助准入门槛, 按要求建设设备。

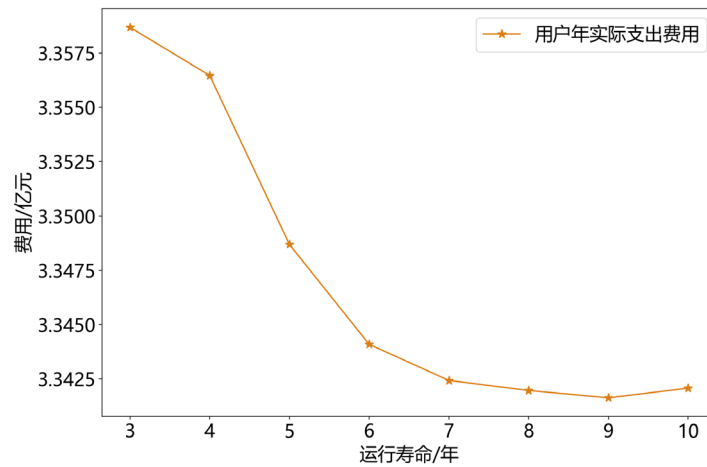


Figure 3. Annual actual expenditure of users under different operation life
图 3. 不同运行寿命下的用户年实际支出费用

由图 4 可知, 功率配置在 8 MW 左右的储能设备, 其对用户负荷曲线的调节情况基本相同, 负荷曲线峰值下降的程度基本一致, 在 4 MW 左右。储能设备配置的最大功率限制了其充放电行为, 要获得更高的削峰水平, 需要配置更高的最大功率, 使得用户的年购电费用降到更低水平。同时储能设备也要配置更大的容量, 来维持运行寿命, 并且配置的容量越大, 可调节的电量越大, 调节用户负荷曲线的效果越好, 但成本也会随之升高。

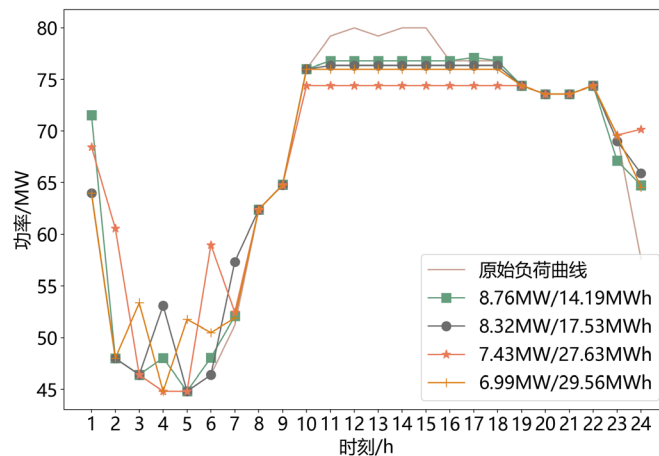


Figure 4. Schematic diagram of user load regulation curve
图 4. 调节用户负荷曲线示意图

最大功率配置的另一个重要作用是参与调频市场辅助服务。调节用户负荷曲线的过程需要在低电价时段大量购电, 需要储能设备配置较大的容量来保存电能, 此时也应考虑成本。

在参与调频市场辅助服务的过程中, 最大功率的配置决定可以获得的调频收益, 功率越高收益越大, 但参与调频过程对电池的损耗也很大, 可以通过配置更大的容量来提高储能设备的运行寿命, 否则会出

现在回收本金之前电池就退役的情况，也要结合建设场景考虑储能设备的最短运行年限。

6.2. 同一设备在不同建造费用下的收益对比

图 5 代表部分时段的调频工作情况。由于上报调频容量的时间间隔与调频出力规划的时间间隔相同，所以参与调频容量上报的时间点，出力都达到要求。设备总的实际存储电量变化曲线如图 6 所示。表 2 和表 3 列出了优化过程的重要参数。所涉及到的所有收益和成本的详细计算结果如表 4 所示。

