

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.009

# 基于改进鲸鱼优化算法的共享储能优化配置研究

Optimal configuration for shared energy storage based on improved whale optimization algorithm

栗庆根, 孙娜, 董海鹰  
LI Qinggen, SUN Na, DONG Haiying

(兰州交通大学 新能源与动力工程学院, 兰州 730070)  
(School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**摘要:**针对新能源消纳场景中储能资源闲置和商业模式缺乏的现象,在保证储能功率容量和消纳目标相匹配的基础上,提出了一种基于改进鲸鱼优化算法(WOA)的共享储能优化配置方法。该方法基于发电侧共享储能运行模式,考虑储能电站运行状态、并网功率需求约束下储能在新能源消纳场景的投资运维成本和效益。建立以共享储能系统收益最大为目标的优化配置模型,结合新能源出力及并网功率需求,使用改进WOA对模型进行求解。通过算例对比分析表明:配置共享储能后提升了新能源消纳率,提高了共享储能的投资回报率,与独立储能相比较,储能利用率、消纳调节能力和经济性都得到了大幅提高,能有效弥补因新能源出力不足导致的并网功率缺额,有利于共享储能大规模投资建设。

**关键词:**新能源消纳;共享储能;优化配置;发电侧;改进鲸鱼优化算法;功率缺额

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)09-0065-12

**Abstract:** Since energy storage resources always be left unused and lack proper business modes in the renewable energy consumption, an optimal allocation method of shared energy storage based on improved whale optimization algorithm (WOA) is proposed to match the power capacity of energy storage systems to new energy consumption target. Taking sharing mode for energy storage on power generation side, this method considers the investment, operation and maintenance costs and benefits of the energy storage system assisting renewable energy consumption, under the constraints of its operation and grid-connected power. Combined the renewable energy output with grid-connected power, an optimal configuration model aiming at maximizing the revenue of the shared energy storage system is established, and solved by improved WOA. The contrastive analysis on examples shows that energy storage sharing can improve the consumption rate of new energy and the return on investment of energy storage systems. Compared with independent energy storage, energy storage sharing mode improves the utilization rate and economy of energy storage devices, and adjustment ability on new energy consumption, which can effectively make up for the grid-connected power shortage caused by new energy generation. Large-scale investment in shared energy storage systems is promising.

**Keywords:** renewable energy consumption; energy storage sharing; optimal configuration; power generation side; improved whale optimization algorithm; power shortage

## 0 引言

随着“双碳”目标的不断深入推进,以风电和光伏为代表的新能源在电力系统中的比例不断提高,新能源消纳能力不足、弃风弃光问题日益凸出<sup>[1]</sup>。储能可以辅助缓解新能源面临的问题,但投资回报

周期长,资源严重闲置,且初始投资成本巨大限制了其大规模应用。在面向新能源消纳场景的需求,无法实现发用电在时空上的解耦,且难以提供灵活的调节资源<sup>[2]</sup>。鉴于此,研究面向新能源消纳场景的储能技术及其商业模式是突破新型电力系统发展瓶颈、助力电力行业实现“双碳”目标的重要支撑。共享储能作为新型商业模式,将共享经济与储能相结合,通过将储能所有权与使用权相分离实现共享,为新能源消纳提供灵活的调节资源,实现发

**基金项目:**嘉峪关市科技计划项目(22-35)  
Jiayuguan City Science and Technology Plan Project(22-35)

用电在时空上的解耦<sup>[3]</sup>。

根据应用场景的不同,可分为发电侧、电网侧和用户侧,各场景中储能需满足不同的调节需求。在用户侧,储能可以根据分时电价降低用户的用电成本,通过改善用户负荷分布以满足用户的用能需求。在电网侧,通过储能实现电网的调节需求,以保证电力系统的稳定运行。文献[4]提出利用储能来跟踪日前调度计划以及参与电网调频,为电网提供频率支撑。在发电侧,储能可以平抑功率波动,提升新能源的友好并网能力。文献[5]基于不同的风光互补方式,以抑制新能源电站并网后的波动率为目标进行储能的配置。文献[6]根据各新能源电站发电过剩功率和缺额功率构建共享网络,提出一种发电侧新能源电站自配储能下的共享储能合作模式。在新能源消纳场景中,发电侧引入共享储能不仅可以提高新能源的消纳能力,同时有利于提高储能的调节能力,对高比例新能源电力系统的稳定运行具有积极作用。

针对储能优化配置,文献[7-8]通过建立云储能运营商,将有限的分布式储能资源进行整合,以实现储能资源的共享。文献[9]提出面向新能源消纳场景的集中式共享储能运营模式,并相应设计其运营状况的评价指标体系。文献[10]基于能源细胞网络提出多主体联合投建共享储能的容量配置与运行优化方案。文献[11]采用二层规划模型对用户侧储能的容量配置及运行策略进行优化,上层以用户侧储能全寿命周期内经济效益最大为目标优化储能容量及功率,下层以储能日运行经济最优为目标优化储能运行策略。文献[12-14]考虑用户需求管理,采用两阶段优化的方法对储能进行优化调度。文献[15-17]针对分布式储能从经济性角度出发以储能初始投资和运维成本最小为目标构建了储能优化配置模型,并通过智能算法对储能定容问题进行了优化计算。文献[18]针对储能电站投运成本最低与微能源网运行经济性最优的多目标,建立了双层规划模型使用卡罗需-库恩-塔克法(Karush-Kuhn-Tucker Method, KKT)对模型转化求解。文献[19]提出多微电网共享储能的多目标优化配置及其成本的改进 Shapley 值法公平分摊方法,利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)和模糊隶属度函数获得最优解。文献[20]提出一种多个区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)互联下的共享储能系统容量优化配置模型,利用遗传算法对共享储能的容量、充放电功率进行优化。文献[21]考虑各用户在共享储能全寿命周期中的总净收益及对配电网潮流的影响,

基于广义纳什议价理论建立了共享储能合作博弈模型。

上述文献主要基于微网场景,在面向新能源消纳场景中研究有限,对考虑新能源消纳场景下共享储能优化配置中包含多新能源场站、新能源消纳率与经济性的研究较少。同时,储能在新能源消纳方面发挥着重要的作用,但共享储能随着参与共享的新能源场站数量及装机容量的增加,分布式共享储能的优化配置及运行难以实现。目前,针对共享储能优化配置方面,新能源消纳率、储能投资建设成本及投资回报年限等影响因素备受关注,随着共享储能服务对象的增多,非线性变量也随之增加,对优化配置算法的求解精度、收敛速度提出了更高的要求。

本文根据新能源并网需求和出力特征,建立了以共享储能收益最大为目标的优化配置模型,在共享储能运行状态、并网需求和新能源出力的约束下,通过鲸鱼优化算法(WOA)求解优化配置结果,解决了优化配置模型中多目标与非线性约束问题,算例分析了面向新能源消纳场景对共享储能优化配置的影响,验证了本文所提共享储能优化配置模型的可行性。

