

用户侧重力-蓄电池混合储能系统配置优化与效益分析

王建元, 烁 伦

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132000)

摘要: 现有的用户侧储能以蓄电池储能为主, 手段较为单一, 回收不当对环境也会造成危害; 同时用电高峰期峰谷差较大, 这既提升了用户用电成本, 也给电网的稳定运行带来了挑战。针对此问题, 建立了重力储能的充放电模型, 并在此基础上提出一种应用蓄电池与重力储能相结合的混合储能模型。首先以功率、容量和寿命等变量为条件对该模型进行了适当的约束。下一步以用户综合收益最高为目标函数利用量子粒子群优化算法对模型进行配置寻优。然后得出了混合储能最优的功率、容量配置。在 MATLAB 2021b 软件环境下, 使用江苏省南京市用户侧智能电能表实际负荷数据算例进行分析, 最后可以得出混合储能系统及其优化方案可以减小用户侧用电峰谷差, 并且使用户侧用电成本有所降低的结论, 验证了其合理性与经济性。

关键词: 重力储能; 量子粒子群算法; 储能配置优化; 用户侧储能; 混合储能

Configuration optimization and benefit analysis of user side gravity-battery hybrid energy storage system

WANG Jianyuan, SHUO Lun

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China)

Abstract: The existing user side energy storage is mainly battery energy storage, and the means are relatively simple. Improper recovery will also cause harm to the environment; At the same time, the difference between peak and valley during the peak period of power consumption is large, which not only increases the power consumption cost of users, but also brings challenges to the stable operation of the power grid. To solve this problem, the charge and discharge model of gravity energy storage is established, and proposed a hybrid energy storage model based on the combination of battery and gravity energy storage. Firstly, the model was properly constrained by variables such as power, capacity and life. The next step was to optimize the configuration of the model by using quantum particle swarm optimization algorithm with the highest comprehensive income of users as the objective function. Then the optimal power and capacity configuration of hybrid energy storage was obtained. Besides, under the environment of matlab2021b software, the actual load data of user side smart meters in Nanjing, Jiangsu Province were used for analysis. Finally, it can be concluded that the hybrid energy storage system and its optimization scheme proposed can reduce the peak valley difference of user side power consumption and reduce the cost of user side power consumption, which verifies its rationality and economy.

Key words: gravity energy storage; quantum particle swarm optimization; energy storage configuration optimization; user side energy storage; mixed energy storage

吉林省科技厅面上项目 (20220101252JC)

0 引言

随着全球逐步摆脱新冠疫情对社会经济发展的影响，电力行业正逐步迈入新一轮发展黄金期。随着各国用电量大幅增长的同时，电力供需不平衡的问题十分突出^[1-4]。而储能技术作为一种技术手段，可以在电力供需的矛盾之间设立“缓冲带”^[5-7]。然而现阶段针对用户侧储能的研究相对较少，研究成果的效益难以在用户侧落地生根。单一模式的用户侧储能投资经济性较差，如何通过应用更加丰富的储能方式加以对应的优化配置来使用户侧储能的经济效益最大化，对储能行业乃至整个电力行业的发展具有战略性的意义^[8]。

目前针对用户侧的储能优化研究，文献[9]提出了一种用户侧电池储能的优化配置和运行调度的方法，包括分析用户在安装储能设备后获得收益的情况以及储能设备的功率、容量等大小范围。文献[10]考虑负荷、电池储能等约束条件，建立了以净负荷方差、用户侧用电支出等为优化目标的电池储能系统调度鲁棒优化模型，并同时考虑了用户负荷波动、新能源出力波动等不确定因素。文献[11]提出了一种适用于多种收益模式的用户侧储能盈利方法。作者结合分时电价、两部制电价、需求响应以及应急供电等场景，以储能月收益最大为目标函数，建立了一个综合考虑峰谷套利、需量管理、需求响应和应急供电的储能优化模型。文献[12]建立了电池储能系统（Battery Energy Storage System, BESS）的净利润与其配置和运行的函数关系，提出了一个两层框架来优化此函数并求解目标函数。该优化框架可用于为大型电力用户建立自己BESS的决策过程提供方法，并通过实际案例进行演示。文献[13]提出一种计及容量市场和保供电交易模式的用户侧储能优化配置方法，可提高用户侧储能投资容量，降低电网尖峰负荷，为电网和用户带来更多收益。文献[14]使用一种双层优化配置模型，考虑分布式光伏发电和储能使用寿命方面的

问题。运用YALMIP求解器对该优化模型进行求解后，通过算例验证了该模型的有效性。结果表明，光伏和储能合理配置可以有效降低用户的年总成本。文献[15]提出了偏向解析方法的分段削峰启发式模型求解方法，涉及削峰大小和放电深度的枚举，并针对储能配额规律的研究提出了合理的指标设计。