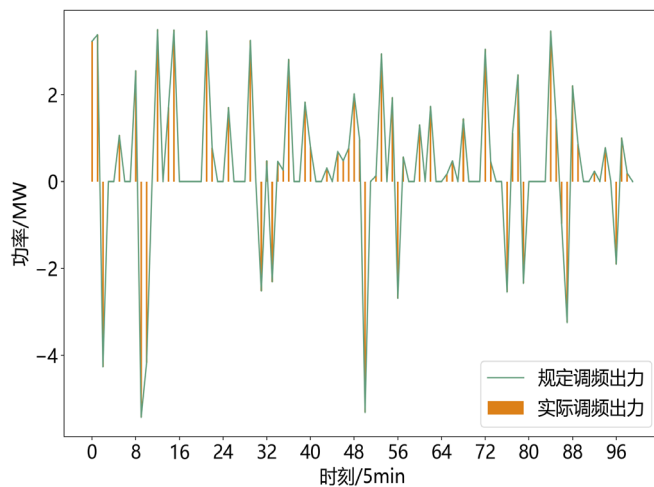


Figure 5. Schematic diagram of frequency modulation in some periods

图 5. 部分时段调频工作示意图

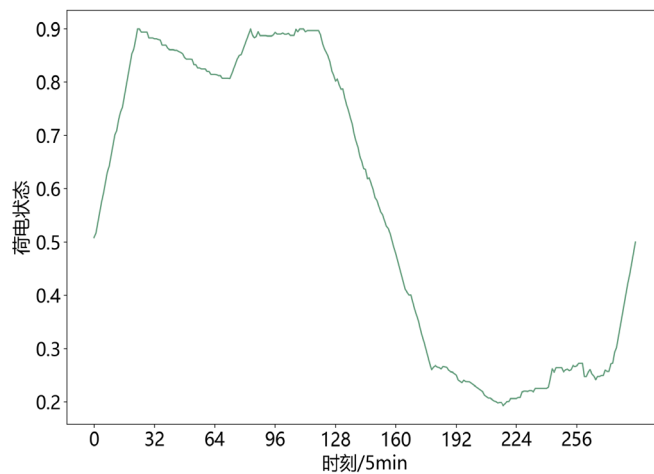


Figure 6. State of charge curve

图 6. 荷电状态变化曲线

Table 2. FM scene parameters

表 2. 调频场景参数

综合调频性能指标 KAP	of/(元/5 min)	open/(元/5 min)	调频限制/%
10	2	20	50

Table 3. Parameters of energy storage equipment**表 3.** 储能设备参数

建设费/(万元/MW)/ (万元/MWh)	固定运维费用/ (万元/MW·年)	循环次数/(次)	充放电深度/(%)
80/100	8	5000	90

Table 4. Revenue/cost entry**表 4.** 收益/成本条目

单项	参数
储能设备运行年限/(年)	9
年金系数	0.16
变压器设备寿命/(年)	20
年金系数	0.1
原全年总电费/(元)	336054525
现全年总电费/(元)	331819986
减少用电费用收益/(万元)	423
延缓变压器升级收益/(万元)	2640
调频收益/(万元)	182
年总收益/(万元)	869
设备费/(万元)	3910
年净收益/(万元)	809
本金回报周期	4.83
原负荷峰值/(MW)	80
现负荷峰值/(MWh)	76
削峰率/(%)	5

储能设备配置的规模基本决定了其充放电行为，所以年净收益基本没有变化，如表 5 所示。在建造费不断升高的过程中，本金回报周期不断延长，在当前表格的参数组中，并没有出现回报周期超过电池运行寿命的情况，都可以在电池退役之前收回本金。但如果考虑资金的时间性，在 5 年的时间，计算时间成本后的总建设费会有大幅提升，动态回报周期将比本金回报周期长。

Table 5. Comparison of principal return periods under different construction costs**表 5.** 不同建造费用下的本金回报周期对比

功率费(万元/MW)/ 容量费(万元/MWh)	建设费/ (万元)	年净收益/ (万元)	回报周期/ (年)	电池运行寿命/(年)
60/100	1945	771	2.52	5
60/120	2228	771	2.89	5
60/140	2512	771	3.26	5

