

基于合作博弈的新能源场站群分散式共享储能 优化配置策略

李正曦^{1,3}, 周万鹏^{1,3}, 陈来军², 杨立滨^{1,3}, 李春来^{1,3}

(1. 国网青海省电力公司清洁能源发展研究院, 青海 西宁 810008; 2. 青海大学 新能源光伏产业研究中心, 青海 西宁 810016; 3. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810008)

摘要:针对新能源场站单独配置储能时储能利用率和经济性较低的问题,提出基于合作博弈的新能源场站群分散式共享储能优化配置策略。首先,设计了分散式新能源场站群共享储能架构并阐明了其运行机理;其次,以新能源场站群总收益为目标建立共享储能合作博弈模型,将新能源分散式共享储能的额定功率及额定容量作为决策变量,求解处于同一汇集站下的多个风/光新能源场站储能容量优化配置结果;最后,通过仿真分析了不同合作形式与弃电惩罚下的共享储能收益及影响。算例分析表明,该方法可以有效挖掘参与共享的场站的互补性,在降低参与共享的场站的储能建设需求的同时提升其运行经济性。

关键词:新能源场站;优化配置;共享储能;合作博弈

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.20204/j.sp.2025.06006

Optimal Allocation Strategy for Decentralized Shared Energy Storage in Renewable Energy Station Clusters Based on Cooperative Game Theory

LI Zhengxi^{1,3}, ZHOU Wanpeng^{1,3}, CHEN Laijun², YANG Libin^{1,3}, LI Chunlai^{1,3}

(1.Green Energy Development Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 2.New Energy (Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. State Grid Qinghai Electric Power Company Economic and Technology Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: To address the low utilization and economic efficiency of energy storage when individual renewable energy power stations are independently equipped with storage systems, this paper proposes a decentralized shared energy storage optimization allocation strategy for renewable energy power station clusters based on cooperative game theory. First, a decentralized shared energy storage architecture for renewable energy power station clusters is designed, and its operational mechanism is elucidated. Second, a cooperative game model for shared energy storage is established, aiming to maximize the total revenue of the renewable energy station cluster. The rated power and capacity of the decentralized shared energy storage are defined as decision variables. By leveraging the operational characteristics of multiple wind and solar energy stations under a shared collector station, the optimal energy storage capacity allocation across stations is determined. Finally, simulations analyze the impacts of different cooperation modes and curtailment penalties on shared energy storage revenue. Results demonstrate that the proposed method effectively exploits the complementary characteristics of participating stations, reducing their energy storage construction requirements while enhancing operational economic performance.

Key words: renewable energy power station; optimized configuration; shared energy storage; cooperative game

0 引言

对飞速发展的新能源场站的建设进行研究是电力系统低成本发展、高可靠性运行的基本保

障^[1-3]。由于新能源场站存在发电不确定性、间断性及振荡性等问题^[4-6],且不同发电方式的场站出力特性差异较大,电源侧储能以其响应的快速性及调节的灵活性,成为平抑发电随机波动,改善场站出力特性的重要技术^[7-9]。然而,对储能规模的评估策略不完善导致储能建设成本过高、容量利用率低的问题是在青海省电力设施的规模化应用中面临的挑战。因此对新能源场站开展分散式共享储能优化配置研究对青海省新能源系统发展具有重要意义。

现有文献对共享储能的运营模式进行了大量的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077109);国网青海省电力公司科学技术项目(522830210004)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077109); Science and Technology Project of State Grid Qinghai Electric Power Company(522830210004)

研究。文献[10]提出了一种主要考虑共享储能运营商、电网以及用户参与的共享储能投资及运营模式。文献[11]通过聚合区域内多个综合能源系统,利用多系统间电-热需求互补特性,降低区域综合能源系统的运行成本。文献[12]设计了风光储集群联合运行机制,并预留储能容量以平衡风光波动,实现风光储集群利益最大化。文献[13]依据负荷、光伏及风电的典型出力曲线,设计了计及供电可靠性的混合储能系统优化配置双层模型。文献[10-13]中的运营机制易于实现,适用于群体数目较少的共享,且主要是大容量、短时间储能需求的使用者。

随着参与共享的新能源场站数目不断增加,交易互动机制的复杂程度以几何倍数增长,且带来更多的风险。为降低市场风险,文献[14]将发电侧-电网侧-用户侧储能互相共享,有效提高各侧储能的容量利用率,避免系统中储能的冗余配置。文献[15]提出预算平衡和个体理性的基于价格的双重拍卖下的运营模式。文献[16]提出一种多区域综合能源系统的混合共享储能系统容量配置模型。文献[17]在区域电网中引入共享储能,增强电网稳定性的同时,大幅降低用户日运行成本。文献[18]为保证电力系统安全可靠运行,针对不同比例的风电场景,对风电容量和储能容量进行优化配置。但文献[14-18]共享储能运营机制大都仅在时间维度或空间维度上的单一层面利用,无法满足以电网、新能源场站为代表的多主体利益诉求。