基于以上研究的成果和存在的不足，本文基于传统的蓄电池储能与较为新颖的重力储能两种储能方式相结合的思想，对两种储能构成的混合储能系统进行配置优化。

首先，在电网用户侧对混合储能进行建模，并通过合理预设对混合储能模型进行约束，确定模型相关的参数范围；随后，考虑系统的建设成本、运营成本以及峰谷套利所获得的收益，对储能系统成本和收益进行建模，并确定储能综合收益为优化配置的目标函数；下一步采用量子粒子群算法对该模型进行迭代寻优，得出每日消峰填谷后的负荷曲线变化、两种储能的最优出力和配置容量，还有最优化配置后的最优收益；最后，以用户侧实际负荷数据算例对上述研究过程进行了验证。

1 混合储能系统建模与约束

1.1 系统结构

本文提出的混合储能系统包括重力储能、蓄电池储能、负荷和控制器，如图1所示。重力储能装置和蓄电池储能装置通过控制器的分配指令进行充放电动作，对负荷功率进行消峰填谷，达到降低用电成本的目的。

1.2 重力储能系统建模

重力储能技术为近年来新兴的一种大规模物理储能技术，主要通过重物的提升和下放来拖动电动机，从而存储和释放电能。本文主要采用占地面积较小，方便利用地形的塔式/井式重力储能装置，结构如图2所示。它的特点是重物运动轨迹与地面呈直角，使储能装置的能量密度最大化。

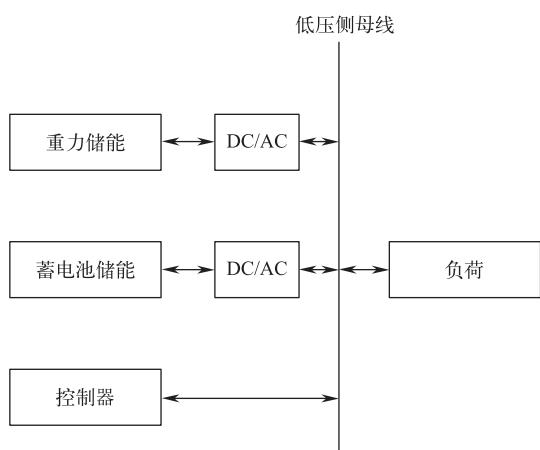


图1 混合储能系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of hybrid energy storage system

储能工作状态分为充电状态与放电状态，储能充电时，重物匀速上升，由受力分析有

$$F_C = mg + F_{fc} \quad (1)$$

式中， F_C 为充电时电动机对重物的拉力； m 与 g 分别为重物的质量与重力加速度； F_{fc} 为重物上升过程中绳索等其他设备运行过程中产生的摩擦力，以及电动机等设备发热造成的能量损耗等效的总摩擦力。

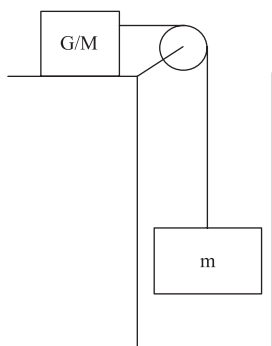


图2 重力储能装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gravity energy storage device structure

由重物上升过程中的储能高度与速度关系可知

$$H = v_C(t) \Delta t \quad (2)$$

式中， H 为有效储能高度； $v_C(t)$ 为重物上升过程中运动的速度； Δt 为储能系统的运行周期。

储能的充电功率 P_C^{gravity} 计算公式为

$$P_C^{\text{gravity}} = F_C v_C(t) \quad (3)$$

而系统的效率 η_c 与等效摩擦力 F_{fc} 大小有关，在数值上等于充电过程存储的重力势能与电力拉力做功之比，即

$$\eta_c = \frac{mgH}{F_C H} \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可以推导出重力储能装置的充电特性曲线，如图3所示。储能的充电功率主要与储能高度以及重物的总质量有关，具体的质量与储能高度需要结合工程实际确定。