Continued

80/100	2220	771	2.75	5
80/120	2404	771	3.12	5
80/140	2863	771	3.71	5
100/100	2295	771	2.98	5
100/120	2578	771	3.35	5
100/140	2863	771	3.72	5

对比表 6 的最优配置结果，及其优化的年用户实际支出成本，安装储能设备前用户的年实际购电费用为 3.3605 亿元。在电池运行寿命为 5 年的情况下，如果方案的本金回报周期接近 4 到 5 年，则该投资建设方案在考虑通货膨胀率以及折现率的情况下实为亏损。

Table 6. Optimal configuration results of energy storage equipment

表 6. 储能设备最优配置结果

储能配置/ (MW/MWh)	建设费/(万元)	年维护费/(万元)	年净收益/(万元)	本金回报周期/(年)	运行寿命/(年)
7.43/27.63	3910	60	809	4.83	9

6.3. 不同设备建造费用下的最优配置结果对比

综合调频性能指标暂定为 10，表 7 的调频里程报价为 2 元/5 min，表 8 的报价为 2.5 元/5 min；在不同报价的情况下，不同建设成本对应的盈亏状态不同。一般调频里程报价的上限为 5 元/(MW·5 min)，但考虑到电力市场的竞争，在估算项目能否盈利时，考虑以较低的调频收益系数保障数据的有效性。

Table 7. Comparison of optimal allocation results under different construction costs with lower FM revenue

表 7. 不同建造费用下的最优配置结果对比(较低调频收益)

功率费(万元/MW)/ 容量费(万元/MWh)	储能配置/ (MW/MWh)	本金回报周期/ (年)	电池运行寿命/ (年)
60/100	80/126	3.59	5
60/120	10.52/16.43	3.2	5
60/140	8.98/13.97	3.5	5
80/100	19.79/31.57	3.41	5
80/120	8.76/14.19	3.35	5
80/140	8.91/14.02	3.75	5
100/100	7.46/15.26	3.18	5
100/120	7.45/15.14	3.6	5
100/140	1/1.94	2.93	5

Table 8. Comparison of optimal allocation results under different construction costs with higher FM revenue
表 8. 不同建造费用下的最优配置结果对比(提高调频收益)

功率费(万元/MW)/ 容量费(万元/MWh)	储能配置/ (MW/MWh)	本金回报周期/ (年)	电池运行寿命/ (年)
60/100	80/127	3.27	5
60/120	80/124	3.73	5
60/140	9.40/14.65	3.27	5
80/100	80/127	3.56	5
80/120	12.21/19.15	3.3	5
80/140	9.10/14.13	3.49	5
100/100	25.27/40.12	3.51	5
100/120	8.79/14.20	3.35	5
100/140	8.98/14.01	3.72	5

在相同的建造成本下，调频里程报价提高 25%之后，可以通过配置更大的储能设备来获取更高的收益，其充放电策略也有大幅改变。若两种情况下配置储能方案大致相同，可以缩短本金回报周期数月。但如果建造成本过高，则收益很小，不该建设大型设备。

6.4. 不同调频里程报价及性能指标下的收益对比

为简化，将调频里程单价与综合调频性能指标的乘积称为综合调频收益系数。随着综合调频收益系数的升高，本金回报周期逐渐降低，如图 7 所示。当收益比较低，比如综合调频收益系数为 10 时，会出现回报周期与实际运行寿命的差距接近 1 年的情况，如表 9 所示。因为调频辅助服务市场的调频里程报价范围会随着政策的不同而改变，近几个月某地区的调频里程报价已经下调。当参与调频辅助服务的收益较低无法收回本金时，考虑电池减少或不参与调频辅助服务市场来延长电池寿命，减少亏损。

