

微电网储能系统多目标运行优化策略研究

叶飞,江南,陆彬,梁世杰

(国网江苏综合能源服务有限公司,南京 210019)

摘要:针对用户真实应用需求的问题,构建了一种微电网储能系统运行优化策略,并通过实际用户数据验证其有效性和适用性。首先,建立了储能系统的基本模型,为储能系统运行优化策略奠定应用基础。然后,从经济目标、碳排目标和新能源消纳目标3个方面提出了一种微电网储能系统多目标运行优化策略,并利用商业版优化器Gurobi求解器提高优化效率。最后,利用我国华东某省A市的实际微电网数据验证了所提优化策略的有效性和适用性,结果表明:所构建的储能系统模型能够准确反映实际储能系统运行约束,所提优化策略较用户现有策略在电费支出成本方面平均降低13.4676%;通过设置多目标优化的权重因子实现了运行方式的多样化,增强了储能系统运行策略的场景适应性;此外,该策略还可辅助制定用户侧微电网的余电上网政策。

关键词:微电网;储能系统;多目标;优化;经济性;碳排

Research on multi-objective operation optimization strategies for microgrid energy storage systems

YE Fei, JIANG Nan, LU Bin, LIANG Shijie

(State Grid Jiangsu Integrated Energy Service Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: An operational optimization strategy for microgrid energy storage systems is developed to meet real-world user application requirements, and its effectiveness and applicability are validated using actual user data. First, a fundamental model of the energy storage system is established, providing a theoretical foundation for the operational optimization strategy. Subsequently, a multi-objective operational optimization strategy for the microgrid energy storage system is developed, focusing on economic objectives, carbon emission reduction targets, and renewable energy integration goals. The commercial optimization solver Gurobi is employed to enhance computational efficiency. Finally, the proposed optimization strategy is validated using real-world microgrid data from City A in a province of East China. The results demonstrate that the constructed energy storage system model accurately captures the operational constraints of the actual system. Compared to the user's existing strategy, the proposed optimization strategy achieves an average reduction of 13.4676% in electricity cost expenditure. By dynamically adjusting weight factors for multi-objective optimization, the strategy enables diversified operational modes, significantly enhancing the scenario adaptability of the energy storage system's operational strategy. Furthermore, the strategy provides decision-making support for formulating policies related to surplus electricity feed-in from user-side microgrids. The main innovation lies in the strategy's user-centric design, which achieves operational flexibility through multi-objective weight allocation, improves scenario adaptability, and offers a novel approach for the practical implementation of microgrid energy storage systems.

Key words: microgrid; energy storage systems; multi-objective; optimization; economic; carbon emission

0 引言

随着全球能源结构加速向可再生能源转型,以光伏、风电为代表的新能源在新型电力系统构建中扮演着愈发重要的角色^[1]。同时,新能源固有的随机性给电力系统运行带来了严峻挑战,该问题在用户侧尤为突出^[2]。在我国“双碳”战略目标的引领下,高效消纳新能源发电过剩时段(renewable ener-

gy over-production period, REOP)的新能源、降低用户碳排放并提升运行经济性,已成为用户侧亟待解决的问题。

储能作为调节电力供需平衡、提高新能源消纳能力的关键技术^[3],在用户侧微电网中的应用日益广泛。国内外学者围绕用户侧储能系统优化问题展开了广泛研究,其研究内容可归纳为4类:储能系统多目标优化调度策略^[4-5]、储能系统优化配置与选址定容^[6]、混合储能系统与多能协同优化^[7-8]、储能系统功率分配与运行控制^[9-10]。文献[4]和[5]聚焦于储能系统在电力系统中的多目标优化调度问题,主要从经济性、环保性和可靠性等维度构建优

收稿日期:2025-06-25;修回日期:2025-09-10

基金项目:国网江苏综合能源服务有限公司科技项目“微电网数智管控系统关键技术研究”(ZHNY2023RD01N)。

化模型;文献[11]和文献[12]致力于储能系统的优化配置与选址定容研究,通过多目标优化方法确定储能系统的最佳容量和位置,以提升配电网的电压质量、降低负荷波动并优化经济性。

为此,本文构建储能系统基本模型,提出了一种面向多目标的微电网储能系统运行优化策略。该策略重点关注经济性、碳排放和新能源消纳等维度,利用Gurobi求解器实现了高效优化,基于实际数据分析,验证了策略的可行性和场景适应性。研究成果可有效指导用户侧微电网开展储能系统运行策略优化实践。

1 微电网储能系统模型

1.1 系统架构

用户侧微电网典型架构如图1所示, T_1 是电网向用户供电的配电变压器,计量用电量的关口表安装在 T_1 的低压侧,负荷 L 等效用户的全部负载,用户配置通常还配置光伏PV和储能ES。负荷的电能可来自电网、光伏、储能及它们的任意组合。