## 1 共享储能运行模式

共享储能是将储能以共享的方式进行利用,实现了储能资源所有权与使用权的分离,能够使各参与方在该模式下实现灵活高效的互动。目前,发电侧共享储能主要分为分散式和集中式2种基本结构,其中分散式共享储能是在满足自身需求的前提下将盈余的储能资源通过共享的方式为其他主体或电网提供储能服务,而集中式共享储能可以是多新能源场站共同出资建设,或者由第三方主体出于盈利目的投资建设。在面对日益复杂的新能源电力系统,新能源场站的数量及储能需求不断增加,原有的分散式储能难以实现灵活的资源调节需求,集中式储能可以大幅降低分散式共享储能的复杂程度,优化储能资源配置有利于提高储能利用率和投资意愿,更利于其商业运营,因此本文以集中式共享储能为研究对象,其基本结构示意图如图1所示。

发电侧集中式共享储能通过集中管控和分配储能资源,可以有效应对多种调节需求,利用多种调节需求的时空互补特性提高集中式共享储能的资源利用率,在降低储能资源投资成本的同时,提高运行的经济性,以缩短储能投资回报年限。集中式共享储能服务于新能源场站,在新能源场站出力

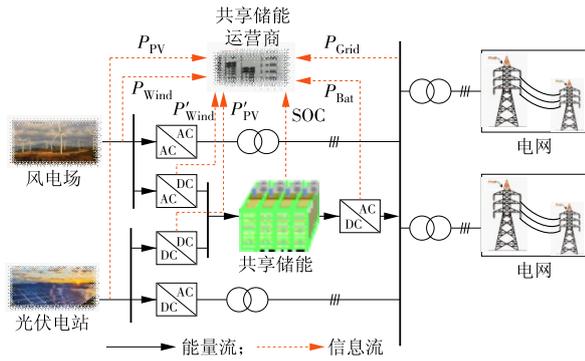


图1 集中式共享储能基本结构示意图

Fig. 1 Basic structure of a centralized shared energy storage system

大于并网需求时,为避免大量弃风弃光,利用储能将剩余电能储存;在新能源出力无法满足并网需求时,通过储能弥补出力不足导致的功率缺额,以保证新能源出力与并网需求动态平衡,提高新能源消纳能力。

## 2 共享储能优化配置模型

储能的共享模式打破了“自建自储自用”的模式下各储能主体的储能设备与储能需求之间相互孤立的状态,根据多种调节需求的时空互补特性减少储能资源闲置与浪费,降低储能沉没成本。面新能源消纳场景下的共享储能优化配置基于储能投资成本最小,通过提高储能资源利用率,实现储能经济效益最大的前提下保证新能源消纳,以减少弃风弃光量。

### 2.1 目标函数

储能投资建设成本是限制其大规模发展的主要因素,降低储能投资成本,并利用有限的储能资源获取最大的经济效益是驱动共享储能发展的动力。面向新能源消纳场景下共享储能服务于新能源场站,在此基础上以共享储能典型日运行收益最大为目标函数,实现共享储能电站储能容量、最大充放电功率和各时段充放电功率的优化配置。本文考虑储能投资成本、运维成本,提供储能服务获得的服务收益,为支撑新能源场站并网需求的收益,以及在考虑经济性前提下导致的储能配置不足产生的新能源场站弃电成本,建立了共享储能优化配置模型,目标函数为

$$\max F = I_1 + I_2 - C_1 - C_2 - C_3, \quad (1)$$

式中: $I_1$ 为储能电站为新能源场站提供储能服务获得的服务收益; $I_2$ 为储能电站为支撑新能源并网需求获得的收益; $C_1$ 为集中式共享储能投资成本; $C_2$ 为共享储能运维成本; $C_3$ 为储能经济最优配置时弃风弃光惩罚成本。

共享储能电站的服务费是基于实际充电电量进行计算

$$I_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda(t) \cdot P_{c,i}(t) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

式中: $N$ 为新能源场站总数; $T$ 为典型日共享储能总运行时段数; $\lambda(t)$ 为共享储能第 $t$ 时段向新能源场站提供储能服务的单位功率服务费; $P_{c,i}(t)$ 为第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段的充电功率; $\Delta t$ 为单次储能持续时间。

新能源出力存在波动性,当新能源出力无法满足并网功率需求时,利用储能放电弥补并网功率缺额。出于经济性考虑,支撑新能源场站并网需求的放电过程中,共享储能收益为

$$I_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \mu(t) \cdot P_{d,i}(t) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

式中: $\mu(t)$ 为储能第 $t$ 时段放电单位功率价格; $P_{d,i}(t)$ 为第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段的放电功率。

储能投资是共享储能投资建设过程中重要的支出,其成本包含功率投资成本和容量投资成本,储能电站投资成本模型为

$$C_{in} = c_p P_{ESS} + c_E E_{ESS}, \quad (4)$$

式中: $P_{ESS}$ ,  $E_{ESS}$ 分别为储能的功率和容量; $c_p$ ,  $c_E$ 分别为储能的功率和容量的单位投资成本。

鉴于储能建设前期投资成本巨大,且受时间价值的影响,因此需要对储能投资成本进行修正和折算,其修正折算系数为

$$\varphi(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot \frac{1}{Y_d}, \quad (5)$$

式中: $r$ 为基准折现率; $n$ 为储能电站运行寿命; $Y_d$ 为一年中的天数。

根据式(5)投资成本修正折算系数,得到储能折算至每天的投资成本为

$$C_1 = \varphi(r, n) C_{in}. \quad (6)$$

储能运行维护过程中需要考虑其功率和充放电总量,因此储能运行维护成本为

$$C_{OM} = k_0 P_{ESS} + k_M Q_{ESS}, \quad (7)$$

式中: $k_0$ 为储能电站单位功率日运行维护成本系数; $k_M$ 为储能单位容量日运行维护成本系数; $Q_{ESS}$ 为储能日充放电总量。

由于储能系统的单位功率和单位容量日运行维护成本系数不易确定,所以运行维护费用一般按初始投资的一定比例近似估算<sup>[22]</sup>,即

$$C_{OM} = \zeta C_{in}, \quad (8)$$

式中: $\zeta$ 为储能运行维护系数。

共享储能优化配置时,需要考虑新能源消纳情况,在新能源消纳与储能经济性情况下进行优化配

置,因此引入弃电惩罚成本,即

$$C_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \theta(t) P_{r,i}(t) \Delta t, \quad (9)$$

式中: $\theta(t)$ 为第 $t$ 时段的单位功率弃电惩罚成本; $P_{r,i}(t)$ 为第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段的弃电功率。

## 2.2 约束条件

面向新能源消纳场景的共享储能优化配置时,忽略网路损耗和设备损耗,考虑参与共享储能的新能源场站出力 and 并网需求、共享储能荷电状态、储能充放电功率,确定符合共享储能优化配置模型的约束条件。

新能源场站与共享储能作为联合系统,利用储能平抑新能源出力的随机性、波动性,通过储能充电消纳新能源发电高峰电量,储能放电弥补并网功率缺额,其满足的约束条件为

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_{\text{ESS},d}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{ESS},c}(t) + \sum_{i=1}^N P_r(t), \quad (10)$$

式中: $P_i(t)$ 为第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段的发电功率; $P_{\text{ESS},c}(t)$ 、 $P_{\text{ESS},d}(t)$ 分别为共享储能电站第 $t$ 时段的充电和放电功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为第 $t$ 时段并网的功率总需求; $P_r(t)$ 为第 $t$ 时段的弃电总功率。

