

市场环境下考虑全周期经济效益的工业园区共享储能优化配置

王亚武¹, 黄淳驿¹, 王承民¹, 李康平², 房鑫炎¹, 严干贵³

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 上海交通大学智慧能源创新学院, 上海市 200240;
3. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012)

摘要: 为提升用户侧储能运行效率、改善投资成效,提出一种在市场环境下考虑全周期经济效益的工业园区共享储能(SES)优化配置方法。一方面,通过协调不同用户间的差异化调节需求,减少储能容量要求;另一方面,通过整合用户与SES的灵活调节能力,参与需求响应市场拓宽盈利渠道,并且考虑了SES全运行周期经济效益测算以降低投资风险。首先,结合电力市场交易规则,提出了多工业用户组建合作联盟的园区SES运营模式。其次,以运营周期内联盟总成本最小为目标,建立SES双层优化配置模型,其中,上层模型旨在形成最大化投资成效的SES规划方案,而下层模型则综合考虑分时电价、需求响应违约风险等因素形成储能的最优投标调度方式,并结合市场时序演变规律精准量化SES在全运行周期内的运营收益,对上层结果进行修正。接着,利用近似KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件将该模型转化为单层模型进行求解,结合雨流计数法与迭代法量化SES容量衰减对其配置方案的影响,并利用双边Shapley值法分摊各工业用户的投资成本。最后,算例仿真验证了所提方法的有效性,并且分析了储能盈利模式、SES容量衰减以及需求响应违约风险等因素对SES投资经济效益的影响。

关键词: 电力市场; 时序演变; 工业园区; 共享储能; 需求响应; 优化配置; 双层模型

0 引言

近年来,随着储能技术的不断发展,以电化学储能为代表的用户侧储能在工业用户间得到广泛应用^[1-2]。为确保电力供应的可靠性与经济性,大工业用户多利用储能充当应急保障电源或动态增容设备^[3];此外,其还可在分时电价模式下进行价格套利^[4],从而提升经济效益。然而,高昂的建设成本^[5]与单一的盈利渠道^[6]仍对储能利用设置了较高门槛,使得具备调节需求但调度能力较弱的中小型工业用户难以参与到储能运营中,制约着用户侧储能的推广应用。考虑到各用户的调节需求存在显著差异,若能打破物权合一思想设计面向多个用户的终端共享储能(shared energy storage, SES)电站模式,则有望通过分时分散复用机制节省储能投资运营成本。为此,本文主要针对工业园区SES电站优化配置问题开展研究。

目前,已有部分国内外学者对可行的用户侧

SES商业模式进行探讨,如文献[7]研究了若干工业用户与邻近独立SES电站的联盟模式,并且通过算例验证了该模式下各主体效益均能得到有效提升。当园区附近未建SES电站时,众多用户也可通过共同投资运营SES电站获利,如文献[8]针对若干工业用户合作投资运行SES模式下SES电站的优化配置问题展开研究,并且考虑了SES运行策略对所在配电网潮流的动态影响。总体而言,现有SES优化配置研究多侧重于协调多用户调节需求以确定最适宜的储能配置方案和成本分摊方式,鲜少针对电力市场环境下SES的其他盈利渠道与投资成效作进一步探讨。

此外,SES的经济效益测算是影响其规划投资的核心问题。除了利用SES节约用户用电成本外,若能整合工业用户与SES的灵活调节能力到电力辅助服务交易中,将进一步发挥二者的互补调节潜能、改善投资成效。补贴价格较高的需求响应(demand response, DR)市场的出现为上述需求侧资源有序参与电网运行调节提供了可能^[9]。在配置SES后,各工业用户通过组成合作联盟可达到DR市场的准入门槛,通过提供DR服务获取高额的需求响应补贴。因此,可对SES模式下工业用户联盟合作共享的经济效益进行分析。

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-10-28。

上网日期: 2024-02-23。

现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室开放课题(MPSS2023-10)。

精准测算 SES 模式下联盟合作共享的经济效益既需要从长时间尺度分析市场规则演变等因素对经济效益的影响,也需要对短时间尺度内联盟提供 DR 服务的履约特性进行量化。对于前者而言,除了需要考虑运行周期内的 DR 市场开启频次、补贴价格等政策变化外,还需要针对影响套利收益的分时电价峰谷价差以及源荷的变化特性进行重点分析^[10-11]。然而,现有研究仅针对典型运行场景下的 SES 运营收益进行量化^[12-14],并未从宏观层面上结合市场政策、峰谷价差等因素的演化特性。对于后者而言,由用户源荷以及行为不确定性所引发的 DR 交易违约风险是影响 DR 收益的重要因素之一^[15]。文献[16]在研究 DR 市场投标决策问题时,未考虑 DR 交易违约风险的存在,导致 DR 收益的测算结果偏高,进而影响着投标策略的制定。因此,有必要在测算 SES 经济效益的过程中考虑市场规则等多种因素的演化特性以及 DR 交易违约风险的影响,以实现 SES 经济效益的精准测算。

为解决用户侧 SES 收益渠道单一、经济效益测算时未考虑重要因素的演化特性及 DR 交易违约风险等问题,本文首先结合现有电力市场规则,设计基于多用户合作的工业园区 SES 运营模式,提出 SES 在不同应用场景下的运行原则;接着,基于 SES 规划与运行的强耦合性构建 SES 双层优化配置模型,并且考虑市场规则等多种因素的演化特性以及 DR 交易违约风险对 SES 经济效益的影响;最后,通过算例仿真验证所提方法的有效性,并且分析盈利模式、SES 容量衰减以及 DR 违约风险等因素对 SES 经济效益的影响。

1 基于多用户合作的园区 SES 运营模式

现有的园区 SES 运营模式多侧重于协调多用户的调节需求以减少用户用电成本。为提升 SES 的利用效率与经济效益,本文在现有运营模式的基础上考虑配置 SES 的工业用户联盟参与 DR 市场获取额外收益,提出了如图 1 所示的园区 SES 运营模式。其中,工业用户均为采用两部制电价的专用变压器(下文简称专变)用户,SES 电站与各用户的专变低压侧之间通过馈线连接。