综上所述,本文针对新能源场站单独配置储能时储能利用率和经济性较低的问题,提出基于合作博弈的新能源场站群分散式共享储能优化配置策略。研究的创新之处在于,建立了包含新能源场站群、共享储能运营商、电网的多主体优化调控模型,并提出了多新能源场站储能资源共享的运营模式与动态价格机制。

1 新能源场站群分散式共享储能模式

1.1 新能源场站群分散式共享储能架构

本文提出了一种新能源场站群的分散式共享储能架构,如图1所示。由图1可知,该架构通过电力联络线将不同的新能源场站汇集在一起,形成一个汇聚多种发电方式的新能源场站群。各个新能源场站通过联络线,在汇集站的统筹调度下进行能量传递,实现能源流动的共享,并最终由汇集站统一向电网传输电能。

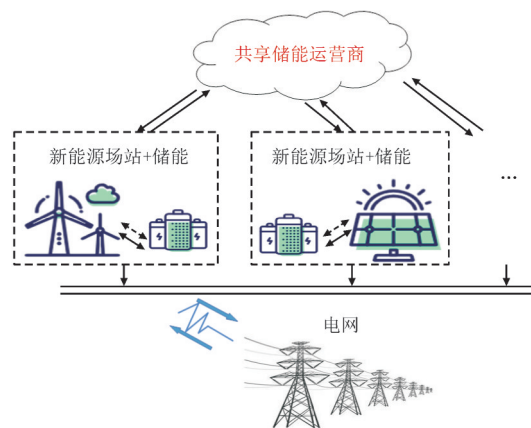


图1 新能源场站群分散式共享储能架构
Fig.1 Decentralized shared energy storage architecture for renewable energy station clusters

1.2 新能源场站群分散式共享储能机制

本文所提共享储能机制的关键在于能否灵活区分新能源场站从共享储能中充电还是放电,并利用不同新能源的出力互补特性进行能量共享。具体机制如下:

- 1)当某一新能源场站实际发电量低于计划电量,会先从场站自身储能调用能量,如果功率仍然不足,再申报需求从其余场站获取需要补足的电量。
- 2)若整个新能源场站群在经过一个时段的共享行为后仍有能量盈余,则将盈余电量按一定参与贡献率回送至各新能源场站的储能装置中。
- 3)若新能源场站群在采取能量共享行为后仍然无法满足当前的整体电量需求,则按照场站各自的缺额功率大小对其进行经济惩罚。

2 基于合作博弈的共享储能建模

2.1 共享储能博弈模型基本要素

不同发电方式的新能源场站在不同的新能源场站博弈组合下,需量化自身可获得的收益与贡献,进而决策最优合作对象。共享储能模型基本要素如下:

- 1)参与者集合。参与者主体由第 i 个风电场站 WF_i 和第 j 个光伏场站 PV_j 组成。
- 2)策略集合。共享储能均来自于参与共享的新能源场站,风电场站和光伏场站均需确定自身需要建设的储能额定功率与额定容量。 $P_{WF,i}^{rat,ES}$ 和 $E_{WF,i}^{rat,ES}$ 分别为第 i 个风电场站储能的额定功率与额定容量; $P_{PV,j}^{rat,ES}$ 和 $E_{PV,j}^{rat,ES}$ 分别为第 j 个光伏场站储能的额定功率与额定容量。使用集合 Ω 表达 $P_{WF,i}^{rat,ES}$, $E_{WF,i}^{rat,ES}$, $P_{PV,j}^{rat,ES}$, $E_{PV,j}^{rat,ES}$ 之间关系为:

$$\Omega = \begin{cases} 0 \leq P_{WF,i,t}^{ES} \leq P_{WF,i}^{rat,ES} \\ 0 \leq E_{WF,i,t}^{ES} \leq E_{WF,i}^{rat,ES} \\ 0 \leq P_{PV,j,t}^{ES} \leq P_{PV,j}^{rat,ES} \\ 0 \leq E_{PV,j,t}^{ES} \leq E_{PV,j}^{rat,ES} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{WF,i,t}^{ES}$ 、 $E_{WF,i,t}^{ES}$ 分别为 t 时刻第 i 个风电场站储能的可用功率和可用容量； $P_{PV,j,t}^{ES}$ 、 $E_{PV,j,t}^{ES}$ 分别为 t 时刻第 j 个光伏场站储能的可用功率和可用容量。

3) 支付。合作博弈模型的支付为各个新能源场站在其全寿命周期内的净利润。其中,全寿命周期收入包括:新能源上网收益、共享储能运行时避免的惩罚成本效益等;全寿命周期成本包含:储能运维成本、储能年平均投资成本等。