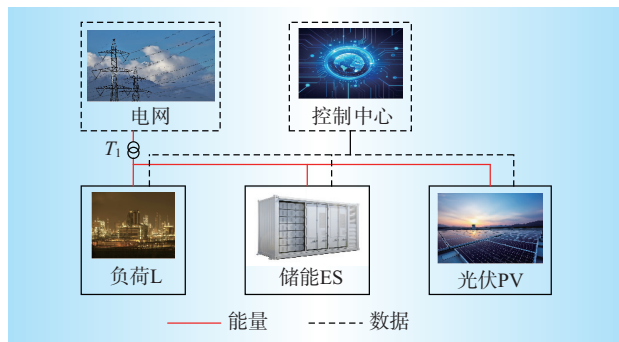


图1 用户侧典型微电网示意

Fig. 1 Schematic of typical user-side microgrid

1.2 储能系统运行模型

1.2.1 充放电状态约束

储能系统在任意 t 时段的状态是充电、放电和备用3种状态中的一种

$$C(t) = \begin{cases} 1 & P_{in}(t) > 0 \\ 0 & P_{in}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$D(t) = \begin{cases} 1 & P_{out}(t) > 0 \\ 0 & P_{out}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$C(t) + D(t) \leq 1 \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{in}(t) \leq P_N^{ES} \\ 0 \leq P_{out}(t) \leq P_N^{ES} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C(t)$ 为 t 时段储能系统的充电状态,1和0分别表示储能系统是否处于充电状态; $D(t)$ 为 t 时段储能系统的放电状态,1和0分别表示储能系统是否处

于放电状态; $P_{in}(t)$ 和 $P_{out}(t)$ 分别为 t 时段储能系统的平均充电功率和平均放电功率; P_N^{ES} 为储能系统的额定功率, kW。

为便于理解,本文在后续表述中定义 $C(t) - D(t)$ 为充放电状态,1和-1分别表示充电和放电状态,0表示储能系统处于待机状态。

1.2.2 充放电过程约束

储能系统在任意时刻的荷电量等于上一时刻的荷电量加(减)该时段的充(放)电量

$$\begin{cases} S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + \frac{\eta_c C(t)P_{in}(t) - \frac{1}{\eta_d} D(t)P_{out}(t)}{NE} \\ S_{OC,min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC,max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为 t 时刻的荷电状态(state of charge, SOC),取值是0到1; η_c 和 η_d 分别为储能系统的充电和放电效率; E 为储能系统的额定容量, kWh。 $0 \leq S_{OC,min} \leq S_{OC,max} \leq 1$,两者分别为储能系统放电停止和充电停止对应的SOC限值。

1.2.3 充放电转换次数约束

储能系统从未充(放)电状态转换到充(放)电状态,视为充(放)电次数增加1次

$$\begin{cases} N_D(t) = N_D(t-1) + D(t)[1 - D(t-1)] \\ N_C(t) = N_C(t-1) + C(t)[1 - C(t-1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $N_D(t)$ 为 t 时刻储能系统的累计充-放电转换次数; $N_C(t)$ 为 t 时刻储能系统的累计放-充电转换次数。 $N_D(t)$ 和 $N_C(t)$ 通常设置为相同数值。

1.2.4 恒功率充放电约束

在连续两个时间段内,储能系统充放电状态不变的情况下,输出功率的值也保持恒定

$$\begin{cases} C(t-1)C(t) - B_c(t-1) = 0 \\ D(t-1)D(t) - B_D(t-1) = 0 \\ B_c(t-1)[P_{in}(t) - P_{in}(t-1)] = 0 \\ B_D(t-1)[P_{out}(t) - P_{out}(t-1)] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $B_c(t)$ 和 $B_D(t)$ 分别为储能系统恒功率充电和放电标志位。

2 微电网储能系统多目标运行优化策略

2.1 微电网运行政策

2.1.1 电价政策

本文研究对象是工商业用户的微电网,我国针对该类用户执行的两部制电价政策,用户的电费由基本电费和电量电费构成。前者由月最大需求和基本电价确定;后者由实时用电量和分时电价确定。

