

引用格式:张林垚,吴桂联,廖锦霖,等.考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):44-52.

Citation: ZHANG Linyao, WU Guilian, LIAO Jinlin, et al. Multi-agent cooperative dispatching strategy for distribution network considering shared energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 44-52.

考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略

张林垚¹, 吴桂联¹, 廖锦霖¹, 胡鑫², 刘丽军²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350011; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对目前配网侧储能商运营模式单一、盈利方法模糊以及利用率低等问题,提出一种兼具电能自营和储能共享的储能商运营模式。首先,建立考虑共享储能的配电网多主体协同调度模型,该模型兼顾配电网、负荷聚合商和储能商的利益诉求,同时有效降低配电网净负荷峰谷差,缓解主网调峰压力。然后,模型实施两阶段优化,第1阶段为储能租赁容量优化,即配电网按需租赁储能进行削峰填谷,使租赁成本和净负荷方差最小;第2阶段为多主体协同优化,即储能商根据分时电价利用剩余容量“低储高放”套利,与负荷聚合商共同响应调峰,使配电网成本最低、负荷聚合商收益最大以及储能商套利最多,实现各主体互利共赢。最后,通过算例分析验证该文所提方法的有效性。

关键词:共享储能;多主体;协同优化;两阶段;储能套利

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.006 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2024)02-0044-09

Multi-agent cooperative dispatching strategy for distribution network considering shared energy storage

ZHANG Linyao¹, WU Guilian¹, LIAO Jinlin¹, HU Xin², LIU Lijun²

(1. Economic Technology Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350011, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In view of the current problems of only single operation mode, vague profit method, and low utilization rate of the energy storage business for power grid, a business operation mode combining self-operated electricity and shared energy storage is proposed. First, a multi-agent collaborative scheduling model of the power distribution network considering shared energy storage is established. This model takes into account the interests of the power distribution network, load aggregators, and energy storage providers, while effectively reducing the peak-to-valley difference of the net load and hence relieving the peak shaving pressure of the power grid. Then, the model implements a two-stage optimization. The first stage is the leasing optimization of energy storage capacity, that is, the power distribution network leases energy storage on demand for peak shaving and valley filling, minimizing leasing costs and net load variance. The second stage is multi-agent collaborative optimization, where energy storage providers arbitrage by using remaining capacity to "store at low prices and discharge at high prices" based on time-of-use electricity prices, and respond to peak shaving together with load aggregators. This minimizes the cost of the power distribution network, maximizes the benefits of load aggregators, and maximizes the arbitrage of energy storage providers, achieving mutual benefit and win-win results for all parties. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through example analysis.

Key words: shared energy storage; multi-agent; collaborative optimization; two stages; energy storage arbitrage

双碳背景下可再生能源在配电网中的渗透率越来越高,其带来的不确定性也给电力系统的可

靠、高效运行带来挑战^[1]。储能由于能快速平抑功率波动、减少电力供需时空失衡等优点而得到广泛

收稿日期:2023-05-04;修回日期:2023-10-11

基金项目:国网福建省电力有限公司经济技术研究院研究专项(B3130N22001Q)

通信作者:刘丽军(1982—),女,博士,副教授,主要从事电力系统规划与运行、分布式发电技术等研究;E-mail:liulijun0120@fzu.edu.cn

应用^[2-4]。但随着各产业装机规模的逐渐增长,储能产业正面临着商业模式单一、盈利方法模糊以及实际利用率低的市场发展弱势^[5]。若能通过合理改善储能运营模式并实现储能资源的高效利用,则可进一步促进未来电力市场环境下可再生能源与储能产业的协调发展。

共享储能(shared energy storage, SES)通常是指一个公共储能设备为多个客户提供储能租赁服务的模式,根据投资运营可分为用户共建共享和运营商投建共享 2 种模式^[6-8]。在提高储能设备利用率、降低一次投资成本以及提升电网运行稳定性等方面表现出卓越的优势^[9],具有广阔的发展前景。目前,对于共享储能的研究主要侧重于其运营模式及经济效益,且主要集中在用户侧,而对于电网侧共享储能电站参与系统调度的研究鲜有涉及。文献[10-13]提出了共享储能理念,将原本用户侧的分布式储能装置集中到云端,用云端的虚拟容量来代替实体储能进行共享,并对其商业模式进行了详细阐述;文献[14]通过对共享储能的优化配置,有效提高了储能设备的利用率;文献[15]研究了共享储能在多微电网并网系统中的应用,表明该模式在提高储能利用率的同时促进了新能源消纳。但文献[14-15]仅将储能租赁成本在多微电网间进行分摊,并未考虑储能运营商的收益。文献[16]在工业用户的经济调度中引入共享储能,显著降低了用户的运行成本,提高了经济效益,但目标仅考虑运行成本,忽略了储能在缓解配网调峰压力方面的潜在作用。

随着可再生能源的大量接入,配电网面临着净负荷峰谷差增大、电能质量下降等问题^[17],传统的弃风弃光、线路升级改造等解决办法存在可再生能源利用率低或投资效益不理想的弊端。文献[18]利用共享相变储能实现对配电网区域内及区域间净负荷的联合削峰填谷,提高了供电经济性,但该研究未考虑用户侧存在大量可调节负荷的情况。配电网可以通过租赁储能并联合可调节负荷对净负荷进行削峰填谷,从而减少常规调峰机组的大量建设,提高系统运行经济性,但如何权衡租赁成本和调峰效益,同时兼顾配电网各主体的利益成为亟须解决的问题。