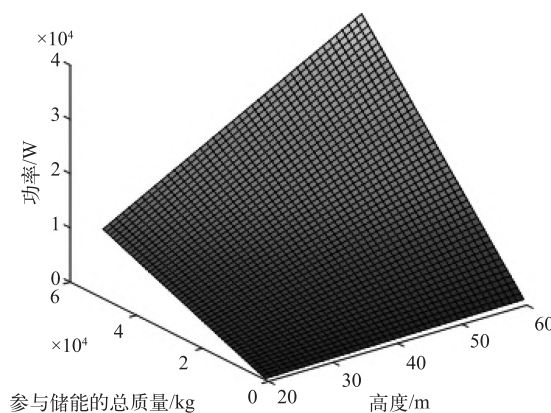


图3 重力储能装置充电特性曲线

Fig. 3 Charging characteristic curve of gravity energy storage device

与充电过程类似，重力储能放电过程为重物匀速下降，分析此时重物的受力可得

$$F_G + F_{fg} = mg \quad (5)$$

式中， F_G 为放电过程中重物对发电机的拉力； F_{fg} 为重物下降过程中的等效摩擦力。

由重物下降过程中储能高度与速度的关系可知

$$H = v_G(t) \Delta t \quad (6)$$

式中， $v_G(t)$ 为重物下降过程中的运动速度。

储能的放电功率 $P_G^{\text{gravity}}(t)$ 计算公式为

$$P_G^{\text{gravity}}(t) = F_G v_G(t) \quad (7)$$

与充电过程同理，放电过程的效率 η_G 计算公式为

$$\eta_G = \frac{F_G H}{mgH} \quad (8)$$

由式(4)~式(8)可以推导出重力储能装置的放电特性曲线，如图4所示。

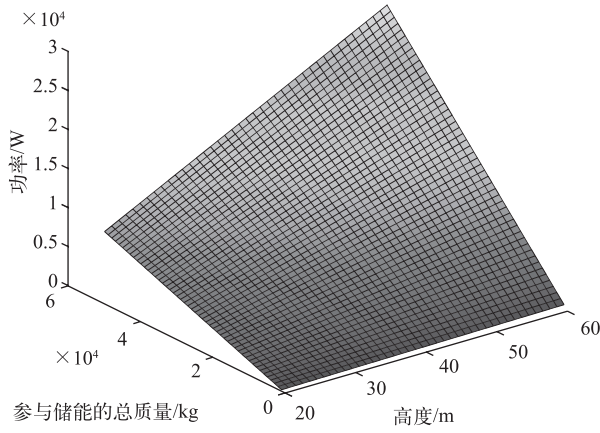


图4 重力储能装置放电特性曲线

Fig. 4 Discharge characteristic curve of gravity energy storage device

而重力储能装置的荷电状态与重物实时的高度有关，其荷电状态计算公式为

$$\text{SOC}_{\text{gravity}}(t) = \frac{h(t)}{H} \quad (9)$$

式中， $h(t)$ 为重物相对于最低点的高度。

由于蓄电池储能属于非常常见、技术成熟度很高的传统储能方式，故它的模型不再赘述。

1.3 储能系统充放电功率约束

对储能系统充放电功率的限制主要分为两个方面，即蓄电池储能、重力储能的充电功率和放电功率均不能超过充放电功率的额定最大值，否则会对设备造成损害，甚至危及电网和人身安全。对于蓄电池储能作以下约束

$$\begin{cases} P_C^{\text{battery}} < 0 \\ |P_C^{\text{battery}}| \leq |P_{C,\max}^{\text{battery}}| \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_G^{\text{battery}} \geq 0 \\ P_G^{\text{battery}} \leq P_{G,\max}^{\text{battery}} \end{cases} \quad (11)$$

式中， P_C^{battery} 为蓄电池充电功率； P_G^{battery} 为蓄电池放电功率。

对于重力储能装置作以下约束

$$\begin{cases} P_C^{\text{gravity}} < 0 \\ |P_C^{\text{gravity}}| \leq |P_{C,\max}^{\text{gravity}}| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_G^{\text{gravity}} \geq 0 \\ P_G^{\text{gravity}} \leq P_{G,\max}^{\text{gravity}} \end{cases} \quad (13)$$

式中， P_C^{gravity} 为重力储能充电功率； P_G^{gravity} 为重力

储能放电功率。

1.4 储能周期电量平衡

为了保证储能的初始状态稳定，需要保持储能的初始能量状态在一个可控而且稳定的范围之内，即一段时间内储能的功率值之和为0，即

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P(t) \quad (14)$$

$$P'(t) = P(t) - \Delta P \quad (15)$$

式中， ΔP 为储能装置的充放电功率变化量的大小； N 为储能的调节工作时段数； $P(t)$ 为充放电功率减去储能修正量后的出力。

1.5 额定容量计算

蓄电池的荷电状态大小可以用来计算电池的额定容量，即

$$C(t) = C_0 + \frac{E(t)}{E_{N,\text{battery}}} \quad (16)$$

式中， $C(t)$ 为某一时刻储能的荷电状态；而容量 $E(t)$ 的正负取决于 t 时刻储能的充放电状态，储能充电时大于0，放电时小于0； C_0 为初始时刻储能荷电状态； E_N 为蓄电池储能的额定容量值。

对于蓄电池储能的最大和最小荷电状态，额定容量 $E_{N,\text{battery}}$ 一定满足

$$E_{N,\text{battery}} = \frac{E(t)_{\max}}{C_{\max} - C_0} \quad (17)$$

$$E_{N,\text{battery}} = \frac{E(t)_{\min}}{C_0 - C_{\min}} \quad (18)$$

式中， $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 分别为蓄电池储能的最大和最小荷电状态。

由此可知蓄电池储能的额定容量为

$$E_{N,\text{battery}} = \frac{E(t)_{\max} - |E(t)_{\min}|}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (19)$$

而重力储能的额定容量主要由重力元件的单组质量 m_0 、数量 l 、高度 h 和系统效率 η 决定。它的额定功率计算公式为

$$E_{N,\text{gravity}} = \eta l m_0 g h \quad (20)$$

式中， g 为重力加速度。

1.6 初始状态的确定

当蓄电池储能处于最小荷电状态时满足

$$C_0 - C_{\min} \geq \frac{E(t)_{\min}}{E_N} \quad (21)$$

联立式 (19)、式 (21) 可以求出蓄电池储能的初始荷电状态为

$$C_0 = \frac{C_{\max} E(t)_{\min} - C_{\min} E(t)_{\max}}{E(t)_{\min} - E(t)_{\max}} \quad (22)$$

