

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.007

计及共享储能与光伏的园区多用户综合收益优化

马佳伊¹, 刘海涛^{1,2}, 仲聪¹, 袁宇波³, 张效诚¹

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:针对含共享储能与户用光伏的园区场景,文中提出一种用户侧综合收益双层优化方法,充分挖掘共享储能灵活性及用户用电需求差异性,在实现用户整体经济效益最优的同时提升光伏消纳能力。模型上层为月前优化阶段,以用户月度用电成本最低为目标,考虑系统能量平衡、储能充放电约束以及储能荷电状态约束,优化工业用户最大用电功率,降低需量电费;模型下层为日前优化阶段,综合考虑用户综合收益及光伏消纳能力,以上层优化结果为约束条件,兼顾功率、储能等约束,提出共享储能充放电功率及用户与电网交互功率等日前优化策略,在用户月度整体经济性最优的前提下,实现用户侧每日经济效益的优化。最后,以南方某实际园区作为算例验证了文中所提方法的有效性。

关键词:共享储能;户用光伏;双层优化;用户综合收益;光伏消纳能力;需量电费

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)01-0060-08

0 引言

随着科技的发展,走绿色、可持续发展之路成为了世界各国的共同目标,储能是推动经济可持续发展方面发挥着重要作用。由于电力负荷逐渐增加,日益增加的高峰负荷要求显然难以被满足。此外,我国正在构建新型的双碳目标电力系统,研究在平衡负荷侧用户资源供需压力的同时保证用户侧综合收益十分重要^[1-4]。

用户侧储能是最早商业化的储能领域,是多能互补的重要环节,在缓解大电网压力、降低用户成本和提升微电网能源消纳率等方面优势明显,具有良好的发展前景^[5-7]。但目前用户侧储能收益点单一,投资回报周期较长,运行成本较高且效率较低。因此如何对用户侧进行优化以有效地激活用户侧储能的市场活力成为了重要研究方向。

随着共享经济的发展,“共享理念”开始深入电网,国内外开始探索共享储能的服务模式^[8-12]。文献[13-14]提出了“区块链”的概念,使分布式微小储能以共享储能的形式参与火储联合调频,充分利用储能资源提供调频服务。文献[15-16]提出了一种点对点(peer-to-peer, P2P)交易下兼具储能共享和电能自营模式的储能聚合商交易模型,提升了各用户的便利性,高效提高了分布式能源用户及储能聚合商的经济收益。随着P2P技术的逐渐完善,文

献[17]提出了一种基于半分布式结构化拓扑的云储能双层P2P两阶段交易策略,为用户侧储能业务开展提供了一个全新视角。以上文献侧重于在区域性模式下对储能进行优化配置,充分发挥储能的巨大优势。

目前,也有针对多用户、多区域能源共享储能的研究^[18]。文献[19]针对一类电-热等多区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES),建立了共享储能系统与多个RIES的双层优化配置模型,为共享储能系统的优化配置提供参考方案。文献[20]提出多微电网共享储能的多目标优化配置及其成本的公平分摊方法。文献[21-22]分别基于合作博弈以及纳什谈判两方面建立共享储能规划模型,并计算整个储能系统的最大收益。文献[23]将微网运行商与共享储能相结合,建立基于主从博弈与共享储能的综合能源微网运行优化模型,针对用户侧提出电制热、共享储能机制等优化决策方案。文献[24]针对社区综合能源系统,提出具有共享储能、热电联供以及光伏电源情况下的居民用户日前调度安排方法。在商业运行模式方面,文献[25-26]考虑了在“双碳”目标下共享储能的应用场景与价值。文献[27]建立了一种需求响应模型,在共享储能调控策略的基础上实施需求响应,使用户侧的收益最优。文献[28]针对工业园区内不同类型的工业用户,提出一种多用户共享储能的分散式调度模型,为用户创造更多收益。

以上文献未能充分考虑配置光伏给用户带来

收稿日期:2023-08-04;修回日期:2023-10-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600)

的收益,无法在实现用户整体经济效益最优的同时提升光伏消纳能力,也未针对多个工业用户情况考虑用电需求差异性。在此背景下,文中立足于多工业用户,提出一种用户侧综合收益双层优化方法,上层模型优化了工业用户最大用电功率,降低需量电费。下层模型以上层优化结果为约束条件,在用户月度整体经济性最优的前提下,实现用户侧每日经济效益的优化。最后,通过算例验证了文中所提算法的有效性。