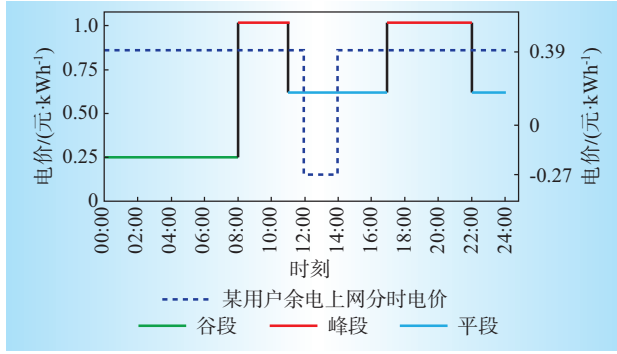


图2 华东某省工商业用户分时电价

Fig. 2 Time-of-use electricity prices for industrial and commercial users in a province of east China

如图2所示实线部分是我国某省的现行分时电价政策,从图2中可以看出,该分时电价政策由峰、谷、平共3个时段组成,分别为1.027 6元/kWh、0.250 1元/kWh和0.597 6元/kWh。电价政策的模型如式(8)所示

$$p_r(t) = \begin{cases} 1.0276 & t \in [8, 11) \cup [17, 22) \\ 0.5976 & t \in [11, 17) \cup [22, 24) \\ 0.2501 & t \in [0, 8) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $p_r(t)$ 为 t 时段的电价,元/kWh。

2.1.2 碳排放政策

对于如图1所示配置储能系统和光伏的微电网,碳排主要来自电网供给微电网的电能。计算某时段的碳排时,通常由该地区的电力平均二氧化碳排放因子(简称:碳排因子)乘以该时段消耗电网的电能确定。如表1所示为华东某省2024年公布的各地市碳排因子。

表1 华东某省地级市电力平均二氧化碳排放因子

Table 1 List of average electricity carbon emission factors for prefecture-level cities in an eastern China province

地市编号	电碳因子/ (kgCO ₂ ·(kWh) ⁻¹)	地市编号	电碳因子/ (kgCO ₂ ·(kWh) ⁻¹)
A	0.642	H	0.336
B	0.677	J	0.417
C	0.689	K	0.658
D	0.653	L	0.723
E	0.631	M	0.563
F	0.623	N	0.590
G	0.171		

碳汇价格在全国范围内是统一的,截至2025年1月15日,过去3个月的碳汇平均价格约为0.103元/kgCO₂。

2.1.3 新能源消纳政策

新能源出力具有随机性,很多地区将其视作垃圾电。电网公司会在特定REOP时段对新能源上网予以经济惩罚,以华东某省实际用户为例,非REOP

微电网余电上网价格为0.391元/kWh。为促进新能源消纳,本文根据专家推荐值在REOP期间按0.270 3元/kWh(实际应用中可由电网和用户协商确定)对用户予以惩罚。如图2蓝色虚线所示为对应的新能源消纳电价模型为

$$p_n(t) = \begin{cases} 0.391, t \notin [t_R, t_S] \\ -0.2703, t \in [t_R, t_S] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p_n(t)$ 为 t 时段新能源上网惩罚因子,元/kWh; t_R 和 t_S 分别为REOP的起始时刻和结束时刻。

2.2 储能系统多目标优化运行模型

2.2.1 微电网运行约束

式(1)~式(7)构建了储能系统运行的模型,在上述基础上,接入微电网的储能系统还应满足交换功率约束和功率平衡约束。

(1) 交换功率约束

关口表在任意 t 时段所测功率是上网功率 $P_{dn}(t)$ 或下网功率 $P_{up}(t)$, $P_{dn}(t)$ 和 $P_{up}(t)$ 都不超过配电变压器是额定容量,且任意时刻两者中至少一个为0

$$\begin{cases} P_{dn}(t)P_{up}(t) = 0 \\ 0 \leq P_{up}(t) \leq P_N^T \\ 0 \leq P_{dn}(t) \leq P_N^T \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_N^T 为配变的额定容量,kVA。

(2) 功率平衡约束

对储能系统接入点而言,任意 t 时刻注入节点的功率等于流出节点的功率

$$P_{pv}(t) + D(t)P_{out}(t) + P_{dn}(t) = P_{up}(t) + C(t)P_{in}(t) + P_{ld}(t) \quad (11)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为 t 时段光伏的平均输出功率,kW; $P_{ld}(t)$ 为 t 时段负荷的平均功率,kW; $P_{in}(t)$ 为 t 时段储能系统的平均充电功率,kW。

2.2.2 经济目标

以每个时段微电网的购电成本与卖电收益之差建立用户的经济目标,目标函数如下

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^T \frac{P_{dn}(t)p_r(t) - P_{up}(t)p_n(t)}{N} \quad (12)$$