2.2 新能源场站群分散式共享储能收益分析

2.2.1 不参与共享

以风电场站为例,当第 i 个风电场站不参与共享时,其年化收益 $R_{WF,i}^{NP}$ 由第 i 个风电场站发电上网收入 $R_{WF,i}^{SEL,NP}$ 、第 i 个风电场站自配储能年的平均投资成本 $C_{WF,i}^{ES,NP}$ 、第 i 个风电场站出力偏差惩罚成本 $C_{WF,i}^{PT,NP}$ 组成。 $R_{WF,i}^{NP}$ 表达式为^[19]:

$$\begin{cases} R_{WF,i}^{NP} = R_{WF,i}^{SEL,NP} - C_{WF,i}^{ES,NP} - C_{WF,i}^{PT,NP} \\ P_{WF,i,t}^{GC} = P_{WF,i,t}^{real} - P_{WF,i,t}^{ES} \\ R_{WF,i}^{SEL,NP} = 365 \sum_{t=1}^T (P_{WF,i,t}^{GC} \xi_{WF,i}^{GC}) \\ C_{WF,i}^{ES,NP} = E_{WF,i}^{rat,ES} C_{unit}^{ES} \frac{\gamma(1+\gamma)^{T_{life}}}{(1+\gamma)^{T_{life}} - 1} \\ C_{WF,i}^{PT,NP} = 365 \sum_{t=1}^T \begin{cases} C_{unit}^{PT} P_{WF,i,t}^1, & P_{WF,i,t}^1 > 0 \\ C_{unit}^{PT} P_{WF,i,t}^2, & P_{WF,i,t}^2 > 0 \end{cases} \\ P_{WF,i,t}^1 = P_{WF,i,t}^{GC} - (1+\alpha) P_{WF,i,t}^{pre} \\ P_{WF,i,t}^2 = (1-\alpha) P_{WF,i,t}^{pre} - P_{WF,i,t}^{GC} \end{cases} \quad (2)$$

式中： C_{unit}^{ES} 为单位储能容量的投资成本； $\xi_{WF,i}^{GC}$ 为风电上网电价； γ 为资本体现率； T_{life} 为储能使用寿命； C_{unit}^{PT} 为单位偏差惩罚成本； T 为全天 24 个时刻； $P_{WF,i,t}^{GC}$ 为 t 时刻第 i 个风电场站的上网功率； α 为风电场站出力的允许偏差范围,当风电场站向电网的输出功率超出偏差范围则需缴纳相关偏差惩罚费用； $P_{WF,i,t}^{pre}$ 、 $P_{WF,i,t}^{real}$ 分别为 t 时刻第 i 个风电场站的预测输出功率与实际输出功率； $P_{WF,i,t}^{ES}$ 为 t 时刻第 i 个风电场站储能的充电功率/放电功率, $P_{WF,i,t}^{ES} > 0$ 时储能充电,反之放电； $P_{WF,i,t}^1$ 与 $P_{WF,i,t}^2$ 为 t 时刻第 i 个风电场站功率的中间过渡变量。

储能运行时还需满足如下约束:

1) 电量约束^[20]。第 i 个风电场站储能运行时需满足荷电状态上下限 $O_{SOC,i}^{max}$ 、 $O_{SOC,i}^{min}$ 要求:

$$O_{SOC,i}^{min} E_{WF,i}^{rat,ES} \leq E_{WF,i,t}^{ES,NP} \leq O_{SOC,i}^{max} E_{WF,i}^{rat,ES}, \forall i, t \quad (3)$$

式中： $E_{WF,i,t}^{ES,NP}$ 为 t 时刻第 i 个风电场站储能不参与共享时的容量。

$E_{WF,i,t}^{ES,NP}$ 不仅与 t 时刻第 i 个风电场站储能的充放电功率相关,还与 $t-1$ 时刻第 i 个风电场站储能不参与共享时的容量 $E_{WF,i,t-1}^{ES,NP}$ 、自放电率 η_{sel} 、充电效率 η_{cha} 及放电效率 η_{dis} 相关^[21]:

$$\begin{cases} E_{WF,i,t}^{ES,NP} = (1 - \eta_{sel}) E_{WF,i,t-1}^{ES,NP} - \Delta E_{WF,i,t}^{ES,NP}, \forall i \\ \Delta E_{WF,i,t}^{ES,NP} = \begin{cases} P_{WF,i,t}^{ES} \eta_{cha}, & P_{WF,i,t}^{ES} > 0 \\ P_{WF,i,t}^{ES} / \eta_{dis}, & P_{WF,i,t}^{ES} \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\Delta E_{WF,i,t}^{ES,NP}$ 为 t 时刻第 i 个风电场站储能不参与共享时的变化容量。

2) 一致性约束。为保证储能的安全稳定运行,在典型日调度周期内储能的累计充放电电量之和应为 0^[22]。 $P_{WF,i,t}^{ES}$ 与其关系表达式为:

$$\sum_{t=1}^T P_{WF,i,t}^{ES} = 0, \forall i \quad (5)$$

2.2.2 参与共享

1) 新能源场站盈余功率。以第 i 个风电场站为例,当第 i 个风电场站参与共享时,储能应首要满足自身场站的功率跟踪需求,仅当需求得到完全满足时,剩余容量方可参与共享。则 t 时刻第 i 个风电场站储能的剩余功率 $P_{WF,i,t}^{RE}$ 与未参与共享储能时 t 与 $t+1$ 时刻的储能充放电功率有关。 $P_{WF,i,t}^{RE}$ 的表达式为:

$$P_{WF,i,t}^{RE} = \begin{cases} (E_{WF,i,t}^{ES} - O_{SOC,i}^{min} E_{WF,i}^{rat,ES}) - \frac{P_{WF,i,t+1}^{ES}}{\eta_{dis}}, & P_{WF,i,t+1}^{ES} > 0, \forall i, t \\ E_{WF,i,t}^{ES} - O_{SOC,i}^{min} E_{WF,i}^{rat,ES}, & P_{WF,i,t+1}^{ES} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $P_{WF,i,t+1}^{ES}$ 为 $t+1$ 时刻第 i 个风电场站储能的充电功率/放电功率。