1 含共享储能与光伏的典型工业园区供能系统结构

为兼顾储能的灵活调节特性及用户经济性,共享储能模式应运而生。共享储能将原本仅服务于单一个体的储能转变为服务于多个个体^[11],园区能源代理作为储能的投资主体,通过优化调度,为用户提供电量削减、需量削减等服务,满足用户灵活用电及经济性需求。

文中针对的典型工业园区供能系统包括共享储能、分布式光伏以及所在配电台区的上级电网,系统结构如图1所示。园区能源代理商提供园区内各用户的统一购电、储能充放电调度计划制定以及购电费用结算出清等服务^[28]。园区内户用分布式光伏采取自发自用模式,盈余光伏电量既可向上级电网出售,也可存入共享储能系统。通过灵活调控分布式光伏的盈余电量以及储能系统的充放电功率,可实现园区负荷削峰填谷,削减用户月度需量电费以及电度电费,提升售电收益,进而改善多用户综合效益。

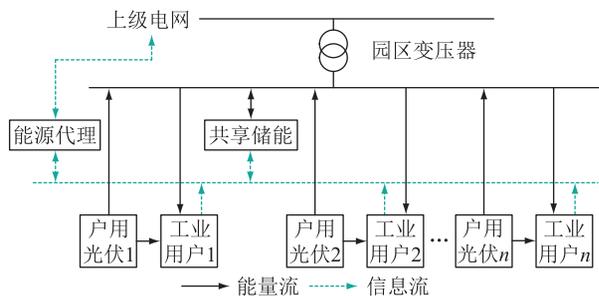


图1 工业园区集中式共享储能系统结构

Fig.1 Structure of centralized shared energy storage in the industrial park

2 用户侧综合经济效益双层优化模型

针对图1的系统结构,为实现工业园区用户综合经济效益最大化,文中提出双层优化模型,对用户月度用电需量以及日前经济运行方式进行优化,模型基本框架如图2所示。上层优化模型以需量电

费成本、电度电费成本以及储能使用成本之和最低为目标函数,考虑功率平衡约束、储能充放电约束以及储能荷电状态(state of charge, SOC)约束等约束条件,优化得到园区各工业用户月度最大需量,并将结果传递给下层模型。下层优化目标考虑用户综合经济效益、户用光伏消纳水平以及共享储能充放电成本,约束条件包括供需平衡约束和储能功率、SOC约束以及电网交互功率约束,输出共享储能日前优化策略、用户储能分配策略以及与电网功率交互策略的优化结果。

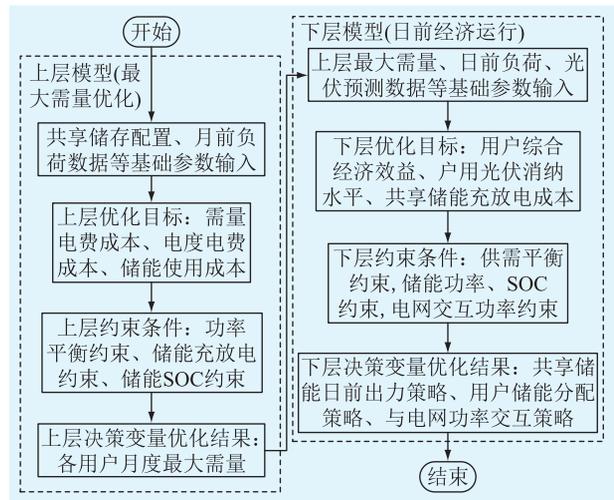


图2 双层优化模型框架

Fig.2 Structure of bi-level optimization model

2.1 上层优化模型

上层优化模型需要对用户月度最大用电功率进行优化,计算月前阶段各工业用户成本,将共享储能配置、月前负荷数据等基础参数输入,设置优化目标和优化条件,得到上层决策变量优化结果,即各用户月度最大需量。