根据用户的日负荷水平,可将 SES 的应用场景分为高峰负荷场景(以下简称高峰场景)与一般负荷场景(以下简称一般场景)。高峰场景下,用户较高的尖峰负荷直接影响着用户的月度需量电费以及专

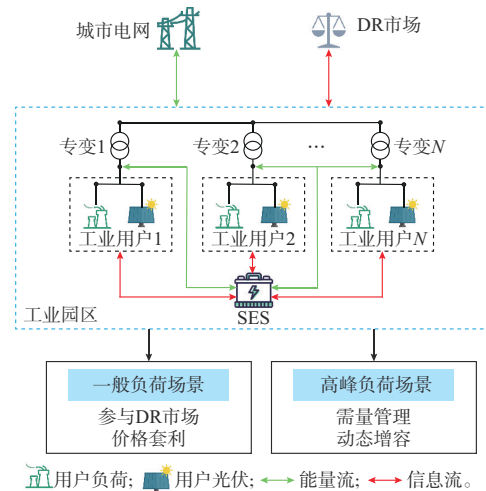


图 1 基于多用户合作的园区 SES 运营模式
Fig. 1 Operation mode of park SES based on multi-user cooperation

变扩建需求,此时,SES 主要通过需量管理与动态增容降低用户成本。一般场景下,SES 一方面可以在 DR 市场开启时配合用户联盟参与其中,获取响应补贴,另一方面也可以通过低储高发实现峰谷套利。

在此基础上,本文对所提模式在不同条件下的适用性进行了分析,从而为后文在此模式下研究储能的优化配置问题提供理论依据。具体分析过程见附录 A,从中可以得出如下主要结论:

1) 在不同的用户负荷特性、峰谷电价以及 DR 补贴价格下,本文所提模式的经济性均高于现有模式,具有广泛的适用性。

2) 峰谷价差、DR 补贴价格等在储能运行周期内动态变化的参数影响着储能的经济效益。因此,在研究储能的优化配置问题时必须计及参数的动态变化,将市场在储能全运行周期内的时序演变情况考虑在内。

2 考虑市场时序演变的园区 SES 规划框架

2.1 双层模型框架

本文针对所提出的园区 SES 运营模式,构建考虑全周期运行调度过程^[17-18]的园区 SES 优化配置决策框架,如图 2 所示。上层模型根据用户调节需求形成 SES 初始配置方案,并将该方案传递给下层模型;下层模型则对该方案在全运行周期内的经济效益进行测算,并将联盟年运营成本传递给上层模型以修正规划结果,上下层模型既独立求解又相互制约。

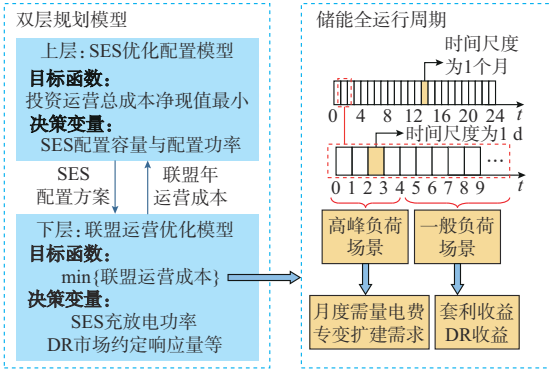


图2 双层模型框架
Fig. 2 Bi-level model framework

2.2 主客观不确定性建模

为刻画全运行周期内的SES应用场景,需要结合主客观不确定性进行分析^[19]。其中,客观不确定性需要从多个时间尺度进行区分:一方面,考虑到用户的储能调节需求与自身的源荷增长特性有关,需要从长时间尺度分析其变化趋势;另一方面,DR市场交易收益与用户日前投标策略和日内实际响应程度有关,后者的不确定性将增大交易风险、影响交易收益,需要从短时间尺度分析源荷的波动程度。与之相对的,主观不确定性是用户通过协调用电满意度与购电成本对自身用电行为进行主动调节的体现。本文主要通过场景法及可转移负荷建模对主客观不确定性进行处理,具体的建模过程以及笔者与审稿专家间关于不确定性建模方法的讨论分别见附录B与附录C。

2.3 市场时序演变情况分析

目前,中国的DR市场主要针对需求侧主体开放,虽制定了可观的补贴价格,但较低的开启频次使得需求侧资源的调节能力未得到充分利用;调峰辅助服务市场主要针对具有较强调节能力的电源型主体开放,虽允许需求侧主体参与,但较低的补贴价格使得需求侧主体的参与意愿较低。结合两类市场的不平衡现状以及国家发展和改革委员会所提出的“逐步将需求响应作为电网经济运行常态化调节措施”^[9],本文预测DR服务将会被逐步纳入调峰辅助服务市场之中,且其开展频次远高于目前DR市场的开启频次,以充分发挥需求侧资源的调节能力,而补贴价格则在目前的DR补贴价格与调峰补偿价格之间。本文的后续研究均站在未来的时间节点,建立在此假设的基础之上。

此外,分时电价的峰谷价差影响着SES的套利收益,必须考虑到长时间尺度内峰谷价差的变化情况。2021年4月,国家能源局发布的有关文件^[20]提

出,要进一步拉大峰谷价差,为用户创造更大的效益空间,故从短期的角度看,峰谷价差将呈逐渐拉大的趋势。但从长期的角度看,随着储能规模的增加,一系列削峰填谷的措施逐渐生效,电网的峰谷差将逐渐得到控制,峰谷价差最终必然呈逐渐减小的趋势。

3 SES双层优化配置模型

3.1 上层SES优化配置模型

3.1.1 上层SES优化配置模型的目标函数

上层模型旨在以最小化SES投资运营总成本净现值为目标,确定SES的配置容量 E_{norm} 与最大充放电功率 P_{norm} 。其中,总成本包括SES投资运维成本 C^{est} 、运行周期内的用户 i 购电成本 C_i^{ope} 、用户 i 专变减少扩建收益 C_i^{trans} 以及用户联盟参与DR市场的交易收益 C^{DR} 等4个部分,具体见式(1)。

$$\min \left\{ C^{\text{est}} + \sum_{i=1}^N (C_i^{\text{ope}} - C_i^{\text{trans}}) - C^{\text{DR}} \right\} \quad (1)$$