针对上述问题,本文提出一种考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略。首先引入共享储能机制,明确租赁计费方式,然后实施两阶段调度:第 1 阶段以配电网租赁成本和净负荷方差最小为目标

函数,建立储能租赁容量优化模型,确定储能最佳租赁容量和功率并传递给第 2 阶段;第 2 阶段以配电网成本最低、负荷聚合商(load aggregator, LA)收益最大及共享储能运营商(shared energy storage aggregator, SESA)套利最多为目标,建立多主体协同优化模型,在满足储能套利约束的前提下实现各主体运行效益最大。

1 共享储能运营模式

1.1 储能自营共享框架

考虑共享储能运营商的配电网多主体运营框架如图 1 所示,主要包括:主动配电网(active distribution network, ADN)、LA 和 SESA。图 1 中描述了各主体的交互关系,包括能量、信息和资金的流动。

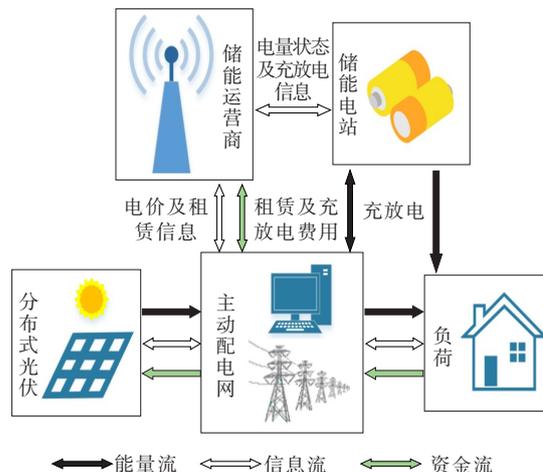


图 1 储能运营商自营共享运营框架

Figure 1 Self-operated and shared operation frameworks for energy storage operator

ADN 的运营目标是促进新能源就地消纳、实现负荷的削峰填谷和运行成本最低。ADN 优先消纳光伏(photovoltaic, PV)发电以平衡负荷,剩余的未平衡量为净负荷。为减轻主网调峰压力,ADN 权衡租赁成本和调峰效益向 SESA 租赁储能进行削峰填谷,再根据净负荷变化情况制定分时电价,促进 LA 进行需求响应,并进一步激励 SESA 利用储能剩余容量响应调峰,最后剩余未平衡的负荷则由 ADN 向主网购电予以满足。

LA 的运营目标是在尽量不影响用户正常用电的前提下进行需求侧响应并获得最大收益。LA 通过聚合多个用户的电力需求形成一定规模的需求响应,并与 ADN 签订合同,在负荷高峰期为 ADN 提供负荷调节能力,并以此获得收益。

SESA 的运营目标是配合 ADN 减小净负荷峰谷差并获得最大运营效益。SESA 根据 ADN 的租赁需求制定共享储能充放电策略,并根据分时电价利用储能剩余容量低储高放套利,自发响应调峰。

1.2 共享储能租赁机制

本文的储能租赁为混合计费方式,同时考虑储能租赁的能量容量、功率容量^[19]和充放电功率。其中能量容量表示在一个调度周期内储能充放电的深度,功率容量表示储能租赁时充放电的最大功率,二者从不同层面反映了 ADN 对储能的需求。频繁充放电会损害储能寿命,增加运营成本,而充放电功率按流量形式收费能反映用户使用储能的频繁程度,故以此为收费标准^[15]。储能的电量变化情况需满足相应的电量约束,如图 2 所示,柱状图为储能的运行功率。储能租赁功率、能量容量计算式分别为

$$P_i^{\text{cap}} = \max(|P_{i,t}|), t = 1, 2, \dots, 24 \quad (1)$$

$$S_i^{\text{cap}} = \omega(S_{\max,t} - S_{\min,t}) \quad (2)$$

式中, P_i^{cap} 、 S_i^{cap} 分别为 ADN 向第 i 个 SES 租赁的功率、能量容量; ω 为容量裕量系数; $S_{\max,t}$ 、 $S_{\min,t}$ 和 $P_{i,t}$ 分别为调度周期内储能电量的最大、最小值和充放电功率。

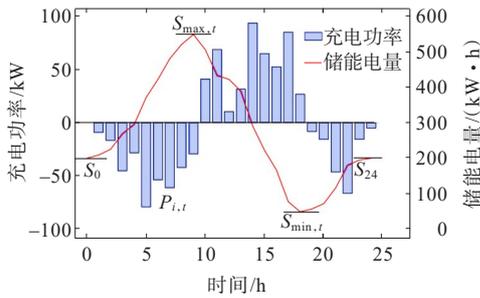


图 2 储能功率、能量容量需求示意

Figure 2 Schematic diagram of energy storage power and energy capacity requirement

2 考虑共享储能和 ADN 多主体的两阶段调度模型

2.1 整体优化调度框架

如图 3 所示,共享储能租赁和配电网多主体协同优化模型采用两阶段调度策略,保证储能高效利用和削峰填谷效益。

第 1 阶段 共享储能租赁容量制定策略,ADN 根据租赁价格和预期的调峰效果按需租赁储能。由于 ADN 租赁储能进行调峰的效果和租赁成本相互矛盾,因此,本文构建使 ADN 净负荷方差最小和