1.7 两种储能的循环寿命

下面分别介绍本文中两种储能方式的循环寿命计算方法, 蓄电池的使用寿命与其循环次数和每次使用时的充放电深度有关。电池工作在有效充放电电量下的循环次数是恒定的, 但是实际工程应用中电池不能工作在有效放电量下^[16-17]。因此蓄电池在充放电深度为 D 时的循环次数为 N_D^R , 即

$$N_D^R = N_{100\%}^R D^{-k} \quad (23)$$

式中, $N_{100\%}^R$ 为蓄电池工作在100%充放电电量下的循环次数; k 为采用的储能电池在求取循环次数时用到的系数, 一般取决于电池的具体型号和厂家。

当蓄电池充放电深度为 D 时, 其在100%充放电深度下的循环次数为

$$N_{\text{eq}} = N_D D^k \quad (24)$$

式中, N_{eq} 为储能完全充放电时的充放电次数; N_D 为储能充放电深度为 D 时的充放电次数。

重力储能装置的循环寿命计算公式为

$$N_G = \frac{N_{\max}}{N_0} \quad (25)$$

式中, $N_{\max}$ 为储能装置充放电次数的最大值; N_G 为重力储能装置循环使用的天数; N_0 为储能装置每日充放电次数的平均值。重力储能装置的循环寿命只与其充放电次数有关。

2 储能系统收益模型与运行规则

2.1 系统的成本

储能成本分为三个部分, 分别为系统的建设

成本、运营维护成本与回收成本。

2.1.1 建设成本

储能装置的建设成本即系统进行建设时所涉及的设计、软硬件采购和安装等费用。根据储能的技术特点, 建设成本可以分为容量成本和功率成本两部分, 即

$$F_{\text{inv}} = F_E + F_P \quad (26)$$

式中, F_E 为系统中与容量相关的设备, 如电池组、重力储能塔和重力储能元件等设备的安装和采购费用, 可用单位容量下储能设备的成本 U_E 和储能的额定容量 E_N 计算, 即

$$F_E = U_E E_N \quad (27)$$

功率成本与功率密切相关的设备有关, 如电池组充放电需要的变流器、重力储能元件的吊装和驱动电动机等设备, 它可用单位功率下储能设备的成本 U_P 和储能的装机容量 W_P 计算, 即

$$F_P = U_P W_P \quad (28)$$

2.1.2 运营维护成本

运营维护成本指储能在运行和维护过程中所产生的费用, 它与蓄电池储能、重力储能运行期间所充放的总电量 E_{total} 与单位电量下的运营维护成本 $U_{E,\text{option}}$ 有关, 即

$$F_{\text{option}} = U_{E,\text{option}} E_{\text{total}} \quad (29)$$

2.1.3 回收成本

储能的回收成本指的是储能装置在到达使用寿命后拆除所用的费用与二次回收所得利润之差, 它可正可负。引入报废成品率 α_{rec} 为储能回收成本与投资成本的比值, 则

$$F_{\text{rec}} = F_{\text{inv}} \alpha_{\text{rec}} \quad (30)$$

2.1.4 总成本

储能全寿命周期内的总成本为以上各项成本之和, 即

$$F_1 = F_{\text{inv}} + F_{\text{option}} + F_{\text{rec}} \quad (31)$$

2.2 储能的收益

基于分时电价的市场环境, 在低电价时对储能进行充电, 平电价以及高电价时放电满足负荷

需求, 以此实现峰谷套利, 从而降低电力用户的用电成本。

峰谷套利收益具体可以表示为

$$C = \sum_{j=1}^d \sum_{i=1}^{48} (P_{\text{load},i} + P_{c,i} - P_{g,i}) P_i \Delta t \quad (32)$$

式中, d 为储能周期的天数; $P_{\text{load},i}$ 为用户侧的负荷原始功率; $P_{c,i}$ 、 $P_{g,i}$ 分别为第 i 时刻储能的充电功率和放电功率; P_i 为第 i 时刻的电价; Δt 为充放电时间, 本文与用户侧的负荷采样时间保持一致, 设置为30 min。

2.3 混合储能的运行规则

本文中的用户侧混合储能系统分为蓄电池储能与重力储能两部分。结合蓄电池响应灵活但成本较高, 重力储能装置响应较慢但成本较低的特点, 按照蓄电池开始放电在先, 重力储能开始放电在后的原则先后投入运行。采用最大重叠离散小波变换法在蓄电池储能与重力储能之间进行功率分配, 以实现收益的最大化。

3 算法流程

量子粒子群算法与标准粒子群算法的初始设置相似, 首先确定粒子数量, 然后使用如下公式对它们的位置进行迭代更新

$$M_{\text{best}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i-\text{best}} \quad (33)$$

$$P_i = \lambda P_{i-\text{best}} + (1-\lambda) g_{\text{best}} \quad (34)$$

$$x_{i+1} = P_i + \alpha |M_{\text{best}} - x_i| \ln\left(\frac{1}{u}\right) \beta \quad (35)$$