为限制储能在同一时刻不能同时充放电,规定只有当 t 时刻第 i 个风电场站储能处于充电状态时才可向共享储能提供盈余功率, t 时刻第 i 个风电场站储能可提供的盈余功率 $P_{WF,i,t}^{ARE}$ 为:

$$P_{WF,i,t}^{ARE} = \begin{cases} 0, & P_{WF,i,t}^{ES} < 0 \\ P_{WF,i,t}^{RE}, & P_{WF,i,t}^{ES} \geq 0 \end{cases}, \forall i, t \quad (7)$$

2) 新能源场站需求功率。当 t 时刻第 i 个风电场站储能参与共享时,若储能不能满足自身场站需求,则场站 i 可向共享储能上报需求,风电场站 i 在 t 时刻向共享储能上报的功率需求 $P_{WF,i,t}^{DS}$ 为:

$$P_{WF,i,t}^{DS} = \begin{cases} 0, (1 - \alpha) P_{WF,i,t}^{pre} - P_{WF,i,t}^{GC} \leq 0 \\ (1 - \alpha) P_{WF,i,t}^{pre} - P_{WF,i,t}^{GC}, \text{其它} \end{cases}, \forall i, t \quad (8)$$

3)共享储能功率分配。假设该汇集站仅存在风电场站, t 时刻共享储能盈余容量应不低于各风电场站的总上报需求,存在如下关系:

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{SESS-WF}} = P_{\text{WF},i,t}^{\text{DS}} \\ P_{i,t}^{\text{WF-SESS}} = \frac{P_{\text{WF},i,t}^{\text{ARE}}}{\sum_{i \in N_{\text{SESS}}} P_{\text{WF},i,t}^{\text{ARE}}} \sum_{i \in N_{\text{SESS}}} P_{\text{WF},i,t}^{\text{DS}}, \forall t \end{cases} \quad (9)$$

式中: N_{SESS} 为参与共享的风电场站集合; $P_{t,i}^{\text{SESS-WF}}$ 为 t 时刻共享储能运营商向第 i 个风电场站输入的功率; $P_{i,t}^{\text{WF-SESS}}$ 为 t 时刻第 i 个风电场站储能向共享储能运营商输入的功率。

同理,若 t 时刻共享储能盈余容量小于各风电场站总上报需求,存在如下关系:

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{SESS-WF}} = \frac{P_{\text{WF},i,t}^{\text{DS}}}{\sum_{i \in N_{\text{SESS}}} P_{\text{WF},i,t}^{\text{DS}}} \sum_{i \in N_{\text{SESS}}} P_{\text{WF},i,t}^{\text{ARE}}, \forall t \\ P_{i,t}^{\text{WF-SESS}} = P_{\text{WF},i,t}^{\text{ARE}} \end{cases} \quad (10)$$

4)共享储能动态价格机制。各新能源场站可决定自身是否参与共享储能,本文设计一种与参与共享储能的场站数量有关的动态价格机制,共享储能的购电价格 $\xi_{\text{SESS}}^{\text{buy}}$ 与售电价格 $\xi_{\text{SESS}}^{\text{sel}}$ 之间关系为:

$$\begin{cases} \xi_{\text{SESS}}^{\text{buy}} = \xi_{\text{ini}} \left(0.5 + \frac{N_{\text{SESS}}}{N} \right) \\ \xi_{\text{SESS}}^{\text{sel}} = \xi_{\text{ini}} \left(3 - \frac{N_{\text{SESS}}}{N} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: ξ_{ini} 为基准价格。

5)新能源场站收益。以第 i 个风电场站为例,参与共享的收益 $R_{\text{WF},i}^{\text{par}}$ 由参与共享的发电上网收入 $R_{\text{WF},i}^{\text{SEL-par}}$ 、共享储能运营商的售电收益 $R_{\text{WF},i}^{\text{SESS,sel}}$ 、共享储能运营商处购电成本 $C_{\text{WF},i}^{\text{SESS,buy}}$ 、参与共享的自配储能的年平均投建成本 $C_{\text{WF},i}^{\text{ES-par}}$ 以及参与共享的风电出力偏差惩罚成本 $C_{\text{WF},i}^{\text{PT-par}}$ 组成,其中关系为^[23-25]:

$$R_{\text{WF},i}^{\text{par}} = R_{\text{WF},i}^{\text{SEL-par}} + R_{\text{WF},i}^{\text{SESS,sel}} - C_{\text{WF},i}^{\text{ES-par}} - C_{\text{WF},i}^{\text{PT-par}} - C_{\text{WF},i}^{\text{SESS,buy}} \quad (12)$$