储能租赁成本最低的多目标优化模型,求解获得储能最佳租赁容量和租赁功率并传递给第 2 阶段。

第 2 阶段 考虑储能租赁的配电网多主体协同优化调度,ADN 租赁储能进行调峰,即 SESA 根据第 1 阶段所得到的储能充放电信息运行,并获得租赁收益;在此基础上,SESA 在满足套利功率、套利电量约束的前提下,根据分时电价利用储能剩余容量“低储高放”套利,同时 LA 进行需求侧响应,对负荷适当调整以获得收益。但配电网各主体利益交织并相互冲突,无法均达到最优,因此,本文构建使 ADN 运行成本最低、SESA 套利最多及 LA 收益最大的多目标优化模型,求解得到各主体出力情况及运行收益。

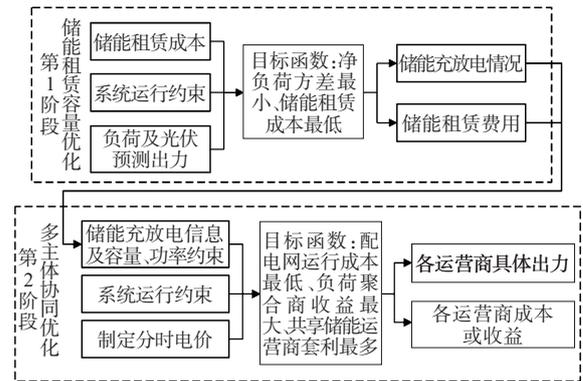


图 3 共享储能优化调度框架

Figure 3 Optimization dispatching framework of shared energy storage

2.2 第 1 阶段储能租赁容量优化模型

2.2.1 目标函数

目标 1 ADN 净负荷方差最小。

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} \left[P_{L,t} - \sum_{i=1}^{N_{PV}} P_{PV,i,t} - P_{ave} - \sum_{i=1}^{N_{SES}} (P_{dis,i,t} - P_{ch,i,t}) \right]^2 \quad (3)$$

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{24} \left[P_{L,t} - \sum_{i=1}^{N_{PV}} P_{PV,i,t} - \sum_{i=1}^{N_{SES}} (P_{dis,i,t} - P_{ch,i,t}) \right] \quad (4)$$

式(3)、(4)中, F_1 为 ADN 租赁储能后的净负荷方差; N_{PV} 、 N_{SES} 分别为 PV 和 SES 的个数; P_{ave} 为 ADN 在 t 时刻的平均负荷; $P_{L,t}$ 、 $P_{PV,i,t}$ 、 $P_{dis,i,t}$ 、 $P_{ch,i,t}$ 分别为 ADN 在 t 时刻的负荷、PV、SES 放/充电功率。

目标 2 ADN 租赁储能费用最低。

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_{SES}} \left[\alpha P_i^{\text{cap}} + \beta S_i^{\text{cap}} + \gamma \sum_{t=1}^{24} (P_{ch,i,t} + P_{dis,i,t}) \right] \quad (5)$$

式中, α 、 β 、 γ 分别为SESA的单位功率、单位能量容量租赁价格和单位功率充放电成本。

2.2.2 约束条件

本阶段主要考虑系统运行约束,包括功率平衡、SES储能电量、SES充放电功率、PV出力、潮流和节点电压约束。

1) 功率平衡约束。

$$\sum_{t=1}^{24}(P_{L,t} + P_{\text{loss},t}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},i,t} + P_{\text{grid},t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{SES}}} (P_{\text{dis},i,t} - P_{\text{ch},i,t}) \quad (6)$$

$$Q_{\text{grid},t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} Q_{\text{PV},i,t} = \sum_{i=1}^{24} Q_{L,t} \quad (7)$$

式(6)、(7)中, $P_{\text{loss},t}$ 为ADN网损; $P_{\text{grid},t}$ 为向主网购买的电量; $Q_{\text{grid},t}$ 、 $Q_{\text{PV},i,t}$ 、 $Q_{L,t}$ 分别为从主网获得、PV发出和ADN所需的无功功率。

2) SES充放电功率约束。

$$\begin{cases} P_{\text{ch},i,t} = A_t P_{\text{ch},i,t} \\ P_{\text{dis},i,t} = B_t P_{\text{dis},i,t} \\ 0 \leq A_t + B_t \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T (\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch},i,t} - P_{\text{dis},i,t} / \eta_{\text{dis}}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, A_t 、 B_t 为布尔变量,表示SES充放电状态,同一时刻内不能同时充放电,放电时 $A_t=0$ 、 $B_t=1$,充电时 $A_t=1$ 、 $B_t=0$,不工作时 $A_t=1$ 、 $B_t=1$; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为SES的充、放电效率。

3) 储能电量约束。

$$\begin{cases} S_0 = S_{24} \\ S_0 = 20\% S_{\text{max}} \\ 10\% S_{\text{max}} \leq S_t \leq 90\% S_{\text{max}} \\ S_t = S_{t-1} + (\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch},i,t} - P_{\text{dis},i,t} / \eta_{\text{dis}}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, S_t 为 t 时段SES的储能电量; S_{max} 为储能容量。一个周期内初始电量需等于终期电量。