2.1.1 月前阶段各工业用户成本

上层模型为月前优化阶段,结合月前负荷预测数据,以工业园区内各类用户在该月内的用电成本削减最大为目标,优化共享储能分配至各用户的充放电功率,从而预测得到各用户在该月内的最小成本值。目标函数可表示为:

$$\min F = \min(\alpha + \beta + \delta) \quad (1)$$

式中: F 为园区内所有用户的月度用电总成本,由月度需量电费总成本 α 、月度电度电费总成本 β 以及储能与电网月度交互总成本 δ (其费用由园区能源聚合商清算后分摊至每个用户)三部分组成。各成本计算表达式见式(2)一式(4)。

$$\alpha = \sum_{i=1}^m P_{i,1\max} \varphi \quad (2)$$

$$\beta = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m C_t P_{i,b,grid}(t) \Delta t \quad (3)$$

$$\delta = \sum_{t=1}^T (P_{c,es,grid}(t) \Delta t C_t + P_{d,es,grid}(t) \Delta t C_{s,es}) \quad (4)$$

式中： φ 为最大需量计费价格，文中取 40 元/(kW·h)； $P_{i,Lmax}$ 为第 i 个用户一个月内的最大购电功率； m 为用户数量； C_t 为实时电价； $P_{i,b,grid}(t)$ 为第 i 个用户在 t 时段从电网购电的功率； Δt 为时间间隔； T 为一个月的总时段数，以 1 h 为仿真步长； $P_{c,es,grid}(t)$ 为储能从电网获取的充电功率； $P_{d,es,grid}(t)$ 为储能上网售电功率； $C_{s,es}$ 为储能上网出电价。

2.1.2 上层约束条件

(1) 电功率平衡约束。园区内用户负荷功率由上级电网、光伏及共享储能共同满足，因此须考虑园区配变下的电功率平衡约束，即用户的负荷功率之和，如式(5)一式(7)所示。

$$\sum_{i=1}^m P_{i,L}(t) + P_{c,es}(t) + P_{d,es}(t) - \sum_{j=1}^q P_{j,v}(t) - P_{ex}(t) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{c,es}(t) = P_{c,es,grid}(t) + P_{es,pv}(t) \\ P_{d,es}(t) = \sum_{i=1}^m P_{i,es,d}(t) + P_{d,es,grid}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{c,es}(t) P_{d,es}(t) = 0 \quad (7)$$

式中： $P_{i,L}(t)$ 为第 i 个用户在 t 时段的负荷功率值； $P_{c,es}(t)$ 、 $P_{d,es}(t)$ 分别为储能在 t 时段的充电和放电功率； $P_{j,v}(t)$ 为第 j 个用户用光伏在 t 时段的发电功率； q 为安装光伏的用户数量； $P_{ex}(t)$ 为与电网交互运行的功率，从电网购电为正，向电网售电为负； $P_{es,pv}(t)$ 为由余量光伏充入储能的功率； $P_{i,es,d}(t)$ 为储能放电功率中分配给第 i 个用户的功率。

(2) 用户使用共享储能电站充放电功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{c,es}(t) \leq P_{c,es,max} \\ 0 \leq P_{d,es}(t) \leq P_{d,es,max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_{c,es,max}$ 、 $P_{d,es,max}$ 分别为用户使用共享储能电站的充、放电功率的最大值。

(3) 共享储能 SOC 连续性约束。

$$E(t) = (1 - \zeta)E(t-1) + \left(\eta_c P_{c,es}(t) - \frac{P_{d,es}(t)}{\eta_d} \right) \Delta t \quad (9)$$

$$S(t) = \frac{E(t)}{E_{max}} \quad (10)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (11)$$

式中： $E(t)$ 为储能电站在 t 时段的 SOC； ζ 为储能电站自放电率； η_c 、 η_d 分别为共享储能的充电和放电效率； E_{max} 为共享储能容量； $S(t)$ 为共享储能在 t

时段的 SOC； S_{max} 为共享储能 SOC 的最大值； S_{min} 为共享储能 SOC 的最小值。

2.2 下层优化模型

下层优化模型主要优化的是用户的日前经济运行，计算日前阶段各工业用户成本，将上层的最大需量、日前负荷、光伏预测数据等基础参数输入，设置优化目标和优化条件，得到下层决策变量优化结果。