式中: N 为用户联盟中的用户数。

SES的投资运维成本 C^{est} 可用式(2)表示。

$$\begin{cases} C^{\text{est}} = E_{\text{norm}} c_{\text{cap}} + \sum_{k=1}^Y \beta_k E_{\text{norm}} c_{\text{o\&e.m}} \\ \beta_k = \frac{1}{(1 + \alpha)^k} \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_{cap} 与 $c_{\text{o\&e.m}}$ 分别为SES单位容量的投资成本与年运维成本; Y 为SES的运行年限; β_k 为将第 k 年资金折算为现值的现值化系数; α 为贴现率。

3.1.2 上层SES优化配置模型的约束条件

SES需要具备一定的连续充放电能力,本文参考现有的储能电站工程^[21]及各省电力辅助服务市场所规定的储能准入门槛^[22-23],按照SES具有连续2h充放电能力进行配置,具体约束如式(3)所示。

$$\begin{cases} E_{\text{norm}} \geq 0 \\ P_{\text{norm}} \geq 0 \\ E_{\text{norm}} = 2P_{\text{norm}} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 下层联盟运营优化模型

3.2.1 下层联盟运营优化模型的目标函数

下层模型的决策变量为用户 i 的购售电功率($P_{i,k,t,w}^{\text{b}}$ 与 $P_{i,k,t,w}^{\text{s}}$),SES充放电功率($P_{i,k,t,w}^{\text{c}}$ 与 $P_{i,k,t,w}^{\text{d}}$),用户联盟的DR约定响应量($P_{k,j}^{\text{bid}}$)以及用户负荷转移量($\Delta L_{i,k,t,w}$)。目标函数为最小化联盟运营成本,即

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N (C_i^{\text{ope}} - C_i^{\text{trans}}) - C^{\text{DR}} \right\} \quad (4)$$

1)工业用户一般采用两部制电价,即每个月的

购电成本既包括与实际用电量有关的基本电费,也包括与月最高负荷有关的需量电费。因此,用户 i 的购电成本 C_i^{ope} 可用式(5)表示。

$$\begin{cases} C_i^{\text{ope}} = \sum_{k=1}^Y \beta_k [365E_w(C_{i,k,w}^{\text{day,ope}}) + 12\lambda^{\text{cap}} \max_{t,w} (P_{i,k,t,w}^{\text{b}})] \\ C_{i,k,w}^{\text{day,ope}} = \sum_{t=1}^{24} (\lambda_{k,t}^{\text{b}} P_{i,k,t,w}^{\text{b}} \Delta t - \lambda^{\text{s}} P_{i,k,t,w}^{\text{s}} \Delta t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_w(\cdot)$ 表示各场景下的期望值; $C_{i,k,w}^{\text{day,ope}}$ 为用户 i 第 k 年场景 w 下的日购电成本; λ^{cap} 为需量电价; $\lambda_{k,t}^{\text{b}}$ 和 λ^{s} 分别为第 k 年 t 时刻的购电价格与上网电价; $P_{i,k,t,w}^{\text{b}}$ 和 $P_{i,k,t,w}^{\text{s}}$ 分别为用户 i 第 k 年场景 w 下 t 时刻的购售电功率; Δt 为时间间隔。

2) 用户 i 节省的专变扩建成本 C_i^{trans} 与其全周期内最大负荷的减少量有关,可用式(6)表示。

$$C_i^{\text{trans}} = c_{\text{trans}} \frac{P_i^{\text{peak0}} - \max_{k,t,w} (P_{i,k,t,w}^{\text{b}})}{\cos \varphi} \quad (6)$$

式中: c_{trans} 为专变单位容量的扩建成本; P_i^{peak0} 为配置 SES 前用户 i 的最大负荷; φ 为功率因数角。

3) DR 市场交易收益 C^{DR} 与日前确定的约定响应量以及日内的实际响应量有关,根据实际响应量的大小,用户联盟最高可获得 1.2 倍约定响应量所对应的收益,具体见式(7)一式(9)。

$$C^{\text{DR}} = \sum_{k=1}^Y \sum_{j=1}^2 \beta_k d_1 E_{w1}(C_{k,w,j}^{\text{DR}}) \quad (7)$$

$$C_{k,w,j}^{\text{DR}} = \begin{cases} 1.2\lambda_k^{\text{DR}} P_{k,j}^{\text{bid}} & P_{k,w,j}^{\text{response}} > 1.2P_{k,j}^{\text{bid}} \\ \lambda_k^{\text{DR}} P_{k,w,j}^{\text{response}} & 0.6P_{k,j}^{\text{bid}} \leq P_{k,w,j}^{\text{response}} \leq 1.2P_{k,j}^{\text{bid}} \\ 0 & P_{k,w,j}^{\text{response}} < 0.6P_{k,j}^{\text{bid}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{k,w,j}^{\text{response}} = \frac{P_{k,t_j}^{\text{Baseline}} + P_{k,t_j+1}^{\text{Baseline}}}{2} - \frac{P_{k,t_j,w}^{\text{b}} + P_{k,t_j+1,w}^{\text{b}}}{2} \\ P_{k,t_j}^{\text{Baseline}} = \sum_{i=1}^N P_{i,k,t_j}^{\text{Baseline}} \\ P_{k,t_j,w}^{\text{b}} = \sum_{i=1}^N P_{i,k,t_j,w}^{\text{b}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_1 为 DR 市场开启的天数; $E_{w1}(\cdot)$ 表示 DR 市场开启时一般场景下的期望值; $C_{k,w,j}^{\text{DR}}$ 与 $P_{k,w,j}^{\text{response}}$ 分别表示第 k 年场景 w 下第 j 次 DR 的收益及实际响应量,DR 市场在开启日中开展 2 次,每次持续 2 h,开启时间分别为 09:00 和 15:00; λ_k^{DR} 为第 k 年的 DR 补贴价格; $P_{k,j}^{\text{bid}}$ 为第 k 年第 j 次 DR 的约定响应量; $P_{i,k,t_j}^{\text{Baseline}}$ 与 $P_{k,t_j}^{\text{Baseline}}$ 分别为第 k 年 t_j 时刻用户 i 以及用户联盟的基线负荷。