4) PV出力约束。

PV可通过逆变器进行无功调节^[20],运行约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV},i,t} \leq P_{\text{PV},i,t}^{\text{max}} \\ P_{\text{PV},i,t}^2 + Q_{\text{PV},i,t}^2 \leq S_{\text{inv}}^2 \\ -P_{\text{PV},i,t} \tan \theta \leq Q_{\text{PV},i,t} \leq P_{\text{PV},i,t} \tan \theta \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{\text{PV},i,t}^{\text{max}}$ 为PV最大有功功率; S_{inv} 为逆变器容量; θ 为PV最小功率因数对应的功率因数角。本文取 $Q_{\text{PV},i,t} = 0.3287 P_{\text{PV},i,t}$

限于篇幅,潮流和节点电压约束详见文献[21]。

2.3 第2阶段多主体协同优化调度模型

基于第1阶段得到的SES出力和租赁成本,以ADN运行成本最低、LA收益最大和SESA套利最多为目标构建配电网多主体协同调度模型。

2.3.1 目标函数

目标1 ADN运行总成本最低,包括购电费用 $C_{\text{grid},t}$ 、LA补偿费用 $C_{\text{LA},t}$ 和储能租赁费用 $C_{\text{rent},t}$ 。

$$\begin{cases} J_1 = \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{grid},t} + C_{\text{LA},t} + C_{\text{rent},t}) \\ C_{\text{grid},t} = c_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t} \\ C_{\text{LA},t} = c_{\text{LA},t} \left(c_{\text{LA}} \sum_{i=1}^{N_{\text{IL}}} P_{\text{IL},i,t} + c_{\text{TL}} \sum_{i=1}^{N_{\text{TL}}} P_{\text{TL},i,t}^{\text{out}} \right) \\ C_{\text{rent},t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{SES}}} [\alpha P_i^{\text{cap}} + \beta S_i^{\text{cap}} + \gamma (P_{\text{ch},i,t} + P_{\text{dis},i,t})] \end{cases} \quad (11)$$

式中, $c_{\text{grid},t}$ 为 t 时段从主网购电的价格; c_{LA} 、 $P_{\text{IL},i,t}$ 分别为可中断负荷的补偿系数和中断功率; c_{TL} 、 $P_{\text{TL},i,t}^{\text{out}}$ 分别为可平移负荷的补偿系数和响应功率。

目标2 LA运行收益最大。

$$J_2 = \sum_{t=1}^{24} C_{\text{LA},t} \quad (12)$$

目标3 SESA套利最大,包括套利收入 C_{in} 和运行成本 C_{cost} 。

$$\begin{cases} J_3 = C_{\text{in}} - C_{\text{cost}} \\ C_{\text{in}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{\text{SES}}} c_{\text{grid},t} (P'_{\text{dis},i,t} - P'_{\text{ch},i,t}) \\ C_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{24} \left[\sigma \sum_{i=1}^{N_{\text{SES}}} (P'_{\text{ch},i,t} + P'_{\text{dis},i,t}) \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中, σ 为SES单位充放电功率运维成本; $P'_{\text{dis},i,t}$ 、 $P'_{\text{ch},i,t}$ 分别为套利阶段储能的放电、充电功率。

2.3.2 约束条件

本阶段主要考虑有功功率平衡、SES套利功率、电量和LA运行约束。

1) 有功功率平衡约束。

$$P_{L,t} + P_{\text{loss},t} = P_{\text{grid},t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{SES}}} P_{\text{SES},i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{LA}}} P_{\text{LA},i,t} \quad (14)$$

$$P_{\text{SES},i,t} = P_{\text{dis},i,t} - P_{\text{ch},i,t} + P'_{\text{dis},i,t} - P'_{\text{ch},i,t} \quad (15)$$

式中, $P_{\text{SES},i,t}$ 为第 i 个储能在 t 时段的总功率。

2) SES套利功率约束。

$$\begin{cases} P'_{\text{ch},i,t} = A_t P'_{\text{ch},i,t} \\ P'_{\text{dis},i,t} = B_t P'_{\text{dis},i,t} \\ \sum_{t=1}^T (\eta_{\text{ch}} P'_{\text{ch},i,t} - P'_{\text{dis},i,t} / \eta_{\text{dis}}) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中, A_t, B_t 来自第1阶段。该约束表示储能在同一时刻不能同时充放电, 即套利功率的充放电状态由租赁功率的充放电状态所决定。

3) SES 套利电量约束。

$$\begin{cases} \Delta S_0 = 0 \\ \Delta S_0 = \Delta S_{24} \\ 10\% S_{\max} \leq S_t + \Delta S_t \leq 90\% S_{\max} \\ \Delta S_t = \Delta S_{t-1} + (\eta_{ch} P'_{ch,i,t} - P'_{dis,i,t} / \eta_{dis}) \end{cases} \quad (17)$$

式中, ΔS_t 为套利时 SES 电量的变化量。该约束表示储能套利时电量不能超过储能安全运行的电量范围。

4) LA 运行约束。

可中断负荷包括功率、持续时间、次数和时间间隔约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{IL,i,t} \leq \zeta_{IL} P_{L,i,t} \\ 0 \leq T_{IL,i} \leq T_{IL,i}^{\max} \\ 0 \leq t_{IL,i} \leq t_{IL,i}^{\max} \\ \sum_t^{t+n} V_{IL,i,t} \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中, $P_{L,i,t}$ 为第 i 个用户 t 时段的负荷功率; ζ_{IL} 为可中断系数; $T_{IL,i}$ 为第 i 个用户中断的持续时间, $T_{IL,i}^{\max}$ 为第 i 个用户允许中断的持续时间上限; $t_{IL,i}$ 为第 i 个用户一天的中断次数, $t_{IL,i}^{\max}$ 为第 i 个用户一天允许中断的次数上限; n_t 为第 i 个用户允许2次负荷中断的最小时间间隔; $V_{IL,i,t}$ 为布尔变量, 表示第 i 个用户 t 时刻的中断状态, 1 表示负荷中断。