式中: T 为优化模型考虑的天数; N 为每天划分的时间段数,例如以15 min为一个时间间隔,则 $N=96$;因此 $N \times T$ 表示优化模型的总时间步数。例如,当 $T=15$ 天、 $N=96$ (每天96个15 min段)时, $N \times T=1440$ 表示模型共覆盖15天的数据; $P_{dn}(t)$ 为在 t 时段微电网从电网获取的平均功率; $P_{up}(t)$ 为 t 时段微电网向电网输送的平均功率,kW; $p_r(t)$ 为 t 时段的电价,元/kWh。

2.2.3 碳排目标

由于无法直接获取每个时刻的碳排,本文引入实时碳排因子,通过电碳关系转换计算碳排。为了

将碳排目标和经济目标置于对等地位,引入碳排价格对碳排目标进行了归一化处理,目标函数如下

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T \frac{P_{in}(t)c(t)p_c(t)}{N} \quad (13)$$

式中: $c(t)$ 为 t 时段的实时碳排因子, kgCO_2/kWh ; $p_c(t)$ 为 t 时段的等效碳汇价格, $\text{元}/\text{kgCO}_2$ 。

2.2.4 新能源消纳目标

新能源消纳的目的是使新能源所发功率尽可能被本地负荷或储能所消耗,使新能源上网电量尽可能小。关口电表处无法直接辨识出新能源和储能所输出功率的占比,需要通过储能的放电状态和其输出功率确定。本文引入新能源上网惩罚因子,用于对未被负荷或储能系统消纳的新能源电量所造成的间接经济损失进行量化建模,并将其作为优化目标之一纳入多目标优化框架中,目标函数如下

$$F_3 = \min \sum_{t=1}^T \frac{P_{up}(t)[1-D(t)] + [P_{up}(t) - P_{out}(t)]D(t)}{N} p_n(t) \quad (14)$$

式中: $D(t)$ 为 t 时段储能系统的放电状态, 1 表示处于放电状态, 0 表示未放电; $P_{up}(t)$ 为 t 时段微电网向电网送电的平均功率, kW ; $P_{out}(t)$ 为 t 时段储能系统输出功率, kW ; $p_n(t)$ 为 t 时段新能源上网惩罚因子, $\text{元}/\text{kWh}$ 。

$D(t)=0$ 时, 关口表所测得功率为全部由新能源提供, 新能源未消纳功率为 $P_{up}(t)$; $D(t)=1$ 时, 新能源上网功率等于关口表所测功率减储能系统输出功率, 未消纳的新能源功率为 $P_{up}(t) - P_{out}(t)$ 。新能源所发功率经储能系统消纳再由后者输出至电网的情况, 本文将该部分电能定义已完全消纳, 储能系统输出至电网功率不再视作新能源出力。

2.2.5 综合目标

综合目标是将经济目标、碳排目标和新能源消纳目标进行加权处理, 由用户根据应用场景自定义权重, 综合目标函数如下

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 \quad (15)$$

式中: α_1 为经济权重; α_2 为碳排权重; α_3 为新能源消纳权重, 满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

2.2.6 优化模型求解

储能系统运行优化的实质是混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 问题, 涉及离散与连续优化变量。本文选用 Gurobi 优化器求解此模型, Gurobi 以高性能和强算法著称, 能高效处理大规模变量与约束, 快速寻得最优解或近似最优解, 通过分支定界法、割平面法等技术缩小搜索空间。

2.3 微电网运行优化策略

如图3所示是微电网运行优化策略流程图, 涵盖参数配置、光伏预测、负荷预测和储能系统运行策略优化共4部分。

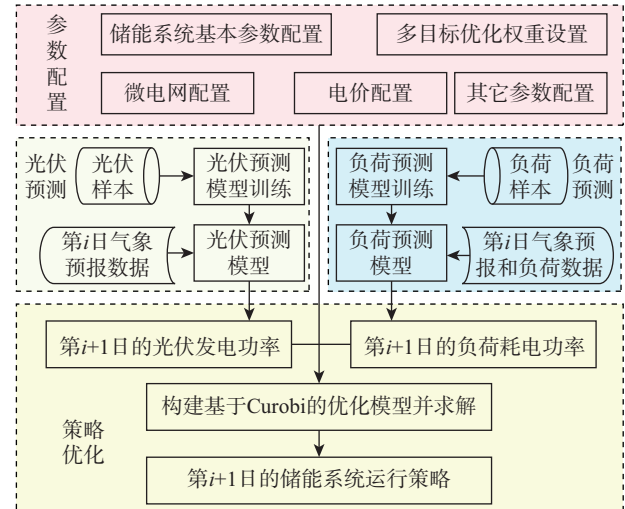


图3 微电网运行优化策略流程

Fig. 3 Flow of microgrid operation optimization strategy

上述所有流程都在第 i 日 24:00 前完成, 流程输出结果为微电网第 $i+1$ 日的储能系统运行策略。根据用户运行目标和政策变化, 同一日可能产生无穷多种实际的储能系统优化运行策略。