2.2.1 日前阶段各工业用户成本

在日前优化调度阶段，结合日前负荷预测数据，以所有用户在一天内的用电成本削减最大为目标，优化共享储能在各时段分配至各用户的充放电功率，从而预测得到各用户在一天内的最小成本值。目标函数可表示为：

$$\min Y = \min(g_1 + g_2 - f_1 - f_2) \quad (12)$$

式中： Y 为日前阶段各工业用户的净成本； g_1 为电网购电成本； g_2 为储能购电成本； f_1 为光伏售电收益； f_2 为储能余量上网收益。

各子成本和收益可按式(13)一式(16)计算。

$$f_1 = \sum_{j=1}^q \sum_{t=1}^k P_{j,v}(t) C_{pv} \Delta t \quad (13)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^k P_{d,es,grid}(t) C_{s,es} \Delta t \quad (14)$$

$$g_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k P_{i,b,grid}(t) C_t \Delta t \quad (15)$$

$$g_2 = \sum_{t=1}^k C_t P_{c,es,grid}(t) \Delta t \quad (16)$$

式中： k 为一天的时段数，以 1 h 为时段间隔； C_{pv} 为光伏上网电价。

2.2.2 下层约束条件

下层的约束条件不仅包括上层的功率平衡约束、充放电约束以及 SOC 约束，还要考虑用户的月度需量约束。

$$P_{i,L}(t) - u_i P_{j,v}(t) - P_{i,es,d}(t) \leq P_{i,Lmax} \quad (17)$$

式中： u_i 为 0-1 变量，表征第 i 个用户的光伏配置情况，若配置了光伏， $u_i = 1$ ，否则为 0。

2.3 模型求解

在 MATLAB 环境中搭建上述双层优化数学模型，模型中各决策变量的求解本质为多元非线性优化计算问题，文中通过调用 MATLAB 优化工具箱 Fmincon 实现模型的求解。模型整体求解步骤包括：

(1) 输入共享储能、用户月前负荷数据等基本仿真参数，按式(1)一式(11)建立上层数学模型；

(2) 生成上层模型的目标函数及约束条件 2 个编程文件，调用 Fmincon 工具箱求解输出上层模型

的决策变量,即各工业用户优化后的月度用电量;

(3) 更新用户日前负荷数据、光伏日前出力预测数据等下层模型所需基础参数,输入上层月度用电量优化值,按式(12)一式(17)建立下层日前优化模型;

(4) 调用 Fmincon 工具箱求解输出日前各时段共享储能充放电功率、用户储能分配功率以及与电网功率交互的优化结果。

3 算例分析

3.1 基本场景

文中选取南方某小型工业园区作为算例对所提模型进行仿真验证。在 MATLAB 仿真软件中搭建文中的优化模型,采用 Fmincon 工具箱对模型进行求解,输出两阶段优化策略。

算例中的园区包含 2 个工业用户 A 和 B,负荷特性曲线分别为双峰型和平峰型,其中工业用户 A 配置了 500 kW 的户用光伏,用户 B 未配置户用光伏。园区内配置了容量为 500 kW/1 000 kW·h 的集中式共享储能,为园区工业用户提供储能服务,参与台区用户负荷需求及综合收益优化。园区的基本参数如表 1 所示。表中,分时电价的峰时段为 08:00—12:00 以及 17:00—21:00,谷时段为 00:00—08:00,其余时段为平时段。

表 1 用户负荷及储能配置参数

Table 1 Basic parameters for load and energy storage

用户	月度负荷峰值/kW	峰、谷、平 分时电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	储能参数		
			容量/ (kW·h)	充、放电 效率/%	SOC 约束/%
A	580	1.035、0.259、0.607	1 000	90、90	[10, 90]
B	420	1.035、0.259、0.607	1 000	90、90	[10, 90]

3.2 基于双层优化模型的场景仿真结果分析

基于文中所提双层优化模型,对算例场景进行仿真,输出共享储能充放电策略、用户需量电费及综合经济效益优化结果。其中,为降低模型复杂度,选取月内典型日对月度需量进行测算。基于用户 1 a 内各月份的日负荷数据进行聚类,取每月份的负荷数据聚类结果作为当前月份的典型日负荷曲线。

(1) 上层优化结果。图 3 和图 4 为 2 个用户月度需量电费的优化结果,用户 A 在优化后月度用电峰值由 580 kW 降为 470 kW,月度需量电费减少 4 400 元(需量电价为 40 元/(kW·h));用户 B 在优化后月度用电峰值由 420 kW 降为 410 kW,月度需量电费减少 400 元,此时两用户的整体经济效益最