可平移负荷包括功率约束和平移前、后功率守恒约束, 保证了一个周期内转移前、后负荷总量不变, 且不会在同一时刻既转入又转出。

$$\begin{cases} P_{TL,t} = \zeta_{TL,t}^{\text{in}} P_{TL,t}^{\text{in}} - \zeta_{TL,t}^{\text{out}} P_{TL,t}^{\text{out}} \\ 0 \leq \zeta_{TL,t}^{\text{in}} + \zeta_{TL,t}^{\text{out}} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^{24} P_{TL,t} = 0 \\ 0 \leq P_{TL,t}^{\text{in}} \leq P_{\max,t}^{\text{in}} \\ 0 \leq P_{TL,t}^{\text{out}} \leq P_{\max,t}^{\text{out}} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{TL,t}^{\text{in}}, P_{TL,t}^{\text{out}}$ 分别为负荷 t 时刻的转入、转出功率; $\zeta_{TL,t}^{\text{in}}, \zeta_{TL,t}^{\text{out}}$ 均为 0-1 变量, 表示转入、转出状态; $P_{TL,t}$ 为转移后的负荷功率; $P_{\max,t}^{\text{in}}, P_{\max,t}^{\text{out}}$ 分别为 t 时刻可转入、转出负荷功率的上限。

其余无功功率、潮流和节点电压约束同第1阶段。

3 模型的求解及步骤

本文模型求解分为 2 个阶段, 求解流程如图 4 所示。

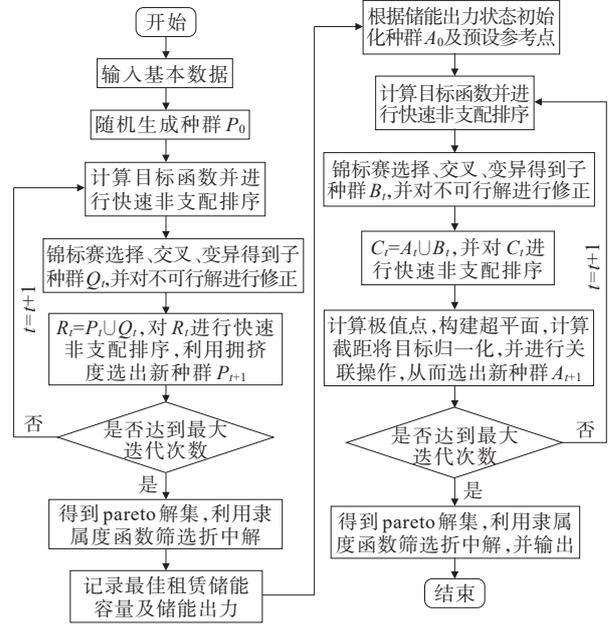


图 4 模型求解流程

Figure 4 Flowchart of model solving

第 1 阶段 由于本阶段目标函数 ADN 的净负荷方差最小与储能租赁成本具有矛盾性, 无法同时达到最优, 且目标函数仅有 2 个, 可采用带有精英保留策略的快速非支配排序遗传算法 (non-dominated sorted genetic algorithm-II, NSGA-II) 快速求解 Pareto 解集; 并采用偏小型模糊集决策理论构建模糊隶属度函数, 通过计算函数值衡量解的满意度, 最后选取满意度最高的解作为最优折中解^[22]。隶属度函数为

$$\varphi_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq f_{\min,i} \\ \frac{f_{\max,i} - f_i}{f_i - f_{\min,i}}, & f_{\min,i} < f_i < f_{\max,i} \\ 0, & f_i \geq f_{\max,i} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $f_{\max,i}, f_{\min,i}$ 分别为第 i 个目标的最大、最小值; f_i 为目标函数值, 满意程度评价如下:

$$\varphi^k = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i^k}{\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \varphi_i^k} \quad (21)$$

式中, φ^k 为第 k 个解的满意度; N 为最优解的个数; m 为目标函数个数。

第 2 阶段 基于第 1 阶段求解结果确定储能出力及租赁容量, 并代入第 2 阶段。鉴于 ADN、LA 和 SESA 各主体有不同利益诉求, 其目标函数无法同时达到最优, 且所优化目标个数较多, 若采用依靠拥挤距离和拥挤度进行选择的 NSGA-II 算法易陷入局部最优, 且种群多样性不能得到保证, 因此, 采用基于参考点机制维持高维目标下种群多样性的