3 算例分析

3.1 算例设置

本文算例采用我国华东某省 A 市和华北某省 B 市的实际微电网数据进行分析。其中, A 市的用户类型是工业 (简称 A 用户), 数据时间对应夏季; B 市的用户类型是商业 (简称 B 用户), 数据时间对应冬季。微电网的拓扑结构和分时电价相同, 分别如图 1 和图 2 所示。A 用户配变容量为 12.5 MVA, 光伏总装机功率 6.25 MW; B 用户配变容量为 6 MVA, 光伏总装机功率 2 MW。

如图 4 所示是 A 用户 2024 年 12 月 17 日到 23 日的光伏发电和负荷功率曲线图, 易知: 该用户负荷常年稳定在 3.5 MW 左右, 光伏发电受气象因素的影响较大, 出力具有较大的随机性。所述微电网配备 1 套额定容量 8 MWh 的电池储能系统 (battery energy storage system, BESS), 储能单元采用磷酸铁锂电池。B 用户的光伏出力特性与 A 类似, 其用户有常见的潮汐特性, 其储能配置与 A 用户类似, 它们的相关电气参数配置如表 2 所示。

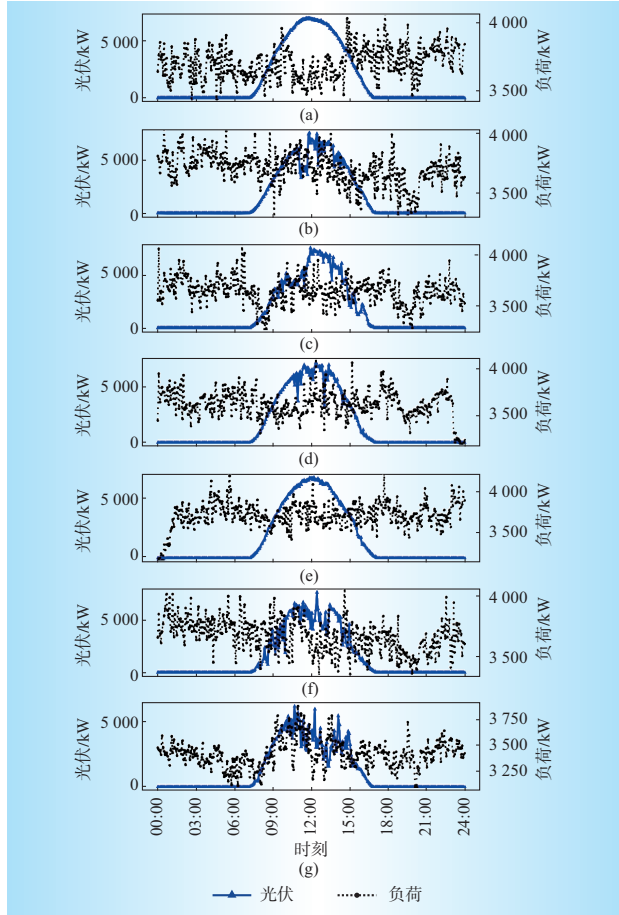


图4 一周内A用户的光伏和负荷功率曲线

Fig. 4 Photovoltaic & load power curves of user A over a week

表2 BESS的参数配置列表

Table 2 Parameter configuration list of BESS

项目	A用户	B用户
额定容量 E_N /kWh	8 000	2 000
额定功率 P_N^{ES} /kW	4 000	1 000
初始SOC/%	5	5
SOC下限/%	5	5
SOC上限	95	95
充电效率 η_c	0.88	0.85
放电效率 η_d	0.90	0.85
充放电次数 N_c / N_d /次	2	2