式中, M 为种群数量; $P_{i-\text{best}}$ 为第 i 个粒子的历史最佳位置; M_{best} 为整个种群中所有粒子历史最佳位置的平均值; g_{best} 为当前全局最优的粒子; x_i 为第 i 个粒子的位置; P_i 为它的更新; λ 和 u 均为(0,1)之间的随机数; α 为创新参数; β 为收缩-扩张因子。

具体参数设置为

$$\alpha = (-1)^{0.5+u} \quad (36)$$

$$\beta = 0.5 + \frac{i_{\text{max}} - i_n}{0.5i_{\text{max}}} \quad (37)$$

式中, i_{max} 为最大迭代次数; i_n 为当前迭代次数。

为了增强取值的随机性, 本文将 α 的取值限定在-1的整数次方上。同时, 为了对例子收敛速度进行一定的约束, 按照线性递减权的方法对收缩扩张因子进行处理。在寻优前期需要能够更快速找到全局最优解, 因此为了提升算法的全局搜索能力, 使收缩-扩张因子 β 减小速度较慢; 在寻优后期需要较快的算法速率, 因此需要收缩-扩张因子 β 减小较快, 从而提升算法的速率。另一方面, 量子粒子群算法中, 解可以有一定概率随机出现在寻优空间某个位置, 增强了寻优的随机性。除此之外, 量子粒子群算法还具有变量少、易于实现的特点。

量子粒子群算法流程如图5所示。

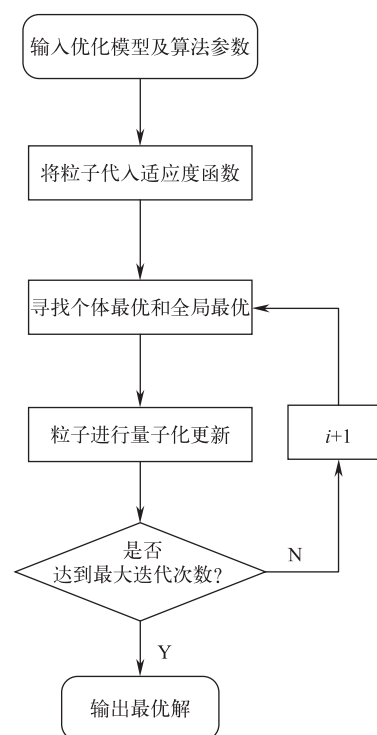


图5 量子粒子群算法流程图

Fig. 5 Flowchart of quantum particle swarm optimization

1) 粒子初始化阶段。首先设定搜索空间, 即变量的搜寻范围 $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$, 终止条件 I_{max} , 种群的维数 D , 种群个数 N , 初始化种群粒子。

2) 粒子优劣判定。将种群中每个个体的初始化位置作为历史最优解 $P_{i-\text{best}}$, 将每个 $P_{i-\text{best}}$ 代入适应度函数, 得出最优的粒子作为全局最优解

g_{best} ，同时算出种群中平均历史最佳 M_{best} 。

3) 粒子进行量子化迭代更新。粒子进行首次迭代更新时 $i=1$ ，以后每次迭代 $i=i+1$ 变化。粒子按照式(33)~式(35)进行量子化迭代更新。

4) 粒子优劣再判定。将迭代更新后粒子重复步骤2)，计算出每个粒子的适应度值，通过适应度值对比选取全局最优解 g_{best} 和各粒子历史最优解 P_{i-best} 。

5) 判定是否终止。如果 $i=I_{max}$ ，表示已达到终止条件；如果 $i<I_{max}$ ，表示粒子还需要继续更新求解，则返回继续迭代更新。

4 算例分析

4.1 数据预设

本文的实测数据采用江苏省南京市某台区用户侧智能电表数据集，如图6所示。使用同一台区中100户无异常用电行为（异常用电用户已经排除）的用户在100天内的负荷数据作为实际负荷数据，采样时间为每30 min采样一次；在电网变压器低压侧安装储能装置，对储能系统的功率、容量和充放电策略进行优化。如图7所示，本算例中基于江苏省南京市一天24 h内的分时电价机制，采用电价高峰时期、平电价时期放电，电价低谷时期充电的储能运行策略。