NSGA-III 算法进行求解^[23]。最后,基于式(20)、(21)采用隶属度评价确定最优折中解,得到各主体出力情况及运行收益。

4 算例分析

4.1 算例说明

如图 5 所示,本文选取 IEEE 33 节点配电网系统为例,基于 MATLAB R2021b 平台进行仿真实验。PV 装机总容量为 2.42 MV·A,SES 总容量为 1.8 MV·A,储能的充、放电效率 η_{ch} 、 η_{dis} 均取 0.95,具体参数如表 1 所示,且本文光伏出力被完全消纳,无弃光现象。可平移负荷的最大可转出功率为负荷的 0.2 倍,可中断系数 ζ_{IL} 取 0.2,一天允许中断的次数为 2 次,允许中断的持续时间上限和 2 次负荷中断的最小时间间隔均为 2 h。算法参数设置:种群规模为 100,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,NSGA-II、NSGA-III 算法进化代数分别为 200、300。基于平台仿真计算,NSGA-II、NSGA-III 算法平均单次进化时间分别约为 1.8、2.5 s。本文调度周期取 24 h,单位时间为 1 h,ADN 的光伏出力、负荷曲线及电价如图 6 所示。

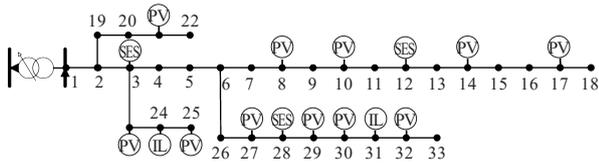


图 5 IEEE 33 节点配电网结构

Figure 5 Distribution network structure of IEEE 33 bus

表 1 PV 及 SES 参数

Table 1 Parameters of PV and SES

PV 接入节点	最大有功/kW	SES 接入节点	容量/(kV·A)
10、17、27	100	3	500
14、21、23、29	200	12	700
8、25、30、32	300	28	600

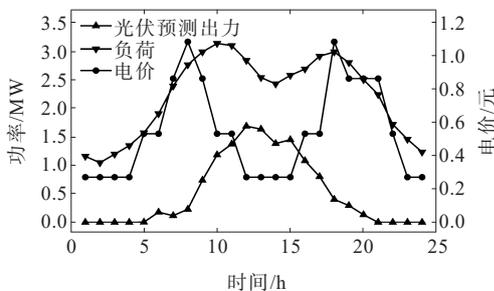


图 6 光伏出力、负荷曲线及电价

Figure 6 Curves of PV output, load and electricity price

4.2 第 1 阶段储能租赁容量优化结果分析

SESA 可以制定不同的单位功率容量租赁价格 α 和能量容量租赁价格 β ,因此,本文设置 2 组算例进行对比,分析 SESA 不同定价策略下 ADN 储能租赁容量大小及削峰填谷效益。定价策略 1: $\alpha=0.54$ 元/kW, $\beta=0.20$ 元/(kW·h), $\gamma=0.27$ 元/kW;定价策略 2: $\alpha=0.62$ 元/kW, $\beta=0.31$ 元/(kW·h), $\gamma=0.27$ 元/kW(以下简称策略 1、2)。

策略 1 的 pareto 解集如图 7 所示,可以看出,租赁成本和净负荷方差无法同时达到最优。对 2 种策略的 pareto 解集进行满意度评价并选出最优折中解,折中解的净负荷曲线如图 8 所示,00:00—05:00 时策略 2“填谷”效果略好于策略 1,而在后续的时间段中,策略 1 更有效地降低了净负荷的峰谷差,即“削峰填谷”效果更好。折中解的储能租赁情况对比如表 2 所示。

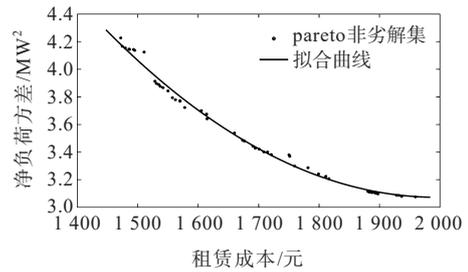


图 7 策略 1 非劣解集

Figure 7 Non-inferior solution set of strategy 1

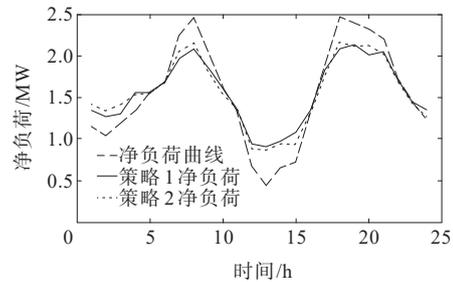


图 8 折中解净负荷曲线

Figure 8 Compromise net load curves

表 2 折中解储能租赁情况

Table 2 Compromise energy storage leases

策略	ADN 租赁费用/元	SESA 租赁收益/元	剩余总容量/(kV·A)	净负荷方差/MW ²
1	1 696.51	504.25	104	3.428 5
2	1 779.39	641.20	228	3.920 3

由表 2 可以发现,虽然策略 1 的租赁价格更低,ADN 租赁了更多的储能,但对于 SESA 而言,租赁收益还是比策略 2 低 136.95 元;而策略 2 的租赁价

格较高,导致ADN租赁的储能少于策略1,用于平抑净负荷波动的储能容量小,故净负荷方差比策略1大 0.4918 MW^2 。

综上,SESA可以在储能容量、预估调峰收益等多方面综合考虑,制定合理的租赁价格。而对于每一种定价,ADN可以根据负荷及新能源出力预测数据,在租赁成本和调峰效益之间进行权衡,按需租赁储能以获得理想的调峰效果。