该用户储能系统运行策略以分时电价为基准,如图5所示是所述储能系统的充放电时序图。储能系统

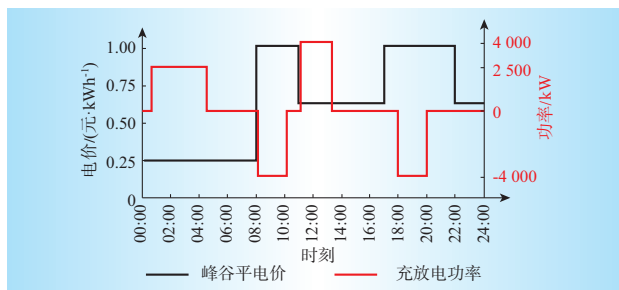


图5 A用户的BESS运行策略

Fig. 5 Operation strategy of BESS for user A

充电时段在分时电价的谷段和平段;储能系统放电时段在分时电价的峰段,以实现最佳的峰谷套利效果。

3.2 结果分析

3.2.1 约束有效性

(1) 充放电转换次数

以图4(a)数据为例,分别设置储能系统的充放电转换次数为1和2,如图6所示是两种定值对应的充放电策略,1和-1分别代表充电和放电。

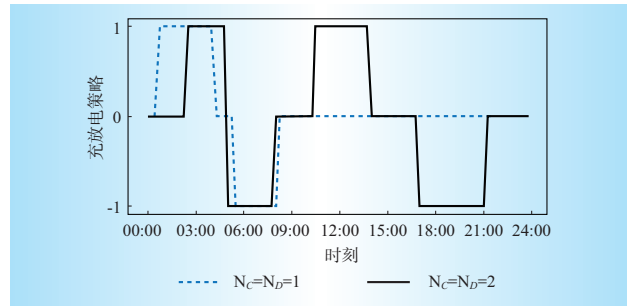


图6 某实际用户BESS运行策略

Fig. 6 Operation strategy of BESS for a real-world user

对比图5和图6可知,式(6)中对储能系统充放电转换次数的约束是有效的。

(2) 恒功率充放电

设置A用户储能系统恒功率充放电, $\alpha_1=1$, $\alpha_2=\alpha_3=0$,对应的储能系统运行优化策略如图7所示。

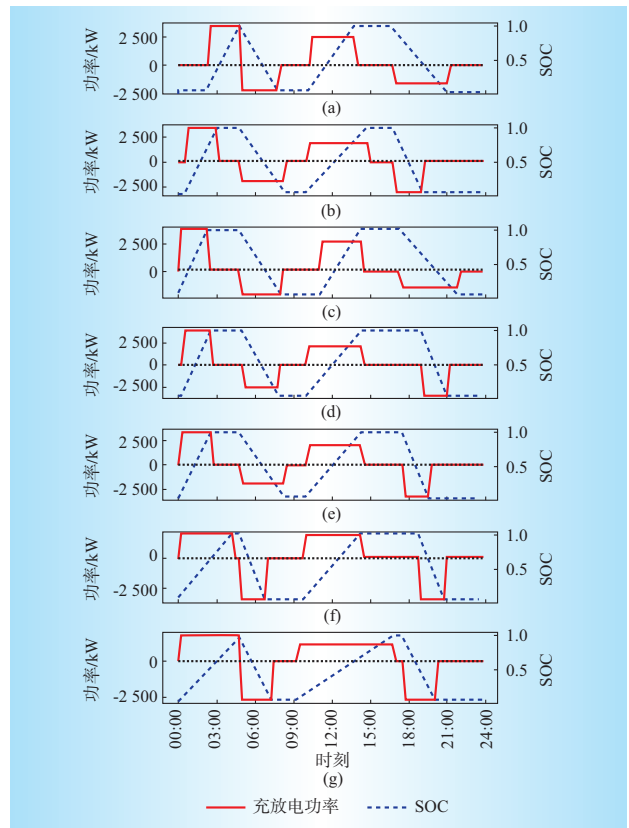


图7 BESS恒功率充放电运行结果

Fig. 7 Operation of BESS under constant power (dis) charging

图7和图4的各子图数据一一对应,红色实线是储能系统的充放电功率,黑色虚线是储能系统的SOC。由图7可知,当启用恒功率充放电约束后,储能系统在同一充(放)电周期内将维持恒定的充(放)功率,这有利于延长储能系统的退役时间并提高微电网的系统稳定性。在本章的后续算例中,若无特殊说明,默认设置储能系统以恒功率充放电方式运行。

3.2.2 现有策略对比

A用户当前的运行目标仅考虑经济性,本文仅关注经济性的储能系统运行优化策略如图7中红色实线所示。结合图2中的电价政策,统计A和B用户在一周内优化前后的电费支出及其成本降低百分比结果分别如图8(a)和图8(b)所示。蓝色和绿色柱状图分别是储能系统优化前和优化后的用户电费支出,红色折线是优化后用户成本降低的百分比。