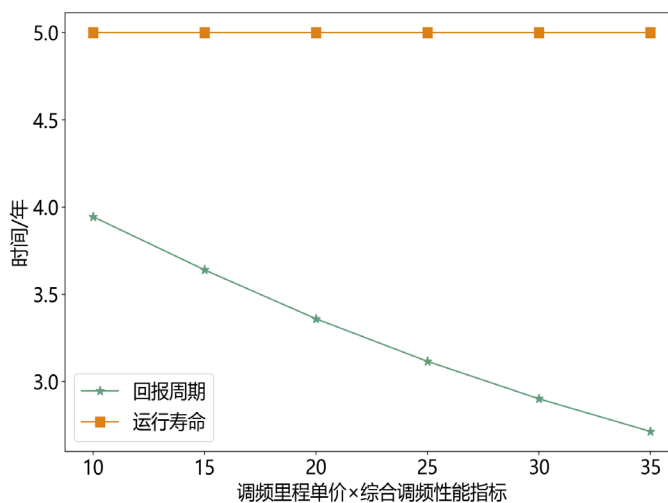


Figure 7. Return cycle diagram
图 7. 回报周期变化示意图

Table 9. Comparison of principal return cycle under different income
表 9. 不同调频收益下的本金回报周期对比

综合调频收益系数 K_{AP}	年净收益/(万元)	回报周期/(年)	电池运行寿命/(年)
10	609	3.95	5
15	660	3.64	5
20	715	3.36	5
25	771	3.12	5
30	828	2.90	5
35	885	2.72	5

6.5. 不同调频工作时间限制下的收益对比

由图 8 可知，对储能设备参与调频的工作频率/工作时段进行限制，可以大幅提高电池运行寿命，本金回报周期也相应的延长，但不超出实际运行寿命。在调频时段放开到全天时间的 50% 以上之后，储能设备参与调频的充放电策略基本稳定，本金回报周期和实际运行寿命也不再有大程度的变化，如表 10 所示。在限制比例为 50% 时，回报周期较短，运行寿命较长。

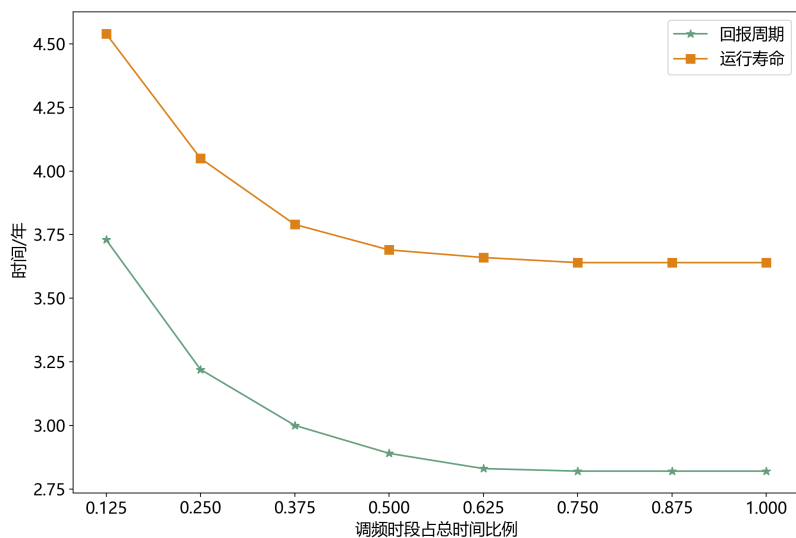


Figure 8. Return cycle and operating life change diagram

图 8. 回报周期与运行寿命变化示意图

Table 10. Comparison of operating life and principal return period under different participation limits
表 10. 不同参与调频限制下的运行寿命与本金回报周期对比

参与调频时段占日总时间的比例/(%)	实际运行寿命/(年)	回报周期/(年)
12.5	4.54	3.73
25.0	4.05	3.22
37.5	3.79	3.00
50.0	3.69	2.89
62.5	3.66	2.83

Continued

75.0	3.64	2.82
87.5	3.64	2.82
100.0	3.64	2.82

7. 结论与展望

本文建立了一种用户侧储能同时参与调节用户负荷曲线与调频辅助服务的联合优化模型,综合考虑了各方面收益、储能设备建设费用及电池损耗。设备参与各应用场景的充放电策略和实际出力达到预期,在调节用户负荷曲线场景中削峰明显,在调频场景中按照系统的规定出力进行充放电行为;本文并未设置一个固定的储能设备运行年限,而是充分考虑了充放电过程所造成的电池损耗;并且该储能配置方案和充放电策略为用户带来了收益,所以本文提出的模型是科学的、准确的;本文提出的使各场景占用储能容量相互独立的方案是可行的。