优,每月总用电净成本为 27.42 万元,相较于不进行经济效益优化的场景(月度总用电净成本为 30.35 万元),经济性提升约 10%。

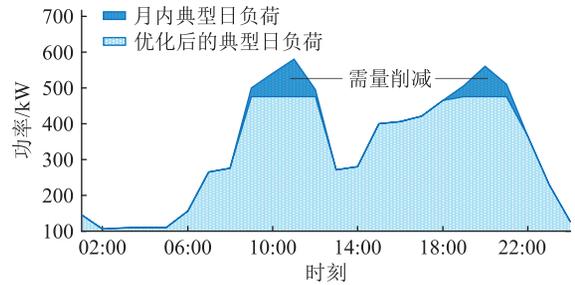


图 3 工业用户 A 典型日需量优化结果

Fig.3 Consumed power optimization results for user A on the typical day

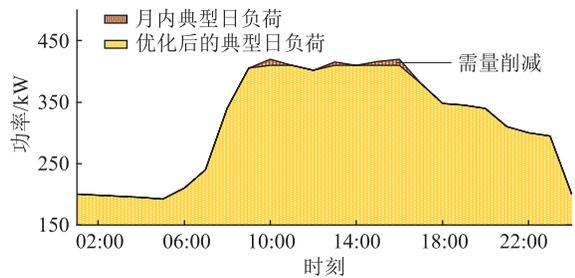


图 4 工业用户 B 典型日需量优化结果

Fig.4 Consumed power optimization results for user B on the typical day

(2) 下层优化结果。基于上层月度需量优化结果,下层模型结合用户日前负荷预测曲线对整体用电成本进行优化,同时不断反馈校正上层优化变量,从而输出储能日前最优充放电策略以及对应的电网交互策略,实现用户整体经济效益的优化。

图 5、图 6 为优化后的用户与电网交互策略以及储能充放电策略。

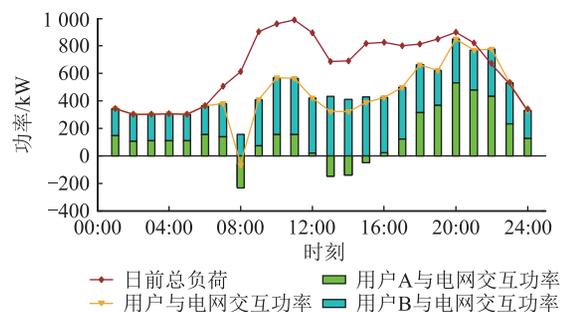


图 5 用户与电网交互策略

Fig.5 Interaction strategies between users and power grid

由图 5 可知,用户 A 由于配置了户用光伏,在光伏大发时段,除了满足用户自身用电,还可向电网出售剩余电量以获得售电收益,提升用户综合收益。用户 B 未配置光伏,因此其负荷主要通过共享

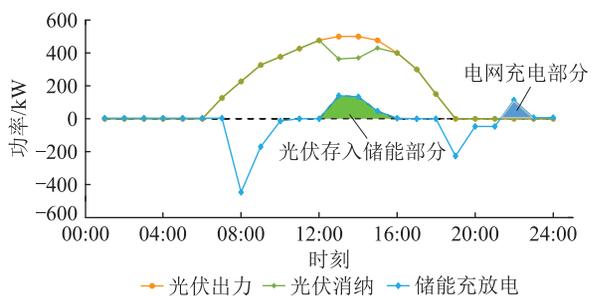


图6 储能充放电及光伏消纳曲线

Fig.6 Power curves of the storage system and absorbed photovoltaic

储能放电以及向电网购电满足。通过下层模型优化后,典型日内用户与电网交互的总电量由 15 510 kW·h 降低为 10 700 kW·h,用户日购电成本由 11 405 元降低为 7 800 元,降低约 31.6%。

由图 6 可知,共享储能一天内两充两放。放电阶段为 08:00—11:00 以及 17:00—20:00 两个电价高峰时段,实现了用户错峰用电,提升了经济性。最高充电功率达 435 kW,累计平移峰时电量 740 kW·h。两次放电阶段结束后,共享储能 SOC 分别为 18%与 12%(储能容量为 500 kW/1 000 kW·h)。为保障共享储能 SOC 处于约束范围内,在放电阶段结束后须进行充电,提升储能 SOC。充电阶段中,储能充电电量来源于电网购电与光伏发电。12:00—16:00 时段光伏处于大发时段,光伏发电余量经优化后一部分向电网出售,另一部分存入共享储能;22:00—23:00 时段为电价平时段,通过从电网购电满足共享储能充电需求。此外,配置共享储能为余量光伏的消纳提供了新途径。算例中光伏日发电量为 4 275 kW·h,用户 A 消纳后仍有 525 kW·h 电量存在盈余,通过配置共享储能将此部分盈余电量进行灵活消纳,避免了倒送至电网,提升了 12%的光伏消纳电量。