4.3 第2阶段多主体协同优化结果分析

为了分析不同定价策略下各主体的收益以及削峰填谷效果,本文设置3种方案进行对比。

方案1 ADN按定价策略1租赁储能,SESA在此基础上依据分时电价利用剩余容量进行“低储高放”套利,同时考虑LA的可中断和可平移负荷,在市场环境下以ADN成本最低、SESA套利最多以及LA运行收益最高为目标。

方案2 ADN按定价策略2租赁储能,其余同方案1。

方案3 ADN不租赁储能,SESA仅根据分时电价套利,其余同方案1。

方案1、2套利前/后的储能出力和ADN的净负荷对比分别如图9、10所示,各方案运行情况对比如表3所示。

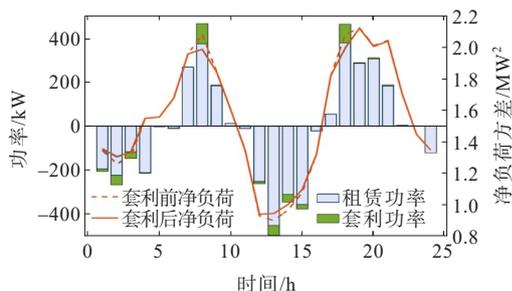


图9 方案1套利前/后的储能出力和ADN的净负荷
Figure 9 Energy storage output and net load of ADN before and after arbitrage in scheme 1

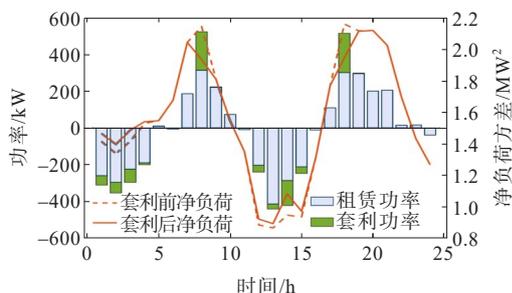


图10 方案2套利前/后的储能出力和ADN的净负荷
Figure 10 Energy storage output and net load of ADN before and after arbitrage in scheme 2

表3 各方案运行成本及收益

Table 3 Operating costs and benefits of each scheme

方案	ADN成本/ 元	LA收益/ 元	SESA总 收益/元	净负荷方差/ MW^2
1	24 241.91	257.28	543.04	3.073 7
2	24 596.30	484.16	756.39	3.175 5
3	21 509.36	496.06	576.54	4.905 3

结合表2可知,2个方案分别利用租赁储能后的剩余容量 $104、228\text{ kV}\cdot\text{A}$ 进行“低储高放”套利。这是由于方案1储能租赁价格低于方案2,故第1阶段ADN租赁更多的储能用于平抑净负荷波动,SESA所剩套利容量小于方案2。结合表3可知,方案1套利 38.80 元,净负荷方差相比套利前降低 0.3548 MW^2 ;而方案2剩余更多容量,第2阶段响应调峰的效益更好,套利 115.20 元,净负荷方差相比套利前降低 0.7448 MW^2 。经过剩余容量套利,储能设备得到充分利用,但由于租赁价格不同导致储能容量使用方式不同,方案1更多容量用于调峰,更少容量用于套利,从整体上看方案1比方案2的净负荷方差小 0.1018 MW^2 、SESA收益少 213.35 元。可以看出,当租赁价格较低时,SESA总体收益较低,但调峰效果更好。

方案2、3中各主体出力如图11所示,可以发现由于补偿费用较高,2种方案中的可中断负荷仅在电价较高时响应调峰,而可平移负荷主要是将电价较高时的负荷平移到电价较低时段,且二者响应量都较小,在市场环境下起到了促进ADN调峰的作用。而方案3中SESA仅考虑自身利益,采用“自私”的运营策略,只在尖峰电价时段放电,虽然降低了尖峰负荷,但却没有考虑对净负荷平衡带来的影响,净负荷方差较大,为 4.9053 MW^2 。对比之下,方案2中ADN租赁的储能不仅在尖峰时段放电,还在高峰时段放电,且由于容量约束限制了其在尖峰时段的套利功率,使得净负荷更加平滑,净负荷方差比方案3小 1.7298 MW^2 。

结合表3可以看出,方案1由于有足够的租赁储能容量应对净负荷波动,减少了补偿费用较高的可中断和可平移负荷响应量,所以LA收益相较于方案2、3更低。在方案1、2中SESA出租了储能,极大地促进了配网调峰,考虑租赁储能带来的收益总盈利分别为 $543.04、756.39$ 元;与仅依靠套利盈利 576.54 元的方案3相比,共享储能使得SESA可以根据自己的盈利偏好设定租赁价格,保障自身运行