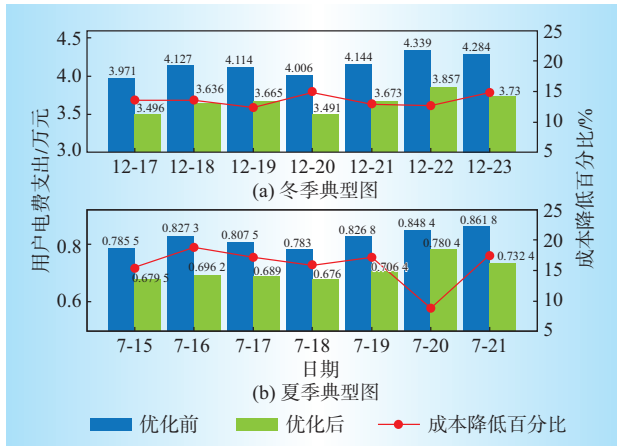


图8 优化前后用户电费支出统计

Fig. 8 Electricity bills statistics before and after optimization

由图8可看出,与原有的储能系统运行策略相比,以优化策略运行后A和B用户的电费支出明显降低。A用户成本降低百分比最大值发生在12月23日,用户电费支出降低14.8482%;最小值发生在12月19日,用户电费支出降低12.2516%;一周内用户电费支出平均降低13.4676%。除7月20日外,其余日期的电费降低均超15%。初步分析是由于该日为周六,用户的负荷过高,调节能力受到一定限制。

3.2.3 多目标优化运行

以图4(a)中12月17日数据为例,以0.1、0.2和0.7为权重因子,通过排列组合得到6种场景的权重因子组合 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 。如表3所示是6种不同场景对应的单一目标值 (F_1, F_2, F_3) 及考虑多目标最优的综合权重值 F ,其中 F_1 列对应经济目标,与图8所示数据基本相当; F_1 和 F_2 列分别对应碳排放目标和新能源消纳目标。

表3 不同权重组合下多目标优化运行结果

Table 3 Multi-objective optimization results under weights

场景	α_1	α_2	α_3	F_1 /万元	F_2 /万元	F_3 /万元	F /万元
1	0.7	0.1	0.2	3.523	0.374	-0.347	2.434
2	0.7	0.2	0.1	3.523	0.374	-0.347	2.506
3	0.2	0.7	0.1	3.546	0.371	-0.400	0.929
4	0.1	0.7	0.2	3.637	0.372	-0.478	0.528
5	0.1	0.2	0.7	4.084	0.387	-0.649	0.031
6	0.2	0.1	0.7	4.084	0.387	-0.649	0.401

从表3可看出:当 α_1 权重最大时(场景1和2), F_1 列对应的值最小;当 α_2 权重最大时(场景3和4), F_2 列对应的值最小;当 α_3 权重最大时(场景5和6), F_3 列对应的值最小。因此,所提针对微电网储能系统运行的优化策略对用户的多目标运行是有效的。

3.2.4 辅助政策制定

近年来,光伏并网容量剧增,越来越多的配电变压器出现了反向潮流。合理设置 t_R 和 t_S 的时刻,可促进配电变压器反向潮流的改善。令 $t_R = 13 - i$, $t_S = 13 + i$ ($i = 1, 2, 3, 4$);非REOP余电上网价格为0,REOP余电上网价格为 $-p_n(t)$;设置权重 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = 1$ 。如表4所示是该用户在一周内不同REOP起止时间对应的微电网上网电量。

表4 不同REOP时间窗对应的上网电量统计

Table 4 Statistics of grid-connected electricity generation under different reop time windows

日期	MWh			
	12:00—14:00	11:00—15:00	10:00—16:00	09:00—17:00
12月17日	7.2773	5.8396	6.1782	7.7792
12月18日	5.2590	3.7375	3.9694	7.0036
12月19日	3.2899	2.8414	5.9685	6.0878
12月20日	4.0381	3.7808	5.4005	6.0945
12月21日	4.8450	3.5450	3.9570	6.0610
12月22日	4.8911	2.6860	3.8720	4.4400
12月23日	3.5481	4.1160	4.5489	4.0350

由表4数据可看出,除12月23日外,该周内微电网上网电量最小的REOP方案为11:00—15:00。整体而言,第5列比第4列的结果更大。当REOP时间窗越大时,上网电量抑制效果并非越好。

基于上述思路,本文以13:00为中心、15 min为步进增大REOP,设置12组时间窗 $[t_R, t_S]$ 。利用该用户2024年5月26日到12月31日的实际负荷和光伏数据开展微电网上网优化,计算每日12个时间窗对应的上网总电量,选择日电量最小值对应的时间窗为当日最优REOP。如图9所示是各时间窗对应的最优REOP占比,其中时间窗[11:15, 14:45]的占比高到71.182%,建议设为REOP时段。