其中,共享储能充放电功率存在以下关系

$$P_{\text{ESS},c}(t) = \sum_{i=1}^N P_{c,i}(t), \quad (11)$$

$$P_{\text{ESS},d}(t) = \sum_{i=1}^N P_{d,i}(t). \quad (12)$$

集中式共享储能在充放电过程中,需要考虑充放电状态和功率,为了符合实际运行情况,约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ESS},c}(t) \leq P_{\text{ESS}} \sigma_c(t) \\ 0 \leq P_{\text{ESS},d}(t) \leq P_{\text{ESS}} \sigma_d(t) \\ \sigma_c(t) + \sigma_d(t) \leq 1 \\ \sigma_c(t) \in \{0, 1\} \\ \sigma_d(t) \in \{0, 1\} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $\sigma_c(t)$ 和 $\sigma_d(t)$ 分别为共享储能电站的第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段充电状态和放电状态。

根据共享储能电站的约束条件,可以得到各新能源场站存在的约束关系为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{c,i}(t) \leq P_{\text{ESS}} \sigma_{c,i}(t) \\ 0 \leq P_{d,i}(t) \leq P_{\text{ESS}} \sigma_{d,i}(t) \\ \sigma_{c,i}(t) + \sigma_{d,i}(t) \leq 1 \\ \sigma_{c,i}(t) \in \{0, 1\} \\ \sigma_{d,i}(t) \in \{0, 1\} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $\sigma_{c,i}(t)$ 和 $\sigma_{d,i}(t)$ 分别为第 $i$ 个新能源场站第 $t$ 时段的充电状态和放电状态; $P_{\text{ESS}}$ 为新能源场站最大充电和放电需求功率。

共享储能电站运行过程中,充放电状态会导致储能电量不断变化,同时储能电量会影响共享储能优化配置,因此通过储能荷电状态及充放电深度保证储能连续运行和优化配置的经济性,其约束条件为

$$S_{\text{OC},\min} \leq S_{\text{OC}}(t) \leq S_{\text{OC},\max}, \quad (15)$$

$$S_{\text{OC}}(t) = S_{\text{OC}}(t-1) + \left( \frac{P_{\text{ESS},c}(t) \eta_{\text{ESS},c}}{E_{\text{ESS}}} - \frac{P_{\text{ESS},d}(t)}{\eta_{\text{ESS},d} E_{\text{ESS}}} \right) \Delta t, \quad (16)$$

式中: $S_{\text{OC},\min}$ 和 $S_{\text{OC},\max}$ 分别为共享储能最小荷电状态和最大荷电状态; $S_{\text{OC}}(t)$ 为集中式共享储能电站第 $t$ 时段的荷电状态; $\eta_{\text{ESS},c}$ 和 $\eta_{\text{ESS},d}$ 分别为共享储能充电效率和放电效率。式(15)反映了共享储能充放电深度与实际荷电状态之间的关系,式(16)则反映了共享储能第 $t$ 时段的荷电状态与前一时刻和当前时刻充放电之间的关系。

## 3 共享储能优化配置方法

在共享储能优化配置模型中,新能源场站发电功率和并网功率需求是储能电站充放电功率和充放电点状态的重要影响因素,而储能电站最大充放电功率和最大容量受储能电站实际充放电功率和充放电状态影响。在共享储能优化配置过程中,存在大量的非线性约束条件,且优化配置模型的求解精度和求解速度会影响储能优化配置。因此在面向新能源消纳的共享储能优化配置决策过程中采用改进WOA<sup>[23]</sup>获取最优解。

### 3.1 WOA

WOA通过模拟鲸鱼独特的泡泡网觅食行为<sup>[24]</sup>,在搜寻猎物和获取猎物信息的过程中,不断地包围和螺旋式靠近猎物,最终捕获猎物,即获得问题的最优解。

由于WOA分为包围捕食、螺旋更新、搜寻猎物3个阶段,但存在求解精度低、收敛速度慢和易陷入局部最优的缺点,通过准反向学习<sup>[25]</sup>对种群初始化、利用非线性收敛因子<sup>[26]</sup>更新包围捕食阶段、自适应权重策略<sup>[27]</sup>与随机差分法变异策略<sup>[28-32]</sup>预防陷入局部最优对WOA进行改进。

在包围捕食阶段,鲸鱼种群通过获取猎物位置信息,使种群中距离最近的鲸鱼个体(当前的最优解)靠近猎物,从而使种群间接不断地向猎物移动。在实际求解过程中,问题的全局最优解对应猎物的位置。在该阶段,通过模拟鲸鱼捕食行为的数学模型为

$$\begin{cases} X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \\ D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} A = 2a \cdot r_1 - a \\ C = 2 \cdot r_2 \\ a(t) = 2 - \frac{2t}{\max\_iter} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: $t$ 为迭代次数; $X(t)$ 为鲸鱼个体的位置向量; $X_p(t)$ 为猎物位置向量; $A$ 和 $C$ 分别为系数向量,具体计算过程如式(18)所示; $r_1$ 和 $r_2$ 分别为 $[0, 1]$ 范围内的随机向量; $a$ 为与迭代次数相关的系数向量,由 $a(t)$ 构成; $\max\_iter$ 为最大迭代次数。

在螺旋更新阶段,以猎物为中心,鲸鱼通过不断地螺旋上升向猎物逼近,最终实现捕获猎物的目的。

通过计算种群中鲸鱼个体与猎物位置之间的距离,以螺旋的方式缩小距离,更新个体的位置,其位置更新公式为

$$X(t+1) = D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_p(t), \quad (19)$$

式中: $b$ 为定义螺线圈的常数; $l$ 为 $[-1, 1]$ 范围内的随机数。

为保证收缩包围和螺旋更新同步,通过概率 $p$ 判别鲸鱼个体的位置更新方式,假设2种方式发生的概率均为50%,即

$$X(t+1) = \begin{cases} X_p(t) - A \cdot D & p < 0.5 \\ D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_p(t) & p \geq 0.5 \end{cases}, \quad (20)$$

式中: $p$ 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

在搜寻猎物阶段,鲸鱼在探索找寻猎物的线索信息时以随机的方式实现,因此从种群中随机选择需要的个体进行位置更新,其表达式为

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot D, \quad (21)$$

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)|, \quad (22)$$

式中: $X_{\text{rand}}(t)$ 为当前种群中随机选取的鲸鱼个体位置向量。

### 3.2 改进 WOA

为保证种群获得更好的初始化种群个体,在WOA的基础上引入准反向学习,将随机解与准反向解相结合,选取其中最优化解,以实现种群的多样性和快速收敛性。其数学模型为

$$\text{fit}(X) > \text{fit}(\check{X})? \quad X, \check{X}, \quad (23)$$

式中: $\text{fit}$ 为适应度函数; $X$ 和 $\check{X}$ 分别为随机和准反向学习产生的个体向量。

鲸鱼种群中,第 $i$ 鲸鱼在 $d$ 维空间中的位置为 $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d)$ ,准反向学习产生的个体位置由准方向解构成,其求解方法为

$$\hat{x}_i^j = \begin{cases} \text{rand}(\text{avg}_i^j, x_i^j) & x_i^j \leq \text{avg}_i^j \\ \text{rand}(x_i^j, \text{avg}_i^j) & x_i^j > \text{avg}_i^j \end{cases}, \quad (24)$$