3 共享储能合作博弈模型求解

为实现联盟收益最大化,本文通过模拟粒子群在解集空间内寻优的过程,不断迭代优化以得到最优策略,共享储能合作博弈模型求解流程如图2所示。主要步骤为:(1)通过随机生成各新能源场站配储的额定容量与额定功率,不断进行迭代优化过程以确定最优解,从而获得新能源场站集群的最优策略与各新能源场站的优化配置策略;(2)每次迭代完成,将本轮策略与上代策略进行比较,择优保留,直至满足收敛条件;(3)在完成步骤(1),(2)达

到收敛后,各新能源场站再经汇集站进行收益分配,确定收益情况,各场站通过比较不同策略所带给他们的收益来决定是否加入合作博弈联盟参与储能投资。

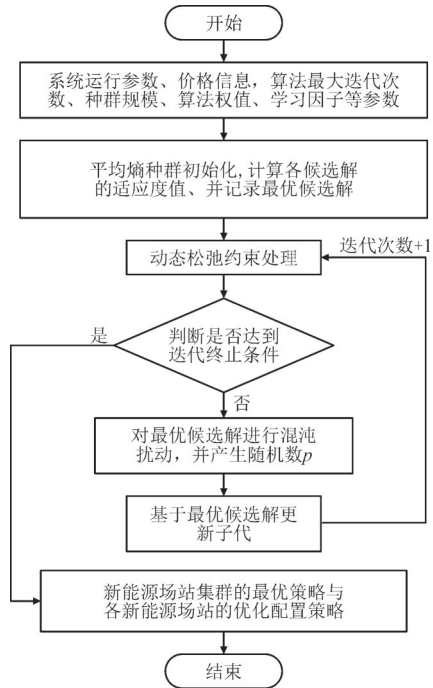


图2 共享储能合作博弈模型求解流程

Fig.2 Solution process for shared energy storage cooperative game model

4 算例分析

4.1 参数设置

本文对所提出的共享储能博弈模型进行仿真分析,选取我国青海省海南地区某一汇集站下的新能源集群中3个风电场站和2个光伏场站进行算例仿真分析。其中,风电场站的额定发电功率为100 MW,240 MW,80 MW,光伏场站的额定发电功率值为220 MW,110 MW。所用参数设置^[26-28]如表1所示。

表1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
单位误差惩罚 [元·(MWh) ⁻¹]	1 200	单位弃电惩罚 [元·(MWh) ⁻¹]	400
储能装置单位功率 成本[元·(MW) ⁻¹]	1 600	储能装置单位容量成 本[元·(MWh) ⁻¹]	3 400
全寿命周期/a	10	资本贴现率/%	0.8

新能源场站的发电功率与负荷功率如图3所示。

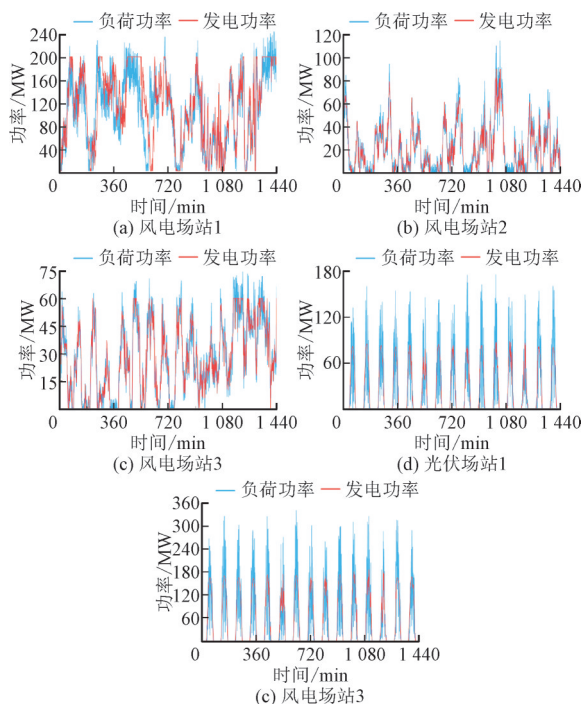


图3 新能源场站的发电功率与负荷功率

Fig.3 Generation power of renewable energy stations and load power

将新能源场站群上网电价按峰、平、谷3段划分,不同时段上网电价如表2所示。算例所采用的时间段数为1440 min,各场景优化采用粒子群算法进行求解。其中,种群规模设置为100,迭代次数设置为5000次。

表2 不同时段上网电价

Table 2 Time-of-use feed-in tariff

元/MWh

时段	电价
高峰时段	10:00—13:00 17:00—22:00
平时段	6:00—10:00 13:00—17:00
低谷时段	00:00—06:00 22:00—24:00
	800 800 400 400 200 200