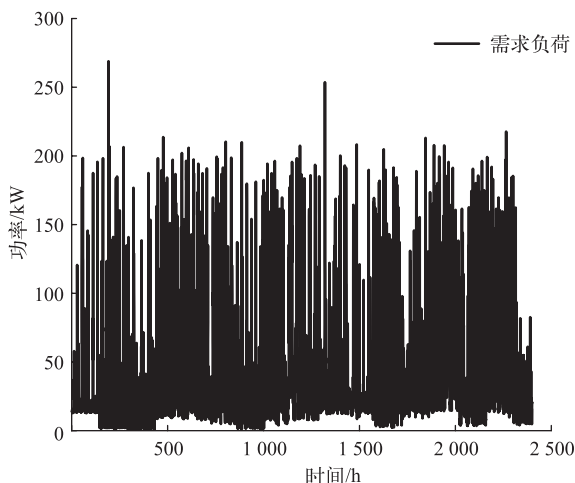


图6 变压器低压侧负荷曲线

Fig. 6 Low voltage side load curve of transformer

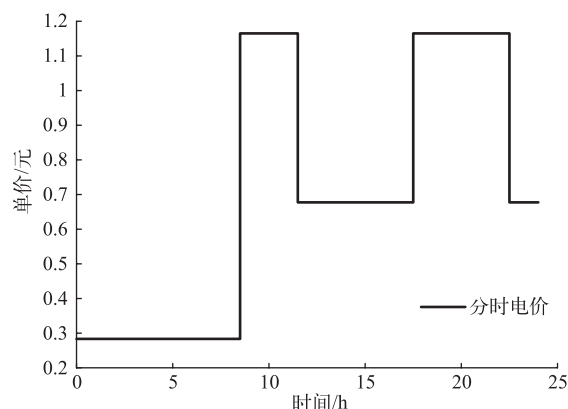


图7 分时电价机制

Fig. 7 Hourly electricity price mechanism

4.2 优化配置结果

基于本文提出的储能优化配置模型对混合储能配置进行迭代寻优，设置迭代次数为100次，得出的种群迭代图如图8所示。当迭代次数达到6次时，目标函数曲线基本收敛；当迭代次数到达100次时，目标函数最优收敛值为-37 326.03。因此储能优化配置后的最优收益为37 326.03元，100天内具体的成本与收益构成见表1。

表1 储能优化后的成本与收益明细

Tab. 1 Detailed cost and benefit after energy storage optimization

成本和收益项目	金额 / 元
折算后的建设成本	907.68
运行维护成本	5 051.50
折算后的回收成本	207.16
消峰填谷收益	43 492.37
最优收益	37 326.03

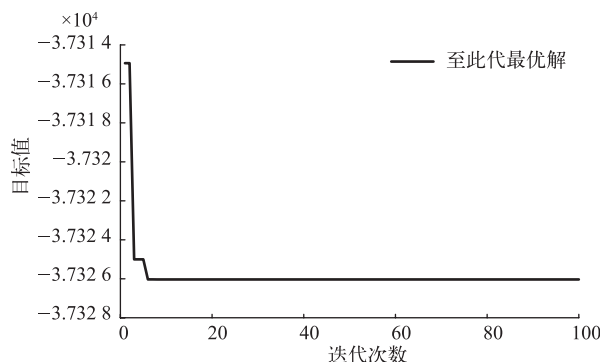


图8 目标函数迭代收敛曲线

Fig. 8 Iterative convergence curve of objective function

最终得到的储能优化配置结果见表2。蓄电池储能的最优功率为16.37 kW；最优容量为35.81 kW·h；重力储能最优功率为19.9 kW；最优容量为68.56 kW·h。