3.3 不同场景下的用户经济性对比分析

为进一步验证文中所提方法的优越性,分别针对以下 5 种场景进行仿真对比分析,具体仿真场景设置如下。

场景 1:不考虑双层优化,共享储能在谷时段充电,峰时段放电。

场景 2:不考虑上层的需量电费优化,仅结合文中下层模型对用户日前综合收益进行优化。

场景 3:采用双层优化模型,不考虑配置户用光伏,用户负荷需求仅由电网购电及共享储能满足;变量包括储能充放电功率、用户与电网交互功率、售电功率。

场景 4:采用双层优化模型,不考虑配备共享储

能,用户负荷需求仅由电网购电及用户配置的光伏满足;变量包括用户与电网交互功率、光伏上网功率。

场景 5:采用文中所提双层优化模型,考虑共享储能与户用光伏,提出各用户月度最大需求量计划及日前综合收益优化策略;变量包括储能充放电功率、用户与电网交互功率、售电功率。

不同场景下的仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同场景下的用户经济性计算结果

Table 2 Calculation results of the user economy under different scenarios

场景	月度总成本	日前用户经济性			
		用户购电成本	储能使用成本	售电收益	用户综合成本
场景 1	30.346	0.818	0.093	0.020	0.891
场景 2	29.255	0.828	0.017	0.023	0.822
场景 3	37.802	1.105	0.030	0	1.135
场景 4	29.094	0.870	0	0.021	0.849
场景 5	27.415	0.821	0.024	0.023	0.822

对比场景 2 和 5 可知,场景 2 由于不考虑上层需量电费优化,日前优化过程中用户与电网侧功率交互缺少约束,增大了一定的优化灵活性,使得日前优化得到的部分指标略优于场景 5 的双层优化结果,但也增加了需量电费,导致月度总成本明显高于场景 5。

对比场景 1 和场景 5 可知,由于场景 1 未考虑优化策略,共享储能仅在固定时段进行充放电,因此日前经济效益与月度整体经济性均无法得到优化,指标与场景 5 存在较大差距。

场景 3、4 均以双层模型为基本架构,分别考虑了不配置光伏、不配置共享储能 2 种场景下的用户经济性,由计算结果可知,不配置户用光伏场景下的用户日内各类指标在所有场景中最低,进而影响了月度整体效益。可见,配置户用光伏可有效降低用户用电成本。

对比场景 4 与场景 5 可知,配置共享储能对用户侧综合收益具有一定影响。不配置共享储能虽然节省了储能运行使用成本,但限制了用户综合效益优化的灵活裕度,且无法参与月度电费削减,使得用户售电收益降低、购电成本增加;而通过配置共享储能并对其充放电策略进行优化,可降低约 6%的用户月度用电成本。

4 结论

文中针对工业园区场景,考虑不同工业用户负荷特性,提出计及共享储能与户用光伏的多用户综

合收益双层优化模型,兼顾用户月度需量以及日前用电优化,提升了用户综合效益,经算例分析得到如下结论:

(1) 文中提出的月前-日前双层优化模型,兼顾了园区工业用户需量电费及电度电费的优化,可显著降低用户整体用电成本;

(2) 通过配置共享储能并优化其充放电策略,可实现园区用户用电削峰填谷以及余量光伏的灵活存储,在保障用户综合收益的同时进一步提升了光伏就地消纳能力;

(3) 通过光储联合优化,可有效提升用户综合效益优化的灵活裕度,在降低电度电费的同时还能减少月度需量电费。

此外,文中下层模型仅考虑了日前优化,未考虑到光伏和负荷的不确定性,后续将增加日内滚动优化的研究,进一步提升优化模型的合理性。

参考文献:

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(1):1-18,369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(1):1-18,369.
- [2] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):5512-5521.
- [3] 张亮,李章溢,裴玮,等. 基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制[J]. 电力工程技术, 2021,40(3):106-113.
ZHANG Liang, LI Zhangyi, PEI Wei, et al. Tie-line power control method for an industrial park based on integrated demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(3):106-113.
- [4] 许朝阳,阮文骏,肖楚鹏,等. 支撑负荷侧资源柔性调控的新型电力负荷管理系统研究[J]. 电力需求侧管理, 2022,24(5):8-14.
XU Zhaoyang, RUAN Wenjun, XIAO Chupeng, et al. A new power load management system supporting flexible regulation of load-side resources [J]. Power Demand Side Management, 2022,24(5):8-14.
- [5] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术, 2022,41(2):67-74.
YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022,41(2):67-74.
- [6] 王守相,张善涛,王凯,等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备, 2020,40(1):125-132.
WANG Shouxiang, ZHANG Shantao, WANG Kai, et al. Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(1):125-132.
- [7] 张章,王涛,张丽洁,等. 考虑需求响应的用户端气-电综合能源网络优化控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022,43(5):156-164.
ZHANG Zhang, WANG Tao, ZHANG Lijie, et al. Optimal control of gas-electricity integrated energy network considering demand response [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022,43(5):156-164.
- [8] 张哲,林胤,陈子轩,等. 用户侧共享式储能的全寿命周期经济效益评估[J]. 浙江电力, 2023,42(3):47-54.
ZHANG Zhe, LIN Yin, CHEN Zixuan, et al. Life cycle economic benefit evaluation based on user-side shared energy storage[J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(3):47-54.
- [9] 侯佳莹,林振智,杨莉,等. 面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J]. 电力系统自动化, 2018,42(24):11-19.
HOU Jiaying, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Design of electricity plans for industrial and commercial customers oriented to active demand response on power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(24):11-19.
- [10] HUANG W X, ABU QAHOUQ J A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(5):2764-2776.
- [11] 李建林,崔宜琳,马速良,等. 需求侧共享储能的运营模式优化及其经济效益分析研究[J]. 电网技术, 2022,46(12):4954-4969.
LI Jianlin, CUI Yilin, MA Suliang, et al. Operation mode optimization and economic benefit analysis of demand-side shared energy storage[J]. Power System Technology, 2022,46(12):4954-4969.
- [12] 徐文滨,孙一凡,王林,等. 区块链架构下考虑共享储能的用户需求响应[J]. 浙江电力, 2023,42(4):54-64.
XU Wenbin, SUN Yifan, WANG Lin, et al. Demand response of users considering shared energy storage under blockchain architecture [J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(4):54-64.
- [13] 蒋玮,程澍,李鹏,等. 面向用户侧源储资源优化调度的能源区块链平台设计[J]. 电力系统自动化, 2021,45(12):11-19.
JIANG Wei, CHENG Shu, LI Peng, et al. Design of energy blockchain platform for optimal dispatching of source and storage resources on user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(12):11-19.
- [14] 裴佑,裴哲义,邱伟强,等. 基于区块链的共享储能联合调频分散交易机制设计[J]. 电力自动化设备, 2021,41(10):138-145.
PEI You, PEI Zheyi, QIU Weiqiang, et al. Design of decentralized trading mechanism for shared energy storage joint frequency regulation based on blockchain[J]. Electric Power Au-