3.2.2 下层联盟运营优化模型的约束条件

用户联盟在 SES 全运行周期中的调度决策需要考虑储能运行约束、功率平衡约束、DR 投标约束

以及负荷转移限制等约束条件。

1) 储能运行约束

储能需要符合安全运行条件,并且满足功率约束和荷电状态约束,如式(10)一式(12)所示。

$$E_{k,t+1,w} = E_{k,t,w} + P_{k,t,w}^{\text{c}} \eta_{\text{c}} \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{d}}} P_{k,t,w}^{\text{d}} \Delta t \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{k,t,w}^{\text{c}} = \sum_{i=1}^N P_{i,k,t,w}^{\text{c}} \\ P_{k,t,w}^{\text{d}} = \sum_{i=1}^N P_{i,k,t,w}^{\text{d}} \\ 0 \leq P_{i,k,t,w}^{\text{c}} \leq P_k^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{i,k,t,w}^{\text{d}} \leq P_k^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{k,t,w}^{\text{c}} \leq u_{k,t,w} P_k^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{k,t,w}^{\text{d}} \leq (1 - u_{k,t,w}) P_k^{\text{max}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{k,24,w} = (1 - D) E_{\text{norm}} \\ E_k^{\text{max}} (1 - D) \leq E_{k,t,w} \leq E_k^{\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E_{k,t,w}$ 为第 k 年场景 w 下 t 时刻 SES 的存储能量; η_{c} 和 η_{d} 分别为 SES 的充、放电效率; $P_{i,k,t,w}^{\text{c}}$ 和 $P_{i,k,t,w}^{\text{d}}$ 分别为用户 i 第 k 年场景 w 下 t 时刻与 SES 间的充、放电功率; $u_{k,t,w}$ 为表示 SES 充放电状态的 0-1 变量; D 为 SES 的最大放电深度; P_k^{max} 与 E_k^{max} 分别为第 k 年 SES 的最大功率与最大容量,与 SES 的健康状态有关,可通过式(13)求得。

$$E_k^{\text{max}} = \begin{cases} E_{\text{norm}} H_k \\ 2P_k^{\text{max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: H_k 为基于雨流计数法^[24]离线式求得的第 k 年 SES 的健康状态系数,在本模型中为输入的参数。

2) 功率平衡约束

各用户的功率平衡约束如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{i,k,t,w}^{\text{b}} + P_{i,k,t,w}^{\text{d}} - P_{i,k,t,w}^{\text{s}} - P_{i,k,t,w}^{\text{c}} = \\ L_{i,k,t,w0} + \Delta L_{i,k,t,w} - P_{i,k,t,w}^{\text{pv}} \\ P_{i,k,t,w}^{\text{b}} \geq 0 \\ P_{i,k,t,w}^{\text{s}} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $L_{i,k,t,w0}$ 、 $P_{i,k,t,w}^{\text{pv}}$ 、 $\Delta L_{i,k,t,w}$ 分别为用户 i 第 k 年场景 w 下 t 时刻的原始用电负荷、光伏发电功率与负荷转移量。

3) DR 约束

根据《江苏省电力需求响应实施细则(修订征求意见稿)》^[25],工业用户的 DR 约定响应量一般不高于其最高用电负荷的 20%。但考虑到用户联盟配有集中式储能电站,具有可靠的 DR 调节能力,故认为 DR 约定响应量的上限为 20% 的联盟最高用电负荷与 SES 最大充放电功率之和,具体约束如式(15)所示。

$$0 \leq P_{k,j}^{\text{bid}} \leq 20\% \max_{t,w} \left(\sum_{i=1}^N (L_{i,k,t,w0} - P_{i,k,t,w}^{\text{pv}}) \right) + P_k^{\text{max}} \quad (15)$$

此外,若实际响应量小于60%的约定响应量,则用户可能会因违约而降低信用等级甚至被禁止参与DR市场。因此,本文限制实际响应量应不小于60%约定响应量,具体约束如式(16)所示。

$$P_{k,w,j}^{\text{response}} \geq 0.6P_{k,j}^{\text{bid}} \quad (16)$$

4) 负荷转移约束

用户在进行负荷转移时需要保证日负荷总量保持不变,并且各时刻负荷的最大转移量受到原始用电负荷的限制,如式(17)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} \Delta L_{i,k,t,w} = 0 \\ -\varepsilon L_{i,k,t,w0} \leq \Delta L_{i,k,t,w} \leq \varepsilon L_{i,k,t,w0} \end{cases} \quad (17)$$

式中: ε 为负荷最大转移系数。

3.3 基于双边 Shapley 值法的用户成本分摊模型

联盟合作能否顺利进行的关键在于利益分配是否公平^[26]。Shapley 值法^[27]是合作博弈模型中常用的成本分摊方法,然而常规 Shapley 值法的计算时长与参与者数目的阶乘量级相关,为避免用户数较多招致维数灾问题,本文采用双边 Shapley 值^[28]法进行成本分摊。双边 Shapley 值法在对用户*i*进行成本划分时,仅将总联盟*M*的参与者划分为{*i*}和{*M**i*}两个主体,通过牺牲一定的精度来降低计算复杂程度,其具体计算过程见附录D。

4 模型求解

4.1 双层规划模型的求解

本文所提出的 SES 优化配置模型属于下层含有非线性项(对其进行线性化处理时会引入整数变量)的双层模型,既难以直接求解,又无法通过 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件转化为单层问题。因此,本文基于强对偶松弛理论,在松弛下层问题中的整数性条件后求得下层问题的近似 KKT 条件,将双层模型转化为单层模型,并在转化后的单层模型中对整数的离散性进行了恢复^[29],转化后得到的单层模型如附录E第E1章和第E2章所示。对于其中两个连续型变量相乘所产生的非线性项,本文将其中之一进行离散化处理,再通过大*M*法转化为线性约束(笔者与审稿专家间关于*M*取值的讨论见附录C),具体过程如附录E第E3章所示。最终得到的单层模型属于混合整数线性规划问题,可以调用商业求解器 Gurobi 进行求解。