4.2 共享储能收益对比分析

为更好地分析能量共享对新能源场站储能建设功率与容量、收益的影响,本文分析能量共享与独立运营2种不同的情况,以汇集站功率、容量、收益情况代表新能源场站集群功率、容量、收益情况。有无能量共享场景下储能建设功率、容量、收益对比结果见图4。由图4可知,共享模式下,新能源场站群对储能建设功率的总需求降低了27.99%,对储能建设容量的总需求降低了23.23%。各新能源场站运行成本均不同程度减少,新能源场站群的收益之和增加了7.88%。分析表明,共享模式不仅降低

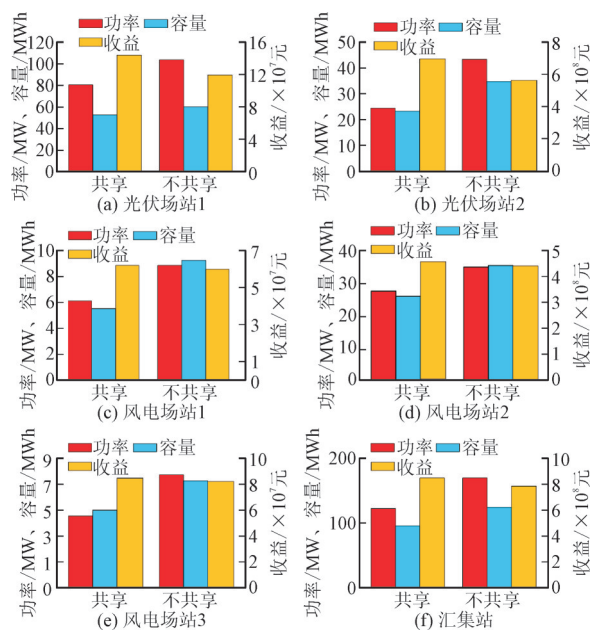


图4 有无能量共享场景下储能建设功率、容量、收益对比

Fig.4 Comparison of energy storage construction power, capacity, and revenue in scenarios with and without energy sharing

了各新能源场站参与者对自身配置储能的需求量,而且各发电场站均可获得比独立运营时更高的收益,激励各参与者加入汇集站下的新能源场站群。

4.3 合作形式对共享储能的影响分析

为更好地分析不同组合的合作方式对新能源场站群分散式共享储能配置结果的影响,在能量共享机制与所有参数不变的情况下,分析单一风电出力下3个风电场站进行合作与单一光伏出力下2个光伏场站进行合作的规划模型对收益结果造成的影响。不同合作组合下共享储能收益情况如表3所示。

表3 不同合作组合下共享储能收益情况

Table 3 Shared energy storage revenue under different cooperation combinations

元

项目	参与者	收益	与汇集站的收益差值
单独风电场站合作	风电场 1	6.11×10^7	8.61×10^5
	风电场 2	4.52×10^8	3.72×10^6
	风电场 3	9.29×10^7	5.19×10^5
	风电合作总收益	6.06×10^8	5.10×10^6
单独光伏场站合作	光伏场站 1	1.55×10^8	9.16×10^6
	光伏场站 2	6.65×10^7	3.54×10^6
	光伏合作总收益	2.21×10^8	1.27×10^7
单一发电形式下的总收益	—	8.27×10^8	1.78×10^7

由表3可知,单一发电出力场景与汇集站下不同发电方式结合的场景相比,各新能源场站的收益均有不同程度的减少,其中单一风电出力下风电场站的3个参与者分别降低了1.39%,0.82%,0.56%;单一的光伏出力下光伏场站的2个参与者分别降低

了5.60%,5.05%。这是因为风电和光伏发电之间的互补性能在不同的时间、不同的地区得到充分利用,对于能源共享机制来说,共享交易的电力比单一的风电或光伏发电更稳定可靠。因此,风电、光伏的互补会使新能源场站群的整体效益得到明显提升。

4.4 弃电惩罚对共享储能的影响分析

为分析弃电惩罚成本对博弈结果的影响,取弃电惩罚成本为200~800元/MWh的7组数据,在其余参数不变的情况下进行对比。不同弃电惩罚成本下共享储能的收益如图5所示。

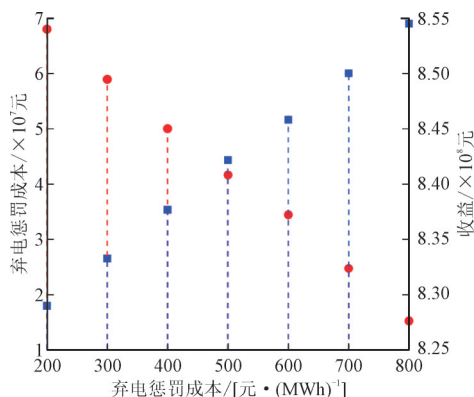


图5 不同弃电惩罚成本下共享储能的收益

Fig.5 Revenue of shared energy storage under different curtailment penalty costs

由图5可知,弃电惩罚成本增加时,新能源场站群的弃电惩罚成本增加了34.09%,收益降低了3.09%。这是因为在共享储能机制下,随着弃电惩罚成本的增加,新能源场站将更多的功率参与到能量共享中,共享电量在售电电量中占比不断上升,以此来降低弃电惩罚成本对收益的影响。因此,弃电惩罚成本大小将会不同程度地影响新能源场站参与者的决策并且各参与者的受影响程度不同。