式中: $\text{avg}_i^j = \frac{b_i^j - a_i^j}{2}$ ;  $x_i^j$ 为第 $i$ 只鲸鱼在第 $j$ 维空间中的位置; $a_i^j$ 和 $b_i^j$ 分别为 $x_i^j$ 的下边界和上边界。

收敛因子 $a(t)$ 呈线性变化,在更新迭代过程中无法适应非线性变化过程,引入非线性收敛因子,以充分挖掘其全局搜索能力和局部开发能力,即

$$a(t) = 2 - 2\sin\left(\mu \frac{t}{\max\_iter} \pi + \varphi\right), \quad (25)$$

式中: $\mu$ 和 $\varphi$ 分别为其相关参数,且选取 $\mu = 0.5$ ,  $\varphi = 0$ 。

为避免鲸鱼算法陷入局部最优和收敛早熟的现象,提出一种自适应权重策略和随机差分策略,以保证种群的多样性和实现全局最优。自适应权重策略如式(26),随机差分策略为

$$X(t+1) = \begin{cases} \omega X_p(t) - A \cdot D & p < 0.5 \\ \omega D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_p(t) & p \geq 0.5 \end{cases}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} X(t+1) = & r_1 \times (X_p(t) - X(t)) + \\ & r_2 \times (X'(t) - X(t)), \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $\omega = 1 - \frac{e^{\frac{t}{\max\_iter}} - 1}{e - 1}$ 为自适应权重与迭代次数之间的关系; $X'(t)$ 为种群随机个体的位置向量。

### 3.3 共享储能优化配置

基于改进WOA的共享储能优化配置流程如图2所示。本文建立的共享储能优化配置模型采用改进WOA求解,具体流程如下。

(1)输入新能源发电功率、并网功率需求及价格等系统数据,初始化改进WOA种群规模、最大迭代次数和螺旋系数等参数。

(2)在解空间用准反向学习初始化种群个体。

(3)当迭代次数小于最大迭代次数时,计算最优个体位置和适应度函数值并记录。

(4)利用非线性因子更新包围阶段模型,提高全局搜索能力和局部开发能力。

(5)采用自适应策略和随机差分法变异策略更新种群最优位置,迭代次数加1。

(6)当满足迭代终止判断条件时,输出个最优个体位置和适应度函数值。

(7)获取共享储能电站优化配置结果、充放电功率和状态。

## 4 算例分析

### 4.1 算例设置

为验证本文优化配置模型的可行性,选取我国西北某地区2个装机容量为100 MW的光伏电站和1个装机容量为180 MW的风电场,为该3个新能源

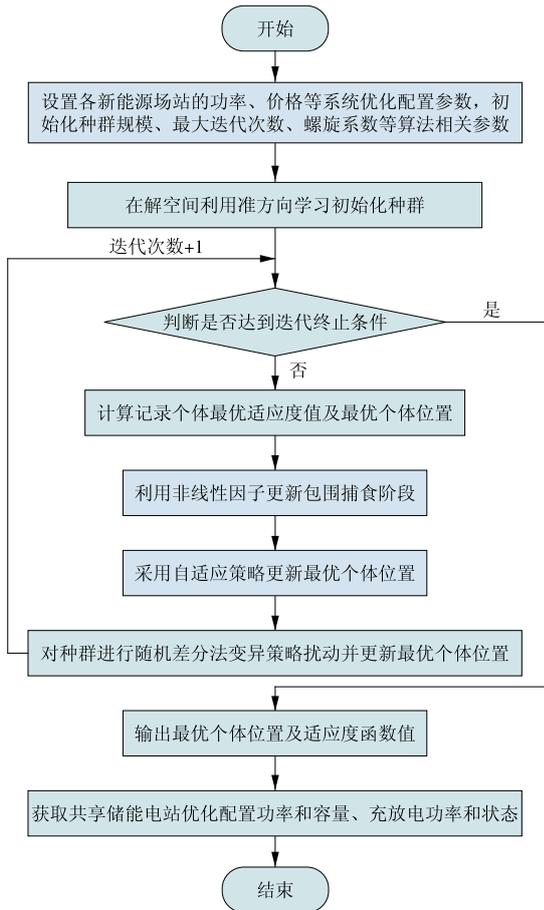


图 2 基于改进 WOA 的共享储能优化配置流程

Fig. 2 Flow chart of the optimal configuration for shared energy storage based on improved WOA

电站配置共享储能。本文基于典型日下新能源出力与并网需求进行分析,集中式共享储能参数见表 1,根据新能源场站全年观测的数据可以得到,典型日风速、太阳辐照度如图 3 所示。结合典型日风速和太阳辐照度,新能源场站总功率和并网功率总需求如图 4 所示。

表 1 集中式共享储能系统参数

参数	值
单位功率投资成本 $c_p$ /(万元·MW <sup>-1</sup> )	40
单位容量投资成本 $c_E$ /(万元·(MW·h) <sup>-1</sup> )	70
基准折现率 $r$ /%	0.5
共享储能电站运行寿命 $n/a$	10
共享储能电站运行维护系数 $\zeta$ /%	6
充放电效率 $\eta_{ESS,c}, \eta_{ESS,d}$	0.95, 0.95

集中式共享储能有利于提高储能资源利用率,降低储能投资成本,为更好地对比不同场景下储能对新能源消纳的影响,设置以下 3 个场景。场景 1:各新能源场站未配置储能;场景 2:各新能源场站配置独立储能;场景 3:新能源场站配置集中式共享储能。

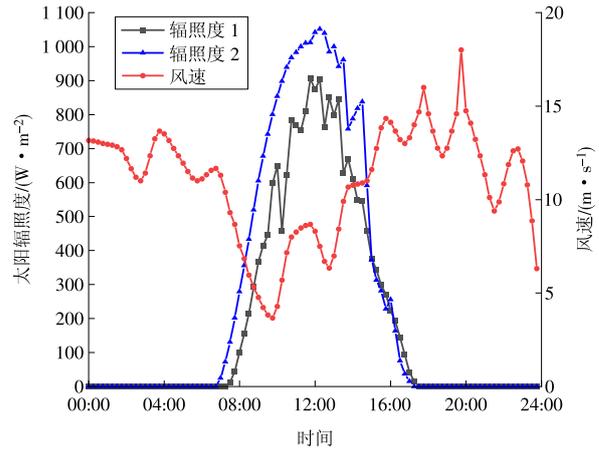


图 3 典型日光伏电站辐照度与电场风速

Fig. 3 Irradiance and wind speed of a wind-PV power plant on a typical day

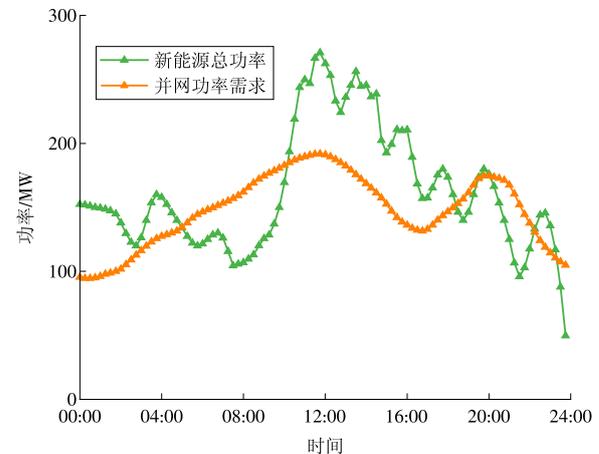


图 4 新能源场站总功率和并网功率需求

Fig. 4 Total power and grid-connected power of the new energy station

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 场景 1 结果分析

由于风力发电和光伏发电具有随机性和波动性,新能源发电会出现发电侧出力无法匹配并网需求和完全消纳的情况。当新能源出力盈余时,出现大量的电能因无法利用被浪费;当新能源出力不足时,会造成功率缺额导致难以满足并网功率需求。各新能源电站实际出力与消纳情况如图 5 所示,新能源总出力、并网需求、并网功率缺额、消纳与弃电情况如图 6 所示。