4.2 考虑储能容量衰减的迭代式求解框架

SES 的容量衰减是一个非线性的过程,较难内嵌到优化模型之中。因此,参考文献[30]进行迭代计算,在每次的迭代过程中通过式(18)离线式计算 SES 的健康状态系数 H_k ,求解流程如图3所示(图中 n 为迭代次数),其中,笔者与审稿专家、仲裁专家间关于算法收敛性与最优性的讨论见附录C。

$$H_k = 1 + An_k + Bn_k^2 + Cn_k^3 \quad (18)$$

式中: A 、 B 、 C 为与 SES 放电深度 D 有关的参数; n_k 为一定的放电深度 D 下 SES 的循环次数。

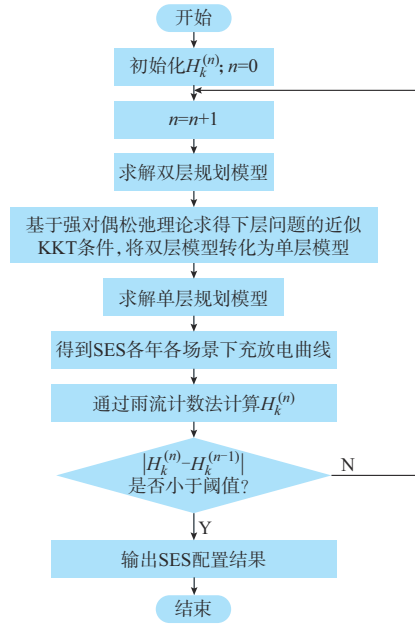


图3 考虑容量衰减的迭代式求解流程图
Fig. 3 Flow chart of iterative solution considering capacity decay

5 算例分析

为验证所提方法的有效性,本文基于中国浙江某工业园区内4个中小型工业用户的真实负荷数据进行仿真实验,各用户的最大用电负荷在1 MW左右且装有少量屋顶光伏。算例中所涉及的原始数据及分时电价、DR补贴价格等关键参数见附录F,其中部分储能相关参数参考文献[8]。

5.1 算例设计

为对所提方法进行全面分析,本文共设计了以下6个算例:

算例1:用户不配置储能,不参与DR市场。

算例2:用户单独配置储能但不参与DR市场。

算例3:用户共同投资SES但不参与DR市场。

算例4:用户共同投资SES且联合参与DR市场,即本文所提出的模式。

算例5:用户共同投资SES且联合参与DR市

场,但不考虑 SES 的容量衰减,SES 配置容量与算例 4 相同。

算例 6:用户共同投资 SES 且联合参与 DR 市场,但不考虑 DR 违约风险,SES 配置容量与算例 4 相同。

首先,通过对比算例 1~4 的结果,对不同盈利模式下的储能经济效益进行分析。然后,通过对比算例 4 和 5 的结果,分析 SES 容量衰减对其经济效益的影响,并以此说明在 SES 优化配置问题中考虑其容量衰减特性的必要性。最后,通过对比算例 4 和 6 的结果,分析 DR 违约风险对约定响应量制定策略以及 SES 经济效益的影响,并以此说明在本文所提模式中考虑 DR 违约风险的必要性。

5.2 不同盈利模式下的储能经济效益分析

不同盈利模式下的储能经济效益分析主要基于算例 1~4 的仿真结果,如表 1 所示。

表 1 不同盈利模式下 SES 配置结果及经济效益对比
Table 1 Comparison of SES configuration results and economic benefits with different profit modes

算例编号	SES 配置容量/(kW·h)	SES 投资运维成本/万元	用户基本电费/万元	用户需量电费/万元	专变减少扩建收益/万元	DR 市场收益/万元	总成本/万元
1	0	0	5 433	911	35	0	6 310
2	1 110	254	5 170	802	69	0	6 157
3	930	213	5 195	708	138	0	5 978
4	3 010	689	4 792	761	50	458	5 734

对比算例 1 与算例 2 可以看出,各用户单独配置储能后,仅通过储能进行套利、需量管理以及动态扩容,总成本节省 153 万元,经济性提升 2.42%。

对于算例 2,在一般负荷场景下,某些用户进行套利时仍有储能需求但受限于储能配置容量不足,而某些用户却因储能配置容量过剩而开始利用高峰电价“低储中发”套利;在某用户高峰负荷场景下,该用户只能利用自配储能削减峰值负荷,负荷削减量十分有限。在此基础上,算例 3 中的储能共享均衡了用户之间差异化的储能需求,在一般负荷场景下充分利用储能资源通过“低储高发”套利,在某用户高峰负荷场景下通过牺牲一天中部分套利收益削减该用户的需量电费,从而实现更高的经济效益。例如,在春季用户 1 高峰负荷场景下,储能共享能够使得用户 1 的峰值负荷在算例 2 的基础上下降 32 kW,节省了 1 280 元的需量电费,约等于储能两次充放的套利收益,有关算例 2 和 3 的更多仿真结果及算例分析如附录 G 所示。对比算例 2 与算例 3 可以看出,各用户组成合作联盟共同投资运营 SES 后,能够根据用户不同的储能调节需求实现 SES 的分时

复用,从而增加 SES 的经济效益,使得总成本节省 179 万元,经济性提升 2.91%。

对比算例 3 与算例 4 可以看出,考虑用户联盟参与 DR 市场后,由于 SES 的利用效率进一步提高,用户联盟倾向于配置更大容量的 SES,既可在 DR 市场开启时赚取高额的响应补贴,又可在其未开启时通过套利、需量管理等方式节省用电成本,最终可使得总成本节省 334 万元,经济性提升 5.50%。

为进一步分析本文所提出的多用户合作共享模式,根据算例 4 的仿真结果,得到如图 4 所示的各用户运行曲线。其中,净负荷代表用户向电网的购电功率;储能放电功率代表各用户与 SES 的交互功率,取值为正代表 SES 放电、为负代表对 SES 充电。