表2 储能优化配置结果

Tab. 2 Storage optimization configuration results

储能	蓄电池储能	重力储能
最优配置功率/kW	16.37	19.90
最优配置容量/(kW·h)	35.81	68.56

储能100天时段内每个采样时刻蓄电池储能、重力储能分配的功率如图9、图10所示。

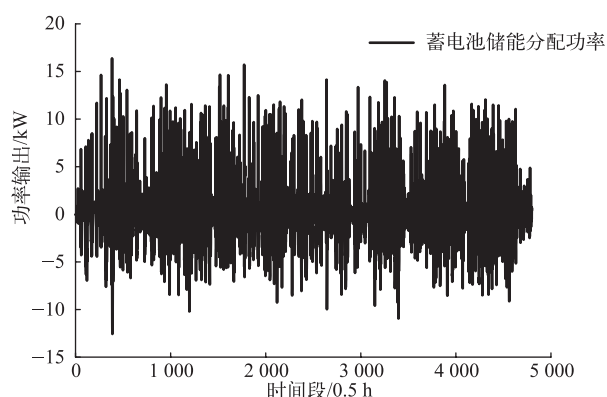


图9 蓄电池储能功率分配

Fig. 9 Battery storage power allocation

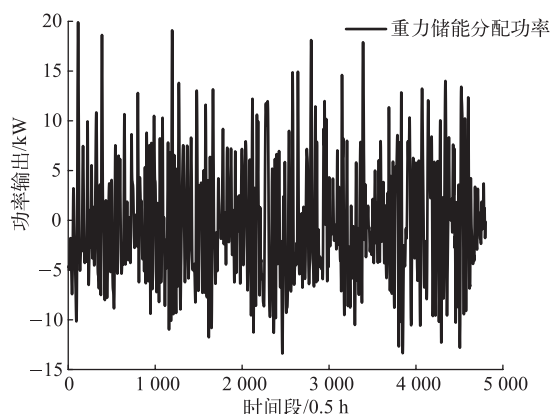


图10 重力储能功率分配

Fig. 10 Gravity storage power allocation

4.3 混合储能系统经济性分析

本节在第2章所提出的收益模型与本章第1节所提出的分时电价机制的基础上，利用用户原始负荷数据进行储能消峰填谷前后的对比分析。

4.3.1 储能系统优化运行曲线分析

此处提取了变压器低压侧某一天的负荷数据。加入储能前后用户侧负荷功率对比与储能充放电曲线如图11、图12所示。

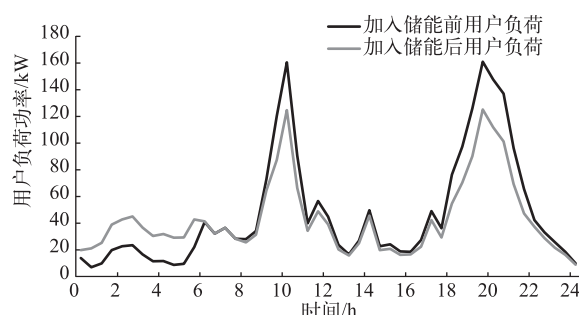


图11 加入储能前后用户侧负荷功率对比图

Fig. 11 User side load power comparison diagram before and after energy storage

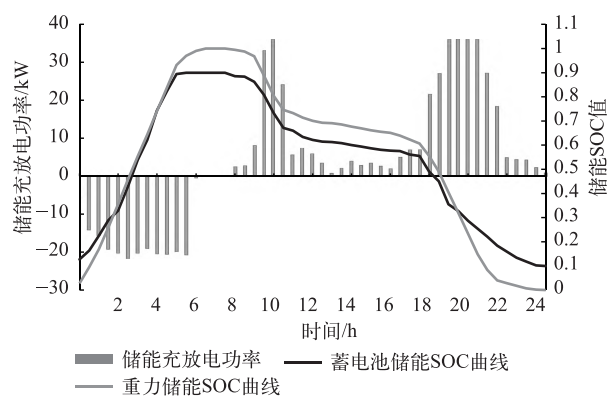


图12 储能投入当日SOC运行曲线

Fig. 12 SOC operation curve on the day of energy storage input

以储能0:00~24:00功率曲线为例分析可得如下结论。

1) 0:00~8:00属于一天中唯一的谷电价时段，储能进行充电，充满为止，因此功率曲线相对没有储能时高一些。

2) 8:00~11:00为高电价时段，此时的负荷功率较高，达到了一天中的第一个峰值，储能放电来消减负荷峰值，负荷峰值由10:00分的160.3 kW下降至124.49 kW，降低了22.34%。

3) 11:00~17:00为平电价时段，此时的负荷功率介于高峰与低谷之间，储能进行一定量的放电满足负荷需求。

4) 17:00~22:00为当日另一段高电价时

段, 负荷功率达到了一天中的第二个峰值, 储能放电来消减负荷峰值, 负荷峰值由19:30的160.8 kW下降至124.9 kW, 降低了22.33%。

5) 22:00~24:00为当日第二个平电价时段, 储能继续进行放电, 满足一定的负荷需求, 同时使得储存的全部能量放出, 从而使得储能的利用效率最大化。

4.3.2 全寿命周期经济性分析

以此算例的优化配置结果为例, 对混合储能的全寿命周期经济性进行分析和验证。采用1.7节中的储能循环寿命计算方法, 确定蓄电池的寿命约为8年, 重力储能的寿命约为20年, 因此混合储能系统全寿命周期为8年。

蓄电池储能与重力储能的相关成本见表3^[19-21]。蓄电池储能的总建设成本费用为75 098.50元; 运维成本为2 478.25元/年; 回收成本为901.18元; 重力储能的总建设成本费用为61 082.40元; 运维成本为2 015.72元/年; 由于重力储能装置具有回收成本低、回收设备可重复利用价值高的特点, 故回收可得收益1 842.38元。

表3 储能相关成本
Tab. 3 Storage-related costs

	蓄电池储能	重力储能
功率成本/(元/kW)	650.00	520.00
容量成本/[元/(kW·h)]	1 800.00	740.00
运维成本/(元/年)	2 478.25	2 015.72
回收成本/元	901.18	-1 842.38

以4.3.1节中100日内储能总收益值估算混合储能系统年收益为136 240.00元。计算可得全寿命周期8年内的总收益为91.87万元。每年的成本回收情况见表4。

总收益第1年为负, 从第2年起由负转正, 随后不断升高。考虑到重力储能装置循环寿命远大于蓄电池储能, 因此在第二个投资周期重力储能装置可以继续使用, 将进一步降低系统的长期投资成本。

4.3.3 混合储能经济性优势的验证

为了验证混合储能相对于单一蓄电池储能的经济性优势, 将本文提出的混合储能系统与单一

蓄电池储能作对比。首先应用第1章中的相关公式计算蓄电池的额定容量、功率等相关参数确定相关约束, 下一步同样采用量子粒子群算法对单一蓄电池储能系统配置进行优化。优化后得出蓄电池储能最优配置功率为40.67 kW, 最优配置容量为117.38 kW·h。可以看出使用蓄电池储能会使配置功率和容量有所上升, 这主要是蓄电池储能相对重力储能效率较低导致的。应用4.3.2节中提到的相同方法计算储能相关成本可得单一蓄电池储能全寿命周期内的总投资成本可达25.75万元。在本算例中, 相同条件下应用蓄电池储能加重力储能的全寿命周期投资成本只有应用蓄电池储能成本的66.49%, 验证了本文提出的混合储能系统相对单一的蓄电池储能系统除了环保、回收利用无污染等优势外, 具有更大的经济性优势。