效益的同时还能有效缓解主网调峰压力,促进新能源消纳。

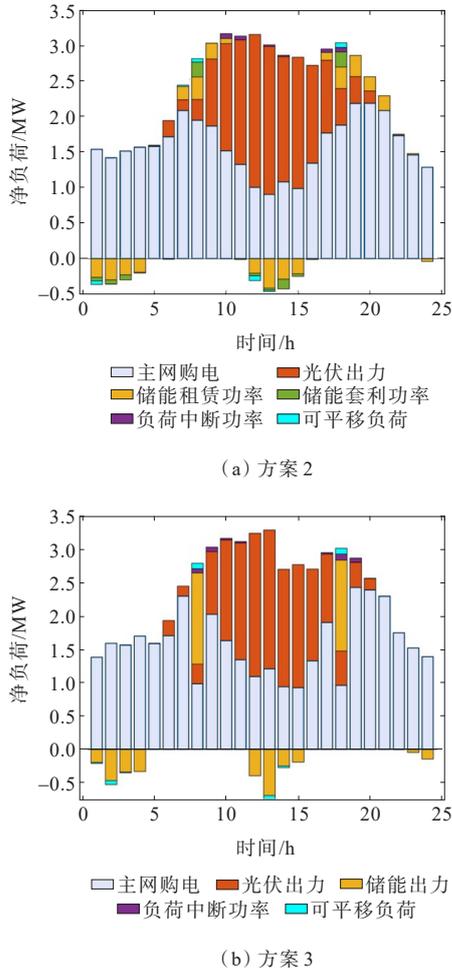


图11 方案2、3中各主体出力

Figure 11 Output power of each agent in scheme 2 and 3

5 结语

本文针对配网侧储能商运营模式单一、利用率低的问题,同时为了缓解配电网的调峰压力,提出一种考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略,算例分析表明:

1) SESA可以根据盈利偏好合理制定租赁价格,这将影响储能租赁容量、SESA总收益及ADN的调峰效益;

2) 储能自营共享模式减少了储能的闲置容量,有效提高储能利用率,促进储能与新能源产业的协同发展;

3) 通过NSGA-III算法进行多目标优化,在市场环境下兼顾了ADN、SESA及LA的利益诉求,实现了配电网多主体的利益均衡;

4) ADN通过租赁储能并联合用户侧可调节负

荷,能够从配网侧有效调峰,缓解主网调峰压力。

参考文献:

- [1] LI P, DARGAVILLE R, CAO Y, et al. Storage aided system property enhancing and hybrid robust smoothing for large-scale PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2871-2879.
- [2] 李焱宁, 李相俊, 汪湘晋, 等. 离网型风储荷系统建模与动态组网协调控制方法研究[J]. 供用电, 2022, 39(7): 17-24.
- [3] LI Hanning, LI Xiangjun, WANG Xiangjin, et al. Research on modeling and dynamic networking coordinated control method of offgrid wind storage load systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 17-24.
- [4] HU M, XIAO J, CUI S, et al. Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 233-245.
- [5] 杨江涛, 刘佳, 孙春顺, 等. 计及分布式电源的配电网储能配置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 108-114.
- [6] YANG Jiangtao, LIU Jia, SUN Chunshun, et al. Research on the configuration of energy storage in the distribution network counting and distributed power sources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 108-114.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] DAI R, ESMAEILBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3163-3174.
- [10] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.
- [11] 郝艺博, 杜锡力, 李笑竹, 等. 考虑储能性能差异的新能源场站群共享储能交易模式[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 687-697.
- [12] HAO Yibo, DU Xili, LI Xiaozhu, et al. Shared energy storage trading mode of new energy station group considering energy storage performance difference[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 687-697.
- [13] 闫东翔, 陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.

- YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 178-191.
- [10] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371+3663.
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371+3663.
- [11] 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): 2-8+16.
KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8+16.
- [12] 麻秀范, 孟祥玉, 朱秋萍, 等. 计及通信负载的5G基站储能调控策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2878-2887.
MA Xiufan, MENG Xiangyu, ZHU Qiuping, et al. Control strategy of 5g base station energy storage considering communication load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2878-2887.
- [13] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标新型储能发展潜力及路径研究[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17-25.
- [14] 李咸善, 解仕杰, 方子健, 等. 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, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51.
- [15] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6611-6625.
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.
- [16] 李淋, 徐青山, 王晓晴, 等. 基于共享储能电站的工业用户日前优化经济调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 100-107.
LI Lin, XU Qingshan, WANG Xiaoqing, et al. Optimal economic scheduling of industrial customers on the basis of sharing energy-storage station[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 100-107.
- [17] LONGBO M, SHUAI T, SHU L, et al. Operation characteristics and key technology analysis of high-penetration renewable energy microgrid[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 657(1): 012068.
- [18] 张超, 贾长杰, 何文俊, 等. 基于共享聚合相变储能系统的区域联合削峰填谷策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5): 25-34.
ZHANG Chao, JIA Changjie, HE Wenjun, et al. Regional-joint peak-load shifting strategy based on the aggregated systems of sharing phase change material energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 25-34.
- [19] 吴倩, 王洋, 王琳媛, 等. 计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 112-119.
WU Qian, WANG Yang, WANG Linyuan, et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system in wind-solar-battery system considering fluctuation smoothing and economy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 112-119.
- [20] 唐成虹, 董存, 戴睿鹏, 等. 基于模型预测控制的光伏场站快速协同无功电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 80-90.
TANG Chenghong, DONG Cun, DAI Ruipeng, et al. Fast cooperative reactive voltage control for photovoltaic stations based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 80-90.
- [21] 叶耀, 龚锦霞, 李琛舟, 等. 一种考虑分布式电源的配电自动化系统规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 109-115.
YE Yao, GONG Jinxia, LI Chenzhou, et al. A planning method for distribution automation system considering distributed generation[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 109-115.
- [22] 张冲, 荣娜. 基于改进粒子群算法的新能源侧储能容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 98-105.
ZHANG Chong, RONG Na. Energy storage capacity allocation of renewable energy side based on improved particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 98-105.
- [23] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 602-622.