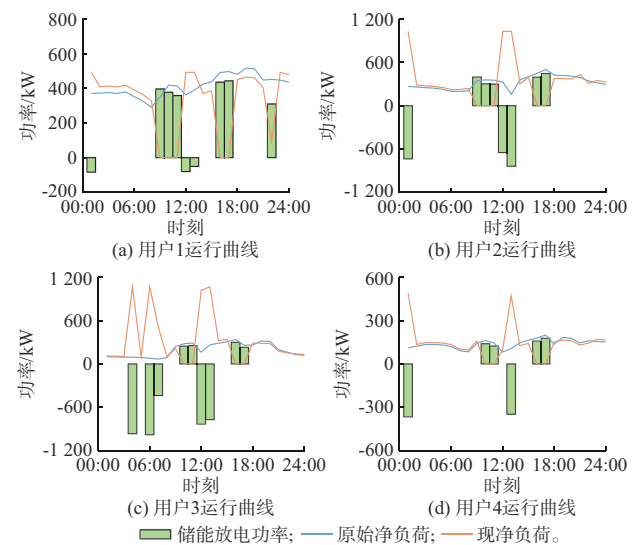


图 4 各用户运行曲线
Fig. 4 Operation curves of each user

在图 4 所示的典型日内,SES 主要在低谷电价时段充电,在午间 09:00—11:00、15:00—17:00 尖峰电价时段进行放电,使得峰电购买量降至 0,大大降低了用户的基本电费。除此之外,由于 DR 时段与尖峰电价时段重合,在 DR 市场开启时,用户联盟还可根据尖峰负荷的削减量在 DR 市场中获取额外的收益。

接着,依据 3.3 节所述双边 Shapley 值法进行成本分摊,并对比配置储能前后各用户的成本大小,结果如表 2 所示。

表 2 成本分摊结果
Table 2 Cost sharing results

算例编号	用户 1 总成本/万元	用户 2 总成本/万元	用户 3 总成本/万元	用户 4 总成本/万元
1	2 106	2 367	1 221	615
4	1 936	2 141	1 109	548

从表2中可以看出,各用户的总成本在合作后均有不同程度降低,降低幅度在8.07%~10.92%。这与各用户的光伏配置容量及原始负荷特性密切相关。用户的光伏配置容量越大、原始负荷特性与分时电价曲线越契合,则用户参与合作的收益越高。

5.3 SES容量衰减对其经济效益的影响分析

本文所用的储能电池为磷酸铁锂电池,SES在运行年限内剩余容量的变化情况见表3。整体上来看,SES的容量衰减速率呈先逐渐减小后不断增大的趋势,在第8年时剩余容量仅有初始容量的73%左右,衰减情况较为严重。

表3 SES容量衰减情况
Table 3 Decay situation of SES capacity

SES运行年限	SES剩余容量/(kW·h)	年容量衰减量/(kW·h)
1	3 010	224
2	2 786	173
3	2 613	120
4	2 493	81
5	2 412	63
6	2 349	67
7	2 282	93
8	2 189	139

SES容量的严重衰减必将对其运行的经济效益产生影响,本文基于算例4与算例5的结果,量化分析SES容量衰减对其经济效益的影响,结果如表4所示。其中,用户用电成本包括用户的基本电费、需量电费以及专变减少扩建收益,总运行成本包括DR市场收益与用户用电成本。

表4 算例4与算例6中SES经济效益的对比
Table 4 Comparison of SES economic benefits in case 4 and case 6

算例编号	DR市场收益(第8年)/万元	用户用电成本(第8年)/万元	总运行成本(第8年)/万元	DR市场收益(全运行周期)/万元	用户用电成本(全运行周期)/万元	总运行成本(全运行周期)/万元
4	33	834	801	458	5 503	5 045
5	48	819	771	541	5 433	4 892

从表4中可以看出,在SES配置容量相同的情况下,第8年时两组算例的总成本相差30万元,占第8年总成本的3.75%;SES全运行周期内两组算例的总成本相差153万元,占全运行周期内总成本的3.03%。若SES的运行年限更长,由于在运行后期SES的容量衰减速率迅速增加,两组算例的成本差还将进一步增大。由此可见,若不考虑SES的容量

衰减,将过于高估SES所带来的经济效益,从而制定错误的配置方案,增加投资者们的投资顾虑,打击其投资积极性。

5.4 DR违约风险对SES经济效益的影响分析

参与约定DR的用户需要在日前预测自身的用电需求及光伏出力,并在权衡响应补贴与违约风险后谨慎地制定约定响应量。算例4中某典型日内约定响应量与有效响应量见图5,当用户的实际响应量大于1.2倍约定响应量时,有效响应量为1.2倍约定响应量;当实际响应量小于60%约定响应量时,用户可能会因违约信用等级被降低甚至被禁止参与DR市场。

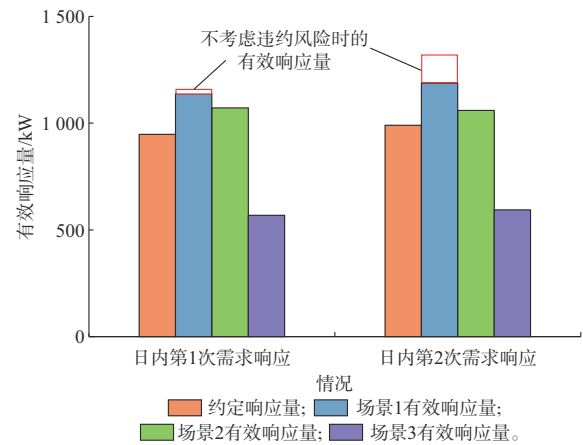


图5 约定响应量与有效响应量对比
Fig. 5 Comparison between agreed response quantity and effective response quantity

从图5中可以看出,响应能力较低的场景3所带来的违约风险限制着约定响应量的增加,从而使得其他场景的响应能力无法充分发挥,这也是众多的DR市场参与者所面临的重大难题之一。DR违约风险影响着DR市场收益,从而导致总运行成本的增加。因此,本文基于算例4与算例6的结果量化分析DR违约风险对SES经济效益的影响情况,结果如表5所示。其中,不考虑DR违约风险是指用户可准确地预测日内的源荷变化情况从而制定约定响应量,各场景的响应能力都能够得到充分发挥。

表5 算例4与算例6中SES经济效益对比
Table 5 Comparison of SES economic benefits in case 4 and case 7