5 结论

本文针对新能源场站单独配置储能时储能利用率和经济性较低问题,提出基于合作博弈的新能源场站群分散式共享储能优化配置策略。通过算例分析,得到主要结论如下:

1)所提共享储能模式激发了各场站参与能量共享的积极性,在保障汇集站下新能源场站群的稳定性的同时,降低了储能建设容量的总需求。

2)采取共享储能模式后,弃风弃光惩罚会促使储能的利用程度增加,从而增加新能源场站使用储能的收益,但惩罚过高会导致储能总体收益降低。

在下一步的工作中,将围绕青海省共享储能的价格形成机制开展研究,综合考虑政府引导、电网公司支持与新能源场站投资,研究基于博弈论的共享储能价格形成机制,全力支撑青海省共享储能的有序发展。

参考文献

- [1] 王维庆,李笑竹,褚龙浩.大规模可再生能源发电友好并网与运行调控技术研究综述[J].新疆大学学报,2024,41(2):129-144,156. WANG Weiqing, LI Xiaozhu, CHU Longhao. A review of research on friendly grid connection and operation control technology for large scale renewable energy generation[J]. Journal of Xinjiang University, 2024, 41(2): 129-144, 156.
- [2] 林俐,马笑寒,丁文敏.计及构网型储能电站的新能源基地无功协调优化控制[J].电力系统自动化,2025,49(1):59-68. LIN Li, MA Xiaohan, DING Wenmin. Reactive power coordinated optimal control of renewable energy bases considering grid-forming energy storage power stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 59-68.
- [3] 王祺,张泽轲,郭杰帅,等.新型电力系统主动构网机理与技术路径[J].中国电机工程学报,2024,44(2):504-517. WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technological pathway of active grid-forming in modern power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.
- [4] 朱继忠,董瀚江,李盛林,等.基于分布式新能源集群的微电网调度综述[J].中国电机工程学报,2024,44(20):7952-7970. ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. A review on optimal scheduling of micro-energy grids based on distributed renewable energy clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7952-7970.
- [5] 李青春,徐君威,张绍强,等.计及新能源波动平抑的储能电站日前-实时运行决策[J].太阳能学报,2025,46(3):43-53. LI Qingchun, XU Junwei, ZHANG Shaoqiang, et al. Day-ahead and real-time operational decision-making for energy storage power stations considering renewable energy fluctuation mitigation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(3): 43-53.
- [6] 刘志伟,马悦,沙志成,等.考虑新能源多重相关性的柔性配电网分布鲁棒优化策略[J].中国电力,2024,57(12):97-108. LIU Zhiwei, MA Yue, SHA Zhicheng, et al. A distributionally robust optimization strategy for flexible distribution networks considering multi-correlation of renewable energy [J]. Electric Power, 2024, 57(12): 97-108.
- [7] 唐西胜,李伟,沈晓东.面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J].电力系统自动化,2024,48(9):178-191. TANG Xisheng, LI Wei, SHEN Xiaodong. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 178-191.
- [8] 陈阳,谢丽蓉,马兰,等.考虑光伏预测误差兼顾平抑波动的双层储能运行策略[J].电力工程技术,2023,42(1):70-79. CHEN Yang, XIE Lirong, MA Lan, et al. A two-layer energy storage operation strategy considering PV prediction error and fluctuation suppression[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 70-79.
- [9] 段双明,于航,刘聪,等.考虑储能单元健康状态与荷电状态一致性的BESS功率分配策略[J].电力系统自动化,2023,47(5):65-73. DUAN Shuangming, YU Hang, LIU Cong, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system Considering consistency of state of health and state of charge of energy storage units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 65-73.
- [10] 赵宇轩,宋伟峰,李伟康,等.考虑共享储能容量配置的多虚拟