表4 混合储能系统全寿命周期总收益

Tab. 4 Total benefit of life cycle of hybrid storage system

(单位: 万元)

项目	第1年	第2年	第3年	第4年
累计收益	13.62	27.25	40.87	54.50
总投资成本	13.97	14.42	14.87	15.32
总收益	-0.35	12.83	26.00	39.18
项目	第5年	第6年	第7年	第8年
累计收益	68.12	81.74	95.37	108.99
总投资成本	15.77	16.22	16.67	17.12
总收益	52.35	65.52	78.70	91.87

5 结束语

本文针对用户侧应用储能进行削峰填谷, 降低用电成本的需求, 提出了一种基于蓄电池与重力储能相结合的混合储能模型。提出利用量子粒子群优化算法以综合成本最小为目标函数对储能的功率、容量的优化方案。利用用户侧智能电表实测数据对该模型和优化方案进行了验证。结果表明该储能模型可以满足用户侧储能的需求, 优化方案合理可行。最后, 通过计算储能全寿命周期成本和收益验证了混合储能相对单一储能系统的经济性优势。

本文只考虑了单一收益模式下的储能优化,

后续研究中可以加入需量管理、应急供电等多种收益模型,也可针对大工业用户的两部制电价进行专门优化,使得本文研究成果应用范围更广。

参考文献

- [1] 陈景文,周婧,张文倩.基于小波包-模糊算法的混合储能功率分配策略[J].智慧电力,2023,51(1):61-68.
- [2] WU Qiaofeng, HE Yingjing, JIANG Fengqi, et al. Optimization of energy storage assisted peak regulation parameters based on PSS/E[J]. Energy Reports, 2023(9): 504-512.
- [3] 李建林,方知进,李雅欣,等.用于应急的移动储能系统集群协同控制综述[J].电力建设,2022,43(3):75-82.
- [4] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(19):194-207.
- [5] 王粟,肖立业,唐文冰,等.新型重力储能研究综述[J].储能科学与技术,2022,11(5):1575-1582.
- [6] TONG Wenxuan, LU Zhengang, CHEN Weijiang, et al. Solid gravity energy storage: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, (53): 105226.
- [7] 马速良,武亦文,李建林,等.提升电网可靠性的储能系统最优经济性规划方法[J/OL].太阳能学报:1-11[2023-04-10].
- [8] 曹敏健.多运行场景下储能优化配置方法及实现策略[D].南京:东南大学,2019.
- [9] 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):121-128.
- [10] 陈睿彬,陆玲霞,包哲静,等.电池储能系统参与用户侧削峰填谷的鲁棒优化调度策略[J].电力建设,2022,43(10):66-76.
- [11] 尚博阳.用户侧储能优化配置与运行方法研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [12] CHEN Zheng, LI Zhenyu, CHEN Guozhu. Optimal configuration and operation for user-side energy storage considering lithium-ion battery degradation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 145: 108621.
- [13] 王凤学,欧阳森,辛曦.计及保供电交易模式和容量市场的用户侧储能优化配置[J].高电压技术,2023,49(7):2785-2795.
- [14] LIU Keyan, JIA Dongli, SUN Yazhou, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage on user side and benefit analysis of multiple entities[J]. Energy Reports, 2022, 8(2): 1-13.
- [15] 高广帅,李新国,曾海燕,等.基于分段削峰的用户侧储能容量优化配置启发式方法[J].电工电能新技术,2023,42(1):70-78.
- [16] 许欣慧,舒征宇,李世春.基于退役电池在多储能场景下梯级利用的经济运行研究[J].智慧电力,2020,48(12):58-64.
- [17] 郭小强,郑见杰,张晓明.基于电化学模型的锂离子电池寿命预测分析[J].电源技术,2023,47(5):650-652.
- [18] 陶重阳,杨新宇,于翔深,等.量子粒子群优化算法的控制参数分析[J].计算机应用,2014,34(S2):169-171,214.
- [19] 凌光芬.各类储能技术度电成本分析[J].中国工业和信息化,2022(12):29-34.
- [20] 徐若晨,张江涛,刘明义,等.电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析[J].电工电能新技术,2021,40(12):10-18.
- [21] WU Xiong, LI Nailiang, WANG Xiuli, et al. Day-ahead scheduling of a gravity energy storage system considering the uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 4.

作者简介

王建元 (1971—),男,博士,教授,研究方向为智能配电网运行与控制;电能质量控制技术等。

烁伦 (1997—),男,硕士,通信作者,研究方向为用户侧混合储能配置优化。

(收稿日期:2023-09-25)