为直观反映新能源实际消纳情况,新能源消纳率计算式为

$$\rho = 1 - \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{P_{r,i}(t)}{P_i(t)} \quad (28)$$

通过分析图 5 与图 6,利用式(28)计算得到新能源消纳率为 84.08%,剩余的电能因无法存储和利用被大量浪费,导致新能源经济性较低,不利于新能源发展,同时存在功率缺额现象会威胁电网的稳

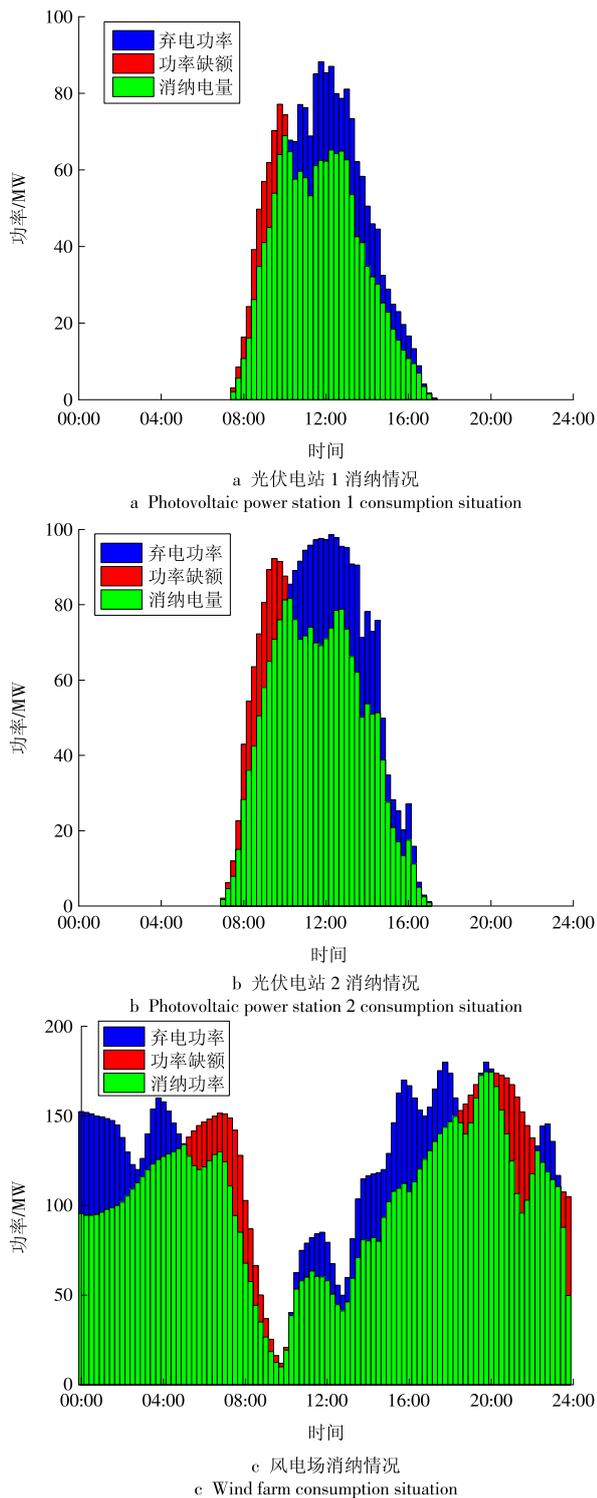


图 5 未配置储能时各新能源场站消纳情况

Fig. 5 New energy consumptions of different power stations without energy storage device

定运行。分析对比新能源各场站实际消纳情况和总消纳情况,风力发电和光伏发电在时间上具有互补性,减少了新能源弃电量。弃电主要集中在 00:00—04:00, 10:00—18:00,该时段风电和光伏发电量大于电网消纳量。在 04:00—10:00, 20:00—22:00 并网功率需求大于新能源场站实际发电功率,导致新能源出力无法满足并网功率需

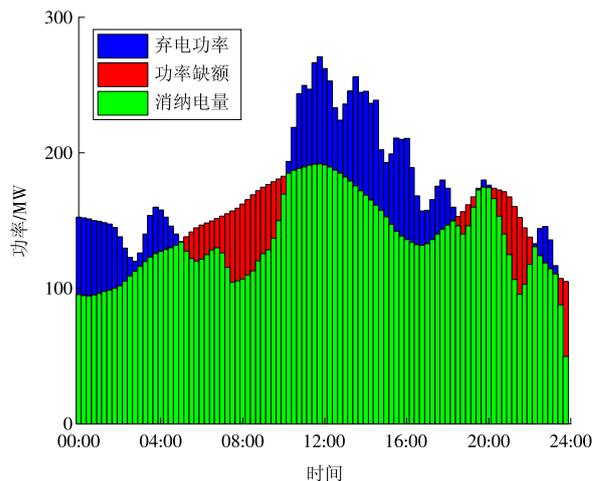


图 6 无储能新能源场站消纳情况

Fig. 6 New energy consumption of the power station without energy storage device

求,出现并网功率缺额。

#### 4.2.2 场景2结果分析

各新能源场站出力具有波动性,且新能源消纳能力不足,可以通过储能平抑功率随机波动和提高新能源消纳能力。根据现有新能源场站储能配置要求,储能功率按新能源场站装机容量的 15% 进行配置,同时为了更好地和场景 3 进行对比分析,该场景下储能时长设为 6 h,即各新能源场站配置独立储能情况见表 2。光伏电站分别配置独立储能为 15 MW/90 MW·h,投资建设成本为 631.79 万元/a,风电场配置独立储能为 27 MW/162 MW·h,投资建设成本为 1 137.22 万元/a,即独立储能总装机容量为 57 MW/342 MW·h,投资建设成本共计 2 400.80 万元/a。新能源场站配置独立储能后各新能源场站消纳情况如图 7 所示,配置独立储能后新能源场站总消纳情况如图 8 所示。