1) 优化结果表明,在预定运行寿命为9年时,配置7.43 MW/27.63MWh的储能设备可以使用户获得最高的年收益。继续提高配置水平可以使各应用场景的参与程度更高,并且单独提高配置容量可延长运行寿命,但收益会降低。

2) 用户侧储能设备同时参与该两种应用场景可以取得收益,可进行实际工程应用。但受到收益系数、设备建造费用、预定运行年限和充放电策略等因素的制约,若收益系数过低或建造费用过高则考虑不配置储能设备。

3) 可以通过调整充放电策略来延长设备的实际运行寿命,但回报周期也会延长。

但是同时考虑这两种应用场景的全寿命周期模型以及高功率充放过程对电池运行寿命的实际影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 王思. 2020 中国储能政策盘点: 储能将正式迈入“十四五”发展新阶段[J]. 新能源科技, 2021(2): 2-5.
- [2] Zhang, Y., Xu, Y., Yang, H., Dong, Z.Y. and Zhang, R. (2020) Optimal Whole-Life-Cycle Planning of Battery Energy Storage for Multi-Functional Services in Power Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **11**, 2077-2086. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2019.2942066>
- [3] 丁逸行, 徐青山, 吕亚娟, 李淋. 考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1179-1186.
- [4] 郭久亿, 刘洋, 郭焱林, 许立雄. 不同典型用户侧储能配置评估与运行优化模型[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4245-4254.
- [5] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 王德顺, 桑丙玉, 杨波. 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.
- [6] Shi, Y., Xu, B., Wang, D. and Zhang, B. (2018) Using Battery Storage for Peak Shaving and Frequency Regulation: Joint Optimization for Superlinear Gains. *IEEE Transactions on Power Systems*, **33**, 2882-2894. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2749512>
- [7] Zhu, H., Xue, J., Li, Y., Tao, Y., He, D. and Shen, Y. (2019) Policy Analysis and Operational Benefit Evaluation of China's Hundred Megawatt-Scale Electrochemical Energy Storage Stations in Power Auxiliary Service Market. 2019 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, 21-23 November 2019, 2812-2816. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975008>
- [8] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-21. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.202152>, 2021-03-15.
- [9] 麻秀范, 陈静, 余思雨, 李思远, 卢文冰. 计及容量市场的用户侧储能优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4028-4037.
- [10] 唐琦雯, 肖艳炜, 项中明. 调频市场定价及出清机理的研究及启示[C]//中国电机工程学会电力市场专业委员会

2019 年学术年会暨全国电力交易机构联盟论坛论文集. 2019: 11.

- [11] Peng, P., *et al.* (2021) Optimized Economic Operation Strategy for Distributed Energy Storage with Multi-Profit Mode. *IEEE Access*, **9**, 8299-8311. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047230>
- [12] Li, F., Li, X., Zhang, B., Li, Z. and Lu, M. (2021) Multiobjective Optimization Configuration of a Prosumer's Energy Storage System Based on an Improved Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithm. *IEEE Access*, **9**, 27015-27025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057998>
- [13] 鞠立伟, 于超, 谭忠富. 计及需求响应的风电储能两阶段调度优化模型及求解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1287-1293.
- [14] Xu, B., Shi, Y., Kirschen, D.S. and Zhang, B. (2018) Optimal Battery Participation in Frequency Regulation Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, **33**, 6715-6725. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2846774>
- [15] 温可瑞, 李卫东, 韩松, 晋萃萃, 赵云丽. 考虑日历寿命的电池储能系统参与一次调频服务配置容量与控制参数协同优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2185-2193.
- [16] Zhang, Y.J.A., Zhao, C., Tang, W. and Low, S.H. (2018) Profit-Maximizing Planning and Control of Battery Energy Storage Systems for Primary Frequency Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **9**, 712-723. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2562672>