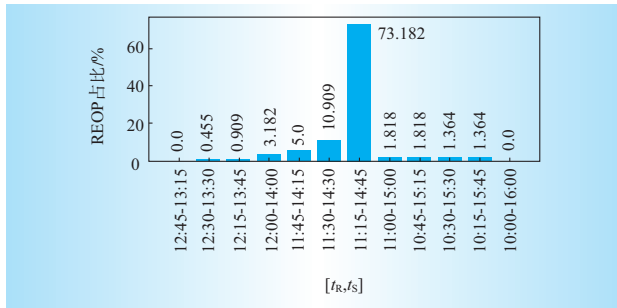


图9 各时间窗对应的最优REOP占比

Fig. 9 Optimal REOP ratios for different time windows

4 结束语

本文首先构建了储能系统的基本控制模型,并基于此提出了面向用户主观需求的微电网多目标运行优化策略。从经济目标、碳排目标和新能源消纳目标等方面对运行策略优化进行了研究,利用Gurobi求解器提升优化效率。基于我国华东某省A市实际用户数据进行了仿真验证,结果表明:

(1) 本文构建的储能系统控制模型实现了与实际用户侧储能系统相同的约束效果,该模型可用于实际用户的储能系统运行策略优化,有助于促进研究成果的实践应用。

(2) 从用户的电费支出成本方面,所提微电网储能系统优化策略可在用户现有策略的基础上平均降低13.4676%,一定程度上受益于高精度的负荷和光伏预测模型。

(3) 所提优化策略可辅助制定用户侧微电网的余电上网政策,改善配电变压器反向潮流,提高配电网的安全稳定性。D

参考文献:

[1] 舒印彪,张正陵,汤涌,等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8 327-8 341.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8 327-8 341.

[2] ROSTAMNEZHAD Z, MARY N, DESSAINT L-A, MONFET D. Electricity consumption optimization using thermal and battery energy storage systems in buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 251-265.

[3] 杨国山,董鹏旭,姚苏航,等. 基于深度强化学习算法的储能系统盈利策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(2): 20-26.
YANG Guoshan, DONG Pengxu, YAO Suhang, et al. Study on the profitability model of energy storage system considering incentive strategy [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(2): 20-26.

[4] ZHANG J, ZHANG N, GE Y. Energy storage placements for renewable energy fluctuations: A practical study[J].

IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4916-4927.

[5] 林雨眠,熊厚博,张笑演,等. 计及新能源机会约束与虚拟储能的电-热系统分布式多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5 042-5 059.
LIN Yumian, XIONG Houbo, ZHANG Xiaoyan, et al. Distributed multi-objective optimal scheduling of integrated electric-heat system considering chance constraint of new energy and virtual storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5 042-5 059.

[6] 卢子敬,李子寿,郭相国,等. 基于多目标人工蜂鸟算法的电-氢混合储能系统最优配置[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 33-42.
LU Zijing, LI Zishou, GUO Xiangguo, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system based on multi-objective artificial hummingbird algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 33-42.

[7] 杨天鑫,黄云辉,唐金锐,等. 高比例新能源下含调频控制的储能系统多目标优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2 744-2 753.
YANG Tianxin, HUANG Yunhui, TANG Jinrui, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with frequency regulation control under high proportion of renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2 744-2 753.

[8] 叶飞,顾晨. 基于合作博弈的微网储能容量优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(5): 11-16.
YE Fei, GU Chen. Optimal allocation of microgrid energy storage capacity based on cooperative game [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(5): 11-16.

[9] 张驰,周骏,赵镔,等. 零碳园区电-氢混合储能系统多目标优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 1-12.
ZHANG Chi, ZHOU Jun, ZHAO Bin, et al. Multi-objective optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in zero-carbon park [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 1-12.

[10] 刘红锐,张开翔,尹荣,等. 一种大规模蓄电池储能系统多目标并行有源能量均衡器[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 41-47.
LIU Hongrui, ZHANG Kaixiang, YIN Rong, et al. Multi-objective parallel active energy equalizer for large-scale battery energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 41-47.

[11] 陈薇,狄那,邱亚,等. VRB储能系统多目标优化功率分配策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1 518-1 527.
CHEN Wei, DI Na, QIU Ya, et al. Power distribution strategy based on multi-objective optimization of vanadium redox battery energy storage systems [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1 518-1 527.

[12] 康卫伟,熊小平,吴子博,等. 基于双层优化的工业园区集中-分布需求响应机制[J]. 供用电, 2024, 41(10): 84-93.
KANG Weiwei, XIONG Xiaoping, WU Zibo, et al. Centralized and distributed demand response mechanism of industrial parks based on double-layer optimization [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10): 84-93.

作者简介:

叶飞(1990),男,硕士,高级工程师,主要从事新能源建模与并网控制、微电网优化运行工作;
江南(1990),男,硕士,高级工程师,主要从事综合能源系统设计开发工作;
陆彬(1988),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统分析与控制工作;
梁世杰(1991),男,硕士,工程师,主要从事微电网开发与管理。

(责任编辑 安然)