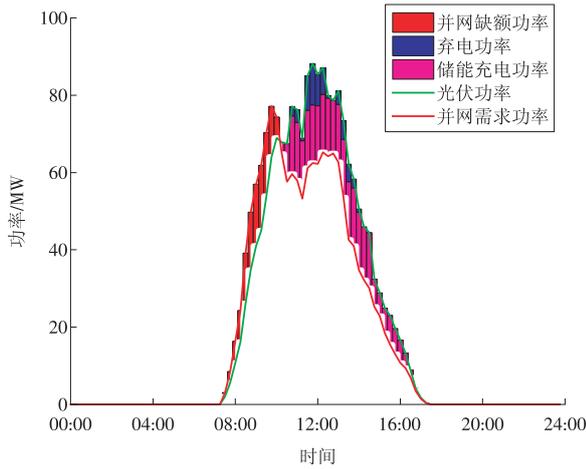
表 2 新能源场站独立储能系统功率及容量参数

Table 2 Powers and capacities of the independent energy storage systems in new energy stations

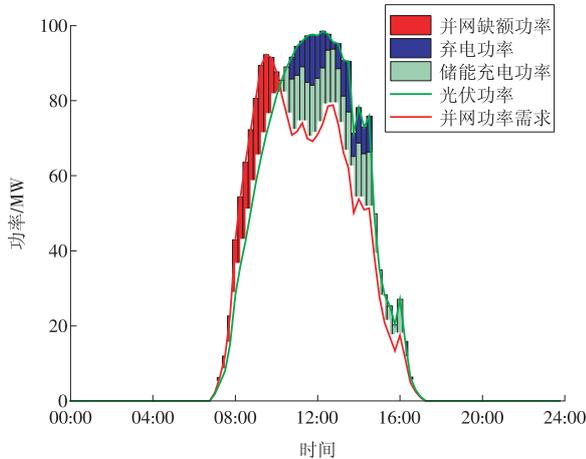
类型	功率/MW	容量/(MW·h)	配置成本/(万元·a <sup>-1</sup> )
光伏电站 1	15	90	631.79
光伏电站 2	15	90	631.79
风电场	27	162	1 137.22
总计	57	342	2 400.80

图 7 和图 8 反映出新能源场站配置独立储能能在发电功率大于并网功率需求时将电能储存,在出现功率缺额时释放电能。

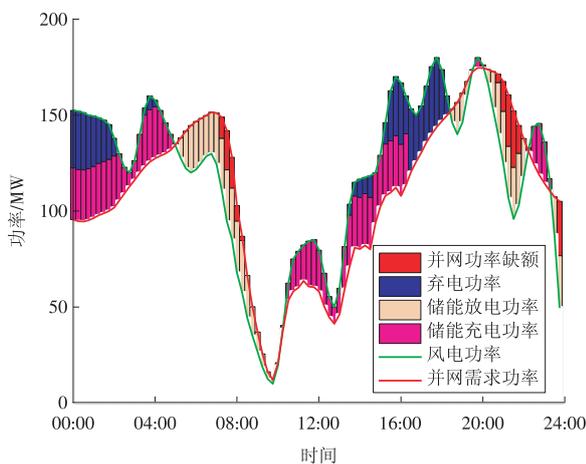
通过分析新能源场站配置独立储能消纳情况,根据式(28)计算得到新能源消纳率为 92.7%。独立储能在提高新能源消纳率和缩小并网功率缺额方面发挥了重要的作用,但独立储能在新能源消纳



a 光伏电站 1 消纳情况  
a Photovoltaic power station 1 consumption situation



b 光伏电站 2 消纳情况  
b Photovoltaic power station 2 consumption situation



c 风电场消纳情况  
c Wind farm consumption situation

图 7 配置独立储能时各新能源场站消纳情况

Fig. 7 New power consumptions of the stations with independent energy storage systems

和储能利用率较低。其中,光伏电站的储能系统只实现了一次充放电过程,大部分时间是处于闲置状态;风电场的储能系统可能会出现多次充放电过程,但由于配置的储能系统功率和容量有限无法完全消纳过剩电能和弥补功率缺额。

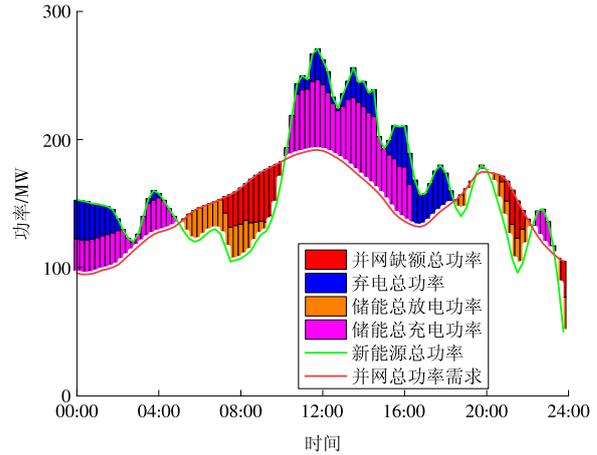


图 8 新能源场站配置独立储能总消纳情况

Fig. 8 Total consumption of new power from the stations with independent energy storage systems

### 4.2.3 场景 3 结果分析

根据新能源发电功率和并网功率需求,对面向新能源场站消纳的共享储能优化配置,结果见表 3。图 9 为新能源消纳率和共享储能配置功率、容量及成本关系曲线。由表 3 和图 9 可知,随着储能容量及储能功率的增加,储能成本增加,新能源消纳率也得到了提高。同时图 9 反映出相同储能功率情况下,储能容量会影响新能源消纳率。在储能优化配置过程中,储能容量对配置成本的影响大于储能功率的影响。从共享储能经济性角度考虑,共享储能前期投资建设成本巨大,新能源消纳率的提高会导致储能配置成本攀升,不利于共享储能的发展。

综上所述,选取合理的储能投资回报率和新能源消纳率是共享储能优化配置的前提,本文以经济利益最大化为目标,因此选取方案 1 为研究对象。共享储能配置功率为 56.37 MW,配置容量为 302.54 MW·h,根据式(28)计算的得到新能源消纳率为 95.52%。通过计算共享储能配置成本为 2 180.35 万元/a,根据市场电价及储能服务价格得到共享储能投资回报率为 20.80%。

在共享储能电站作用下,新能源弃电功率如图 10 所示。从新能源消纳角度考虑,光伏电站和风电场均出现了不同程度的弃电现象,但是弃电时间段基本重合,集中在 10:00—18:00,主要原因是风光总出力大于并网负荷需求及储能最大消纳功率之和,导致部分电能浪费。从并网功率角度考虑,在共享储能的作用下弥补了因新能源出力不足产生的并网功率缺额,保证了并网功率需求与电源侧的动态平衡,有利于提高电网运行稳定性。

新能源消纳能力的提高,得益于共享储能的参与,为了更好地展现共享储能的实际运行状况,从运行角度考虑,各新能源场站典型日参与共享储能

表 3 共享储能系统优化配置结果

Table 3 Optimized configuration results of the shared energy storage system

序号	功率/MW	容量/(MW·h)	储能配比/%	消纳率/%	配置成本/(万元·a <sup>-1</sup> )
1	56.37	302.54	14.83	95.52	2 180.35
2	56.37	324.64	14.83	96.00	2 300.44
3	56.37	370.85	14.83	97.00	2 551.59
4	56.37	417.06	14.83	98.00	2 802.73
5	60.94	462.70	16.04	99.00	3 094.20
6	80.59	508.91	21.21	100.00	3 532.30