- tomation Equipment, 2021, 41(10):138-145.
- [15] 张巍, 卢骧. 点对点交易下储能聚合商共享自营多模式交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2):15-23.
ZHANG Wei, LU Xiang. Sharing and self-operating multi-mode trading model of energy storage aggregators with peer-to-peer trade[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2):15-23.
- [16] YIN C, WANG J X, LI G Y, et al. Assessing the degradation of cloud storage sharing [C]//2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Chengdu, China. IEEE, 2021:1302-1307.
- [17] 马云聪, 武传涛, 林湘宁, 等. 一种基于半分布式结构化拓扑的云储能点对点交易策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21):7731-7746.
MA Yuncong, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Research on peer-to-peer transaction strategy of cloud energy storage based on semi-distributed structured topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21):7731-7746.
- [18] ZHU H L, OUAHADA K. Credit-based distributed real-time energy storage sharing management[J]. IEEE Access, 2019, 7:185821-185838.
- [19] 帅轩越, 马志程, 王秀丽, 等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2):679-690.
SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(2):679-690.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 黄铖, 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.
- [23] CHEN X Y, XIE Q, BIAN X M, et al. Energy-saving superconducting magnetic energy storage (SMES) based interline DC dynamic voltage restorer[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1):238-248.
- [24] 李鹏, 王加浩, 王子轩, 等. 基于多元能量供需-成本映射分析的园区综合能源系统协同优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11):4307-4319.
LI Peng, WANG Jiahao, WANG Zixuan, et al. Collaborative optimal scheduling of the community integrated energy system based on multi-energy supply/demand-cost mapping analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11):4307-4319.
- [25] 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.
- [26] RASOOL S, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A multi-filter based dynamic power sharing control for a hybrid energy storage system integrated to a wave energy converter for output power smoothing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3):1693-1706.
- [27] 郑浩伟, 闫庆友, 尹哲, 等. 计及日前-实时交易和共享储能的VPP运行优化及双层效益分配[J]. 电力建设, 2022, 43(9):34-46.
ZHENG Haowei, YAN Qingyou, YIN Zhe, et al. VPP operation optimization and bilayer revenue distribution model considering the two-level market and shared energy storage[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9):34-46.
- [28] 刘亚锦, 代航, 刘志坚, 等. 面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10):256-264.
LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):256-264.

作者简介:



马佳伊

马佳伊(1999),女,硕士在读,研究方向为用户侧共享储能的优化(E-mail:1825957246@qq.com);

刘海涛(1972),女,博士,教授,研究方向为微电网运行与控制关键技术;

仲聪(1999),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统优化调度。

Comprehensive benefits optimization method for multiple types of users connected to the same industrial park considering shared energy storage and household photovoltaic

MA Jiayi¹, LIU Haitao^{1,2}, ZHONG Cong¹, YUAN Yubo³, ZHANG Xiaocheng¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Considering the flexibility of shared energy storage and the different electricity demand of multiple types of users, a bi-level optimization method is proposed to achieve the optimal overall economic benefits of users and improve the photovoltaic consumption capacity for industrial users. Aiming at the lowest monthly power consumption cost of users, the upper layer model is established considering the system energy balance, energy storage charging and discharging constraints and energy storage state of charge constraints, so as to reduce the monthly maximum electricity demand and decrease demand charge. Taking the optimized monthly demand from the upper layer model, the day-ahead model is established, and the charging and discharging power of the shared energy storage, as well as the interactive power between users and the power grid are output to optimize comprehensive benefits of multiple types of industrial users and improve the photovoltaic absorption ability. Strategies for shared energy storage charging and discharging power, as well as user interaction power with the grid, are proposed to optimize the comprehensive benefits for various types of industrial users, ensuring daily economic efficiency under the premise of monthly overall economic optimality. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified with the case study.

Keywords: shared energy storage; household photovoltaic; bi-level optimization; user comprehensive revenue; photovoltaic absorption capacity; demand of electricity

(编辑 陆海霞)

(上接第 49 页)

Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics

ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The increase of new energy permeability increases the complexity of power system frequency control. Frequency regulation assisted by energy storage can alleviate this problem to some extent. However, due to the security and economic constraints of energy storage operation, frequency regulation measures need to be more targeted. In this paper, a primary frequency regulation method of power grid assisted by energy storage based on frequency response characteristics is proposed. Firstly, based on the model of frequency regulation assisted by energy storage, the frequency modulation integrated control method of auxiliary energy storage with inertia and droop is selected. Through the correlation analysis of rate of change of frequency and frequency deviation to frequency modulation requirements, frequency regulation demand zoning rules based on frequency response characteristics are designed. Then, according to the partition judgment corresponding to different frequency modulation requirements, the energy storage active power output mode is dynamically adjusted to respond to the uncertainty of frequency modulation requirements. On this basis, aiming at the contradictory relationship between frequency modulation demand and energy storage output demand, energy storage output strength and its cycle life, the multi-objective optimization problem is designed and solved to balance. Finally, the simulation results verify that the proposed method can effectively reduce the depth of charge and discharge of energy storage on the basis of ensuring the frequency modulation effect of power grid.

Keywords: primary frequency regulation; energy storage; frequency deviation; rate of change of frequency (RoCoF); rule-driven; multiple objective optimization

(编辑 钱悦)