算例编号	DR市场收益/万元	用户用电成本/万元	总成本/万元
4	458	5 503	5 045
6	498	5 503	5 005

从表5中可以看出,在SES配置容量相同的情况下,两组算例中的DR市场收益相差40万元,占DR市场总收益的8.73%。这主要是由于算例6中不考虑DR违约风险,各场景的响应能力都能得到充分发挥,且各场景间响应能力的差异越大,低响应能力场景对约定响应量的限制越明显,对SES经济效益的影响也就越显著。而各场景间响应能力的差异主要取决于用户日内源荷预测结果的精确度。换言之,预测结果的精确度越低,则DR市场违约风险对SES经济效益的影响越不容忽视。

6 结语

针对用户侧储能收益渠道单一、投资回报慢等问题,本文提出了市场环境下考虑全运行周期收益测算的工业园区SES优化配置方法,所得结论如下:

1)在考虑市场时序演变的前提下,通过拓宽SES的盈利渠道,整合工业用户与SES的灵活调节能力到DR市场交易之中,能够在现有SES模式的基础上进一步提高SES的经济效益,改善投资成效;

2)与不考虑DR违约风险的研究相比,考虑DR违约风险能够更加准确地测算DR市场的经济效益,从而有助于制定SES的优化配置方案,并且用户对自身日内源荷情况的预测精确度越低,DR违约风险的影响越不容忽视。

本文目前仅对选定的工业用户合作投资SES的配置容量以及经济效益进行分析,下一步工作将聚焦于各用户的负荷特性以及用户间的互补关系,分析其对SES配置容量以及经济效益所产生的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6840-6849.
- [2] KIM W W, SHIN J S, KIM J O. Operation strategy of multi-energy storage system for ancillary services [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4409-4417.
- [3] 张勇军,周星月,唐渊,等.双楼宇专变供电充电站负荷的时空二维调控建模[J].电力自动化设备,2023,43(6):37-45. ZHANG Yongjun, ZHOU Xingyue, TANG Yuan, et al. Time-space two-dimensional regulation modeling of charging station
- load powered by bi-building special transformers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 37-45.
- [4] TERLOUW T, ALSKAIF T, BAUER C, et al. Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies [J]. Applied Energy, 2019, 239: 356-372.
- [5] ZHENG B S, WEI W, CHEN Y E, et al. A peer-to-peer energy trading market embedded with residential shared energy storage units [J]. Applied Energy, 2022, 308: 118400.
- [6] 刘思强,叶泽,吴永飞,等.电化学储能项目商业价值量化模型及竞争策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):41-49. LIU Siqiang, YE Ze, WU Yongfei, et al. Study on commercial value quantification model and competitive strategy of electrochemical energy storage projects [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 41-49.
- [7] 黄毓,刘海涛,马丙泰,等.基于纳什谈判的共享储能电站优化运行研究[J].电力建设,2022,43(2):1-9. HUANG Cheng, LIU Haitao, MA Bingtai, et al. Research on optimal operation of shared energy-storage power station applying Nash negotiation [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 1-9.
- [8] 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.
- [9] 国家发展和改革委员会.关于《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》《电力负荷管理办法(征求意见稿)》公开征求意见情况的通告[EB/OL].[2023-07-03].https://www.ndrc.gov.cn/hdjl/yjqz/yjfk/dlxqcdlfhgl/202307/t20230704_1358112.html. National Development and Reform Commission. Notice on the public solicitation of opinions on the "Power Demand Side Management Measures (Draft for Soliciting Opinions)" and "Power Load Management Measures (Draft for Soliciting Opinions)" [EB/OL]. [2023-07-03]. https://www.ndrc.gov.cn/hdjl/yjqz/yjfk/dlxqcdlfhgl/202307/t20230704_1358112.html.
- [10] 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.
- [11] 孙玉树,杨敏,师长立,等.储能的应用现状和发展趋势分析[J].高电压技术,2020,46(1):80-89. SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [12] 郭明萱,穆云飞,肖迁,等.考虑电池寿命损耗的园区综合能源电/热混合储能优化配置[J].电力系统自动化,2021,45(13):66-75. GUO Mingxuan, MU Yunfei, XIAO Qian, et al. Optimal configuration of electric/thermal hybrid energy storage for park-level integrated energy system considering battery life loss [J].

- Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 66-75.
- [13] 朱宗耀,王秀丽,吴雄,等.考虑多场景规划的共享储能投资及运营分析[J].电力系统自动化,2023,47(7):23-31.
ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Investment and operation analysis of shared energy storage considering multi-scenario planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 23-31.
- [14] 丁逸行,徐青山,吕亚娟,等.考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J].电网技术,2019,43(4):1179-1186.
DING Yixing, XU Qingshan, LÜ Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1179-1186.
- [15] 代心芸,陈皓勇,肖东亮,等.电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J].电网技术,2022,46(11):4169-4186.
DAI Xinyun, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4169-4186.
- [16] 柏颖,刘晓峰,陈雪颖.面向需求响应日前市场投标的负荷聚合商决策动力学分析[J].电力系统自动化,2022,46(24):95-103.
BAI Ying, LIU Xiaofeng, CHEN Xueying. Dynamics analysis on decision-making of load aggregator for day-ahead demand response market bidding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 95-103.
- [17] 谢雨龙,罗逸飏,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.
- [18] 吴盛军,李群,刘建坤,等.基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置[J].电网技术,2021,45(10):3822-3832.
WU Shengjun, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Bi-level optimal configuration for combined cooling heating and power multi-microgrids based on energy storage station service [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3822-3832.
- [19] 黄淳驿,王承民,谢宁,等.基于运行-市场强耦合特性的配电网扩展规划[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4716-4731.
HUANG Chunyi, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Distribution expansion planning based on strong coupling of operation and spot market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4716-4731.
- [20] 国家发展和改革委员会.关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL].[2023-07-15].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html.
National Development and Reform Commission. Guidance on accelerating the development of new energy storage [EB/OL]. [2023-07-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html.
- [21] 宁波市人民政府国有资产监督管理委员会.宁波首个!浙江省“十四五”新型储能示范项目并网成功[EB/OL].[2023-06-28].http://gzw.ningbo.gov.cn/art/2023/4/28/art_122967011_4_59037889.html.
State owned Assets Supervision and Administration Commission of Ningbo Municipal Government. First in Ningbo! Successful grid connection of Zhejiang Province's "14th Five Year Plan" new energy storage demonstration project [EB/OL]. [2023-06-28]. http://gzw.ningbo.gov.cn/art/2023/4/28/art_122967011_4_59037889.html.
- [22] 国家能源局甘肃监管办公室.甘肃能源监管办关于印发《甘肃省电力辅助服务市场运营规则(试行)》的通知[EB/OL].[2023-01-05].http://gsb.nea.gov.cn/view.asp?id=7005&typeid=228.
Gansu Regulatory Office of the National Energy Administration. Notice of Gansu Energy Regulatory Office on issuing the "Operation Rules for Gansu Province Electric Power Auxiliary Service Market (Trial)" [EB/OL]. [2023-01-05]. http://gsb.nea.gov.cn/view.asp?id=7005&typeid=228.
- [23] 国家能源局湖南监管办公室.关于公开征求《湖南省电力辅助服务市场交易规则(2022版)(征求意见稿)》意见的公告[EB/OL].[2022-11-17].http://hnb.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=8abf807b82cf675f018484d1cd6908a2&wd=&eqid=e0137be8001361cc00000066426de1f.
Hunan Regulatory Office of the National Energy Administration. Announcement on publicly soliciting opinions on the "Trading Rules of Hunan Electric Power Auxiliary Service Market (2022 Edition) (Draft for Soliciting Opinions)" [EB/OL]. [2022-11-17]. http://hnb.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=8abf807b82cf675f018484d1cd6908a2&wd=&eqid=e0137be8001361cc00000066426de1f.
- [24] 王育飞,叶俊斌,薛花,等.基于改进雨流计数法的梯次利用电池储能系统优化控制[J].电力系统自动化,2022,46(8):39-49.
WANG Yufei, YE Junbin, XUE Hua, et al. Optimal control for energy storage system with echelon utilization batteries based on improved rain-flow counting method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 39-49.
- [25] 江苏省发展和改革委员会.关于公开征求《江苏省电力需求响应实施细则》(修订征求意见稿)意见的公告[EB/OL].[2023-06-24].http://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2022/10/24/art_284_10637935.html.
Jiangsu Development & Reform Commission. Announcement on the public consultation of "Jiangsu Province Electricity Demand Response Implementation Rules" (revised draft for comments) [EB/OL]. [2023-06-24]. http://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2022/10/24/art_284_10637935.html.
- [26] 陈岑,武传涛,康慨,等.基于改进Owen值法的分布式储能双层合作博弈优化策略[J].中国电机工程学报,2022,42(11):3924-3936.
CHEN Cen, WU Chuantao, KANG Kai, et al. Optimal strategy of distributed energy storage two-layer cooperative game based on improved Owen-value method [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3924-3936.
- [27] 麻秀范,余思雨,朱思嘉,等.基于多因素改进Shapley的虚拟电厂利润分配[J].电工技术学报,2020,35(增刊2):585-595.
MA Xiufan, YU Siyu, ZHU Sijia, et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor Shapley value method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Supplement 2): 585-595.

- [28] ZHANG Z, JIANG Y C, LIN Z Z, et al. Optimal alliance strategies among retailers under energy deviation settlement mechanism in China's forward electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2059-2071.
- [29] RUIZ C, CONEJO A J, GABRIEL S A. Pricing non-convexities in an electricity pool [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1334-1342.
- [30] 谢雨龙, 李黎, 杨凯. 考虑储能电池容量衰减的共享储能配置研究[J]. 广东电力, 2022, 35(5): 16-24.
XIE Yulong, LI Li, YANG Kai. Research on shared energy storage configuration considering energy storage battery capacity attenuation [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 16-

24.

王亚武(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:用户侧储能的优化配置。E-mail:wyw5008808@sjtu.edu.cn

黄淳驿(1993—),女,通信作者,博士,助理研究员,主要研究方向:综合能源配电系统灵活性优化。E-mail:h_chunyi@sjtu.edu.cn

王承民(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划与经济运行及电力市场等。

(编辑 鲁尔姣)

Optimal Configuration of Shared Energy Storage in Industrial Park Considering Full-cycle Economic Benefits in Electricity Market Environment

WANG Yawu¹, HUANG Chunyi¹, WANG Chengmin¹, LI Kangping², FANG Xinyan¹, YAN Gangui³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: To improve the operation efficiency and investment effectiveness of the user-side energy storage, an optimal configuration method of shared energy storage (SES) in the industrial park considering full-cycle economic benefits in the market environment is proposed. On the one hand, the method could reduce energy storage capacity requirements by coordinating differentiated adjustment needs among different users. On the other hand, it could expand profit channels by integrating the flexible adjustment capabilities of users and SES to participate in the demand response market, and the full-operation-cycle economic benefits calculation of the SES is considered to reduce the investment risks. Firstly, based on the trading rules of the electricity market, a park SES operation mode with multiple industrial users forming cooperative alliances is proposed. Secondly, with the goal of minimizing the total cost of the alliance during the operation cycle, an SES bi-level optimal configuration model is established. The upper-level model aims to form an SES planning scheme that maximizes investment effectiveness, while the lower-level model comprehensively considers some factors such as time-of-use electricity prices and demand response default risks to form the optimal bidding and scheduling mode for energy storage, and accurately quantifies the operation benefits of SES throughout the full operation cycle based on time-series evolution laws of market, correcting the upper-level results. Then, the model is converted into a single-level model by using the approximate Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition for solution. Combining the rain flow counting method and the iterative method, the impact of SES capacity decay on its configuration scheme is quantified, and the investment cost of each industrial user is apportioned by using the bilateral Shapley value method. Finally, numerical simulations are conducted to validate the effectiveness of the proposed method and analyze the impact of some factors such as energy storage profit mode, SES capacity decay, and demand response default risk on the economic benefits of SES investment.

This work is supported by the Open Fund of Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (No. MPSS2023-10).

Key words: electricity market; time-series evolution; industrial park; shared energy storage (SES); demand response; optimal configuration; bi-level model