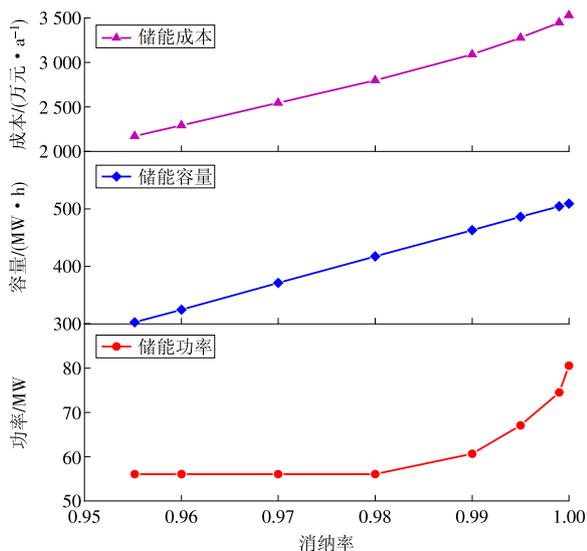


图 9 新能源消纳率与共享储能配置关系

Fig. 9 Relationship between new energy consumption rate and shared energy storage configuration

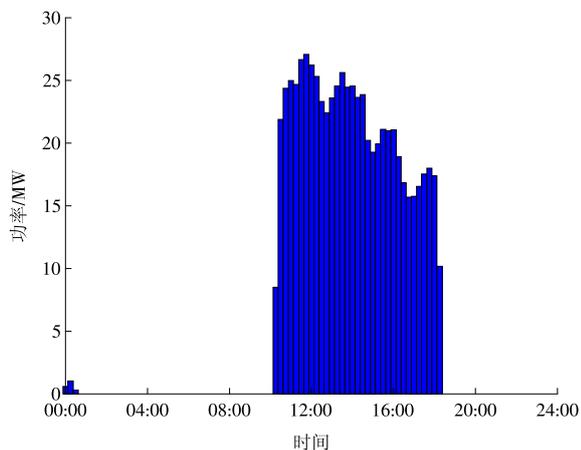


图 10 新能源弃电功率

Fig. 10 New energy curtailment rate

电站充放电的功率、状态及 SOC 变化曲线如图 11 所示。共享储能参与新能源消纳和并网功率支撑的功率变化情况如图 12 所示。共享储能电站 SOC 变化趋势受储能充放电状态影响,而储能充放电状态取决于新能源发电功率和并网功率需求。面向新能源消纳场景的共享储能闲置时间大幅缩减,新能源出力波动频率会影响储能充放电频率。

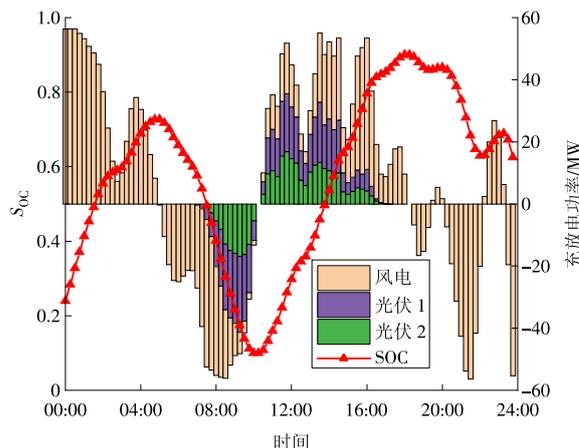


图 11 共享储能充放电功率与 SOC 曲线

Fig. 11 Charge and discharge power and SOC of the shared power storage system

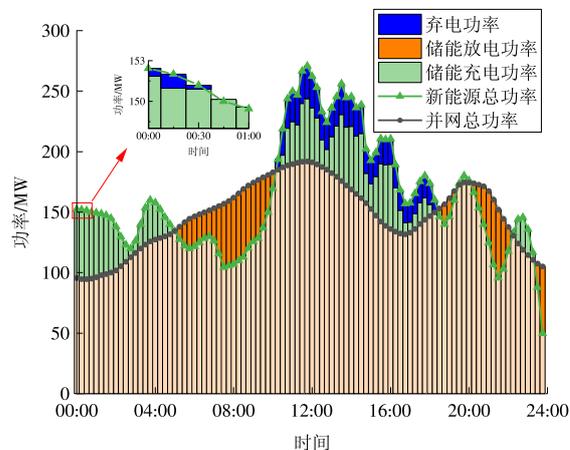


图 12 共享储能消纳新能源与并网支撑情况

Fig. 12 New energy consumption and grid-connected power support made by the shared power storage system

#### 4. 2. 4 算例对比分析

根据新能源消纳的 3 种场景对比分析可得,场景 1 新能源场站群包含风电与光伏发电,在时间上具有互补性,但各场站未配置储能会导致大量的电能无法利用被浪费,在并网功率需求方面会出现严重的功率缺额现象,同时新能源出力存在随机性、周期性,导致新能源场站并网运行存在一定的阻力。

场景 2 新能源场站通过配置独立储能平抑出力

波动,当出力大于并网功率需求时,储能充当负载消耗过剩电能,当出力与并网功率之间存在功率缺额时,储能系统释放电能弥补功率缺额,独立储能的加入使得场景2在场景1的基础上提高了新能源消纳率、减小了功率缺额,但储能利用率较低,在消纳过剩电能方面能力有限。针对面向新能源消纳场景,场景3在发电侧通过集中式共享储能方式促进新能源消纳,以共享储能经济效益最大化为目标进行优化配置,结果表明共享储能在新能源消纳和弥补功率缺额具有积极的作用,同时在场景2的基础上大幅缩小了新能源出力与并网功率需求之间的功率差额,提高了电网的稳定性,同时减少了储能闲置时间,提高了储能利用率。

场景2与场景1对比可得,新能源场站配置独立储能有利于提高新能源消纳能力,配置独立储能后新能源消纳率提高了8.62%,也减小了并网功率缺额;场景3与场景2对比可得,共享储能可以避免独立储能调节能力有限的现状,同时减少了储能闲置时间,提高了储能资源利用率,在新能源消纳方面,由于巨额储能投资成本限制了储能消纳能力,本文所选取的共享储能配置方案比相同投资情况下的独立储能提高了2.82%,共享储能的盈利模式也缩短了储能投资的回收年限,有助于推动共享储能运营模式的发展。

## 5 结论

为改善面向新能源消纳场景中储能资源严重浪费、缺乏商业模式和投资回收年限长等问题,本文在考虑新能源消纳、储能电站约束、新能源场站对储能充放电需求的基础上,提出以共享储能收益最大为目标的共享储能优化配置模型,采用改进WOA进行求解。通过对比分析面向新能源消纳场景中储能的参与程度,得到以下结论。

(1) 新能源场站配置共享储能可以进一步提高新能源消纳能力、平抑出力波动,有利于减小并网功率缺额,发电侧集中式共享储能模式可以充分利用储能资源,更大限度的发挥储能时移特性消纳盈余电能和弥补功率缺额,可有效发挥风光储间的互补特性和调节特性。

(2) 共享储能的运行模式打破了独立储能服务对象单一、消纳和调节能力有限的窘境,通过储能资源共享的方式充分发挥挖掘储能资源的经济价值,投资回报率达20.8%,有效缩短了储能投资回收年限。