- 电厂优化运行方法[J].电网与清洁能源,2024,40(1):92-101.
ZHAO Yuxuan, SONG Weifeng, LI Weikang, et al. Optimal operation method for multi-virtual power plants considering shared energy storage capacity allocation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 92-101.
- [11] 郭宴秀, 苏建军, 刘洋, 等. 考虑电热交互和共享储能的多综合能源系统运行优化[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 138-145.
GUO Yanxiu, SU Jianjun, LIU Yang, et al. Operation optimization of multi-integrated energy systems considering electricity-heat interaction and shared energy storage[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 138-145.
- [12] 伍仰金, 郭茜婷, 郑传良, 等. 考虑储能共享的风光储集群联合优化运行及竞标策略[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 219-227.
WU Yangjin, GUO Qianting, ZHENG Chuanliang, et al. Joint optimal operation and bidding strategy of wind-PV-storage clusters considering shared energy storage[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 219-227.
- [13] 赵宇, 李谦, 张云晓, 等. 含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 25-32, 49.
ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 25-32, 49.
- [14] 郝丽丽, 吕肖旭, 丁逸行, 等. 考虑容量共享的新能源-电网-用户侧储能优化配置策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5607-5620.
HAO Lili, LYU Xiaoxu, DING Yixing, et al. Optimal configuration strategy of renewable energy-grid-customer side energy storage considering capacity sharing[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5607-5620.
- [15] 张紫涛, 高赐威, 宋梦, 等. 基于资源特性的广义共享储能建模与拍卖机制研究[J]. 供用电, 2024, 41(12): 23-32.
ZHANG Zitao, GAO Ciwei, SONG Meng, et al. Research on generalized shared energy storage modeling and auction mechanism based on resource characteristics[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(12): 23-32.
- [16] 周勃, 李二超. 一种考虑风光不确定性的热电混合共享储能双层优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2025, 46(3): 189-198.
ZHOU Bo, LI Erchao. A bi-level optimal allocation method for hybrid thermal-electrical shared energy storage considering wind-PV uncertainty[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(3): 189-198.
- [17] 王茜, 程艳, 赵晋斌, 等. 考虑运营机制的区域电网共享储能系统优化运行研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(2): 96-103.
WANG Qian, CHENG Yan, ZHAO Jinbin, et al. Optimal operation of regional grid shared energy storage systems considering operational mechanisms[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 96-103.
- [18] 郭峰, 王悦, 陆鑫, 等. 含高比例风电的新型电力系统的经济运行及储能配置[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 76-82.
GUO Feng, WANG Yue, LU Xin, et al. Economic operation and energy storage configuration of new power system with high penetration of wind power[J]. Smart power, 2023, 51(11): 76-82.
- [19] 喻颖倩, 何川, 刘天琪, 等. 计及储能调频与寿命损耗的多套餐共享储能主从博弈分布鲁棒定价方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1450-1465.
YU Yingqian, HE Chuan, LIU Tianqi, et al. Research on distributionally robust pricing method for multi-package shared energy storage based on Stackelberg game considering frequency regulation and lifespan degradation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1450-1465.
- [20] 石俊逸, 贾燕冰, 韩肖清, 等. 基于改进p-有效点法的多风电场共享储能联合参与一次调频的容量优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 503-512.
SHI Junyi, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimization of multi-wind farm shared energy storage jointly participating in primary frequency regulation based on improved p-efficient point method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(8): 503-512.
- [21] 张程, 江伟龙, 罗玉锦, 等. 考虑风光不确定性的多数据中心微网与共享储能协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 72-84.
ZHANG Cheng, JIANG Weilong, LUO Yujin, et al. Collaborative optimal operation of multiple data center microgrids and shared energy storage considering wind power and photovoltaic uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 72-84.
- [22] 程宇, 郭权利. 计及动态能源价格和共享储能电站的多主体综合能源系统双层优化调度策略[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 10-20.
CHENG Yu, GUO Quanli. Bi-level optimal scheduling strategy of multi-agent integrated energy system with dynamic energy prices and shared energy storage power station[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 10-20.
- [23] 陈鑫, 王果, 闵永智, 等. 计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 1-15.
CHEN Xin, WANG Guo, MIN Yongzhi, et al. A low-carbon and economic oriented generation-network-load-storage coordinated planning model for distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 1-15.
- [24] 宋梦, 林固静, 蒙璟, 等. 共享储能关键技术与应用[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(5): 585-599.
SONG Meng, LIN Gujing, MENG Jing, et al. Key technologies and applications of shared energy storage[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(5): 585-599.
- [25] 索之闻, 李晖, 王智冬, 等. 计及边际贡献的新能源场站分布式调相机投资收益评估方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 66-75.
SUO Zhiwen, LI Hui, WANG Zhidong, et al. Investment benefit evaluation method for distributed condensers in renewable energy stations considering marginal contribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 66-75.
- [26] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源ALK-PEM联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 68-80.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Multi-time scale optimal operation strategy for renewable energy-based ALK-PEM hybrid hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
- [27] 杨昆, 刘通, 柏林, 等. 基于谈判博弈的微电网群多主体共享储能容量优化配置策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 33-41.
YANG Kun, LIU Tong, BO Lin, et al. Shared energy storage capacity optimization configuration strategy for multi-agent microgrid clusters based on bargaining game[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 33-41.
- [28] 杨昶兴, 李笑竹, 陈来军, 等. 计及联盟合作成本的新能源场站共享储能优化配置策略[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1403-1412.
YANG Changxing, LI Xiaozhu, CHEN Laijun, et al. Energy storage allocation strategy for renewable energy generation station clusters co-build and share considering the cost of alliance cooperation[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1403-1412.

(责任编辑 李 萌)

收稿日期: 2024-10-23; 修改日期: 2025-05-13

作者简介: 李正曦(1990), 男, 青海海东人, 硕士研究生, 中级工程师, 主要研究方向为新能源及分布式电源并网调度、新能源并网测试技术。E-mail: 18209783306@163.com