(3) 共享储能的经济性与新能源消纳率密切相关,在储能配置功率相同时,消纳率直接影响储能

配置的容量,导致投资建设成本急剧增加,延长储能投资回报年限,不利于共享储能的发展。

## 参考文献:

- [1] 范英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 95-105.  
FAN Ying, YI Bowen. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition [J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 95-105.
- [2] 徐婉迪, 魏来, 罗俊, 等. 储能产业发展带来的能源革命及其关键管理科学问题[J]. 系统管理学报, 2021, 30(1): 191-197.  
XU Wandu, WEI Lai, LUO Jun, et al. Energy revolution empowered by development of energy storage industry and its key management science issues [J]. Journal of Systems & Management, 2021, 30(1): 191-197.
- [3] 李牧南, 黄瑾. 我国当前共享经济发展障碍与相关政策启示[J]. 科技管理研究, 2020, 40(8): 237-242.  
LI Munan, HUANG Jin. Research on the barriers and policy implications of sharing economy in modern China [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(8): 237-242.
- [4] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 电力市场环境下考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1791-1804.  
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1791-1804.
- [5] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516.  
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [6] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366.  
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366.
- [7] LIU J, ZHANG N, KANG C. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: A business case study [J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [8] SUN L, QIU J, HAN X, et al. Capacity and energy sharing platform with hybrid energy storage system: An example of

- hospitality industry[J]. *Applied Energy*, 2020, 280:115897.
- [9]邱伟强,王茂春,林振智,等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10):244-255.
- QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10):244-255.
- [10]蒋从伟,欧庆和,吴仲超,等. 基于联盟博弈的多微网共享储能联合配置与优化[J]. *中国电力*, 2022, 55(12):11-21.
- JIANG Congwei, OU Qinghe, WU Zhongchao, et al. Joint configuration and optimization of multi-microgrid shared energy storage based on coalition game[J]. *Electric Power*, 2022, 55(12):11-21.
- [11]苏向敬,陈思利,米阳,等. 分布式电池储能在含高比例可再生能源不平衡配电网中的序次优化配置[J]. *电网技术*, 2019, 43(10):3698-3707.
- SU Xiangjing, CHEN Sili, MI Yang, et al. Sequential and optimal placement of distributed battery energy storage systems within unbalanced distribution networks hosting high renewable penetrations[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10):3698-3707.
- [12]朱佳明,刘斌,谢海远,等. 基于二层规划的用户侧储能容量配置和最优运行策略分析[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(10):43-50.
- ZHU Jiaming, LIU Bin, XIE Haiyuan, et al. Energy storage capacity allocation and optimal operation strategy analysis at demand side based on bilevel programming[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(10):43-50.
- [13]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):194-203.
- 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):194-203.
- [14]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(4):121-128.
- 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(4):121-128.
- [15]ZHANG Y, REN S, DONG Z Y, et al. Optimal placement of battery energy storage in distribution networks considering conservation voltage reduction and stochastic load composition [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(15):3862-3870.
- [16]TANG Y, LOW S H. Optimal placement of energy storage in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6):3094-3103.
- [17]WEN S, LAN H, FU Q, et al. Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(2):644-652.
- [18]谢雨龙,罗逸颀,李智威,等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11):4403-4413.
- XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11):4403-4413.
- [19]李咸善,解仕杰,方子健. 多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10):44-51.
- LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10):44-51.
- [20]帅轩越,王秀丽,黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(4):382-392.
- SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, HUANG Jing. Optimal configuration of shared energy storage capacity under multiple regional integrated energy systems interconnection [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(4):382-392.
- [21]刘轶涵,徐青山,杨永标,等. 计及配电网潮流约束下基于广义纳什议价理论的工业用户共享储能配置[J]. *电网技术*, 2023, 47(2):571-585.
- LIU Yihan, XU Qingshan, YANG Yongbiao, et al. Distribution network power flow constrained shared energy storage configuration for industrial consumers based on generalized Nash bargaining theory [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2):571-585.
- [22]何锦华,吴斌,曹敏健,等. 面向辅助服务的新能源场站共享储能容量优化配置[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6):50-57.
- HE Jinhua, WU Bin, CAO Minjian, et al. Capacity optimization configuration of shared energy storage in renewable energy stations for ancillary service [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6):50-57.
- [23]武泽权,牟永敏. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(12):3618-3621.
- WU Zequan, MU Yongmin. Improved whale optimization algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(12):3618-3621.
- [24]WATKINS W A, SCHEVILL W E. Aerial observation of

- feeding behavior in four baleen whales: *Eubalaena glacialis*, *Balaenoptera borealis*, *Megaptera novaeangliae*, and *Balaenoptera physalus* [J]. *Journal of Mammalogy*, 1979, 60(1): 155-163.
- [25] 吴成智. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. *现代计算机*, 2019(14): 8-13.  
WU Chengzhi. An improved whale optimization algorithm [J]. *Modern Computer*, 2019(14): 8-13.
- [26] 张永, 陈锋. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(3): 208-213, 219.  
ZHANG Yong, CHEN Feng. A modified whale optimization algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(3): 208-213, 219.
- [27] 褚鼎立, 陈红, 王旭光. 基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J]. *电子学报*, 2019, 47(5): 992-999.  
CHU Dingli, CHEN Hong, WANG Xuguang. Whale optimization algorithm based on adaptive weight and simulated annealing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(5): 992-999.
- [28] 覃溪, 龙文. 基于随机差分变异的改进鲸鱼优化算法[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(8): 937-942.  
QIN Xi, LONG Wen. An improved whale optimization algorithm based on stochastic difference mutation [J]. *China Sciencepaper*, 2018, 13(8): 937-942.
- [29] 曹文梁. 随机差分变异粒子群混合优化算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(6): 928-933.  
CAO Wenliang. Hybrid algorithm based on particle swarm optimization with stochastic differential mutation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(6): 928-933.
- [30] 王翔, 胡明, 闫岩, 等. 基于改进量子粒子群算法的综合能源系统优化配置[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(10): 19-24.  
WANG Xiang, HU Ming, YAN Yan, et al. Optimal configuration of integrated energy system based on improved quantum particle swarm optimization [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(10): 19-24.
- [31] 屈涛涛, 綦晓, 蒋文珂, 等. 考虑风电机组虚拟惯量的新型电力系统频率分布式模型预测控制策略[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(10): 25-32.  
QU Taotao, QI Xiao, JIANG Wenke, et al. Frequency distributed model predictive control strategy for the new power system considering virtual inertia of wind turbines [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(10): 25-32.
- [32] 李朋真, 刘艳红, 吴振龙. 高比例可再生能源的多区域电力系统负荷频率自抗扰控制[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(10): 33-41.  
LI Pengzhen, LIU Yanhong, WU Zhenlong. Active disturbance rejection control on load frequency of multi-area power systems with high-proportion renewable energy [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(10): 33-41.  
(本文责编: 张帆)

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-06-27  
上网日期: 2023-08-16; 附录网址: www.iienergy.cn

#### 作者简介:

栗庆根(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事新能源消纳、发电侧储能等方面的研究, liemailed@163.com;

孙娜(1977), 女, 副教授, 硕士, 从事清洁能源技术和经济等方面的研究, sunna@mail.lzjtu.cn;

董海鹰(1966), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 从事电力系统运行与优化控制、新能源发电等方面的研究, hydong@mail.lzjtu.cn。