

# 基于联合虚拟储能系统的 海岛微电网协同优化策略

李东东, 陈天旭, 沈运帷\*, 林顺富

(上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090)

## Collaborative Optimization of Island Microgrid Based on Joint Virtual Energy Storage System Strategy

LI Dongdong, CHEN Tianxu, SHEN Yunwei\*, LIN Shunfu

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

**ABSTRACT:** While the proportion of renewable energy connected to the grid gradually increases, the user side load also increases year by year. As an effective way of distributed new energy consumption, microgrid also faces great challenges in its power balance. In order to give full play to the regulation potential of user-side flexible load, and further consider the benefit distribution problem when market players such as micro-grid operators, energy storage operators and adjustable users participate in electric energy trading, this paper proposes a multi-agent game optimization scheduling strategy for island micro-grid considering virtual energy storage system. First, according to the air conditioning load and the operating characteristics of electric vehicles, the heat storage characteristics of buildings and the charge-discharge characteristics of electric vehicles are analyzed, and a joint virtual energy storage system including air conditioning load and electric vehicles is established. Secondly, considering the different interest demands of the three parties of source, charge and storage under the market environment, the transaction mode and mathematical model of each subject are constructed with the micro-grid operator as the leader and the energy storage operator and user as the follower, and the distributed collaborative optimization model of one master and many slaves is established. Finally, a numerical example is given to verify the effectiveness of the proposed method, i.e., while taking into account the interests of multiple agents, it can

effectively reduce the peak-valley difference and reduce the regional power system's dependence on traditional energy storage equipment, thus saving the investment cost.

**KEY WORDS:** virtual energy storage; master-slave game; island microgrid; generalized load

**摘要:** 可再生能源并网比例逐渐提高的同时, 用户侧负荷也在逐年增长。微电网作为分布式新能源消纳的有效方式, 其电力电量平衡也面临着巨大挑战。为充分发挥用户侧广义负荷的调控潜力, 同时进一步考虑微网运营商、储能运营商以及可调节用户等市场主体参与电能交易时的利益分配问题, 该文提出一种考虑虚拟储能系统的海岛微电网多主体博弈的优化调度策略。首先, 根据空调负荷、电动汽车的运行特性, 分析建筑物的蓄热特性以及电动汽车的充放电特性, 建立一种包括空调负荷和电动汽车的联合虚拟储能系统。其次, 考虑市场环境下游-荷-储三方利益诉求不同的问题, 以微网运营商为领导者, 储能运营商和用户为跟随者, 构建各主体的交易模式和数学模型, 建立一主多从的分布式协同优化模型。最后, 通过算例验证所提方法的有效性, 即在兼顾多主体利益的同时, 能够有效减小峰谷差, 减少区域电力系统对传统储能设备的依赖, 从而节约投资成本。

**关键词:** 虚拟储能; 主从博弈; 海岛微电网; 广义负荷

## 0 引言

保障我国众多海岛的正常供电, 是海洋经济长期稳定发展的必然要求<sup>[1]</sup>。传统的海岛供电方式是在海底铺设电缆或者采用柴油发电机进行供电。海底电缆铺设成本高、维修困难, 柴油发电机的长期使用会给当地的生态环境造成恶劣的影响<sup>[2]</sup>。为此, 我国颁布了《中华人民共和国海岛保护法》, 明确指出要优先利用海岛地区丰富的风能、太阳能等可

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51977128); 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1414700); 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”(21CGA64)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977128); Shanghai Sailing Program (21YF1414700); “Chen Guang” Project Supported by Shanghai Municipal Education Commission and Shanghai Education Development Foundation (21CGA64).

再生能源(renewable energy source, RES)<sup>[3]</sup>。海岛微电网可以有效灵活利用 RES, 减少弃风弃光现象, 同时减少化石燃料机组的使用, 助力双碳目标的实现, 近年来受到学者的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

随着经济的不断发展, 用户侧分布式负荷正在快速增长, 大量温控负荷、电动汽车、分布式储能等广义负荷作为新型电力系统的重要组成部分, 愈显灵活多变。截止 2022 年底, 我国电动汽车的保有量已经达到 1310 万辆, 相较于 2021 年, 增长了 67.13%<sup>[6]</sup>, 预计 2035 年电动汽车的普及率达到 30%<sup>[7]</sup>。空调负荷在夏冬两季已占城市电网尖峰负荷的 40%~50%, 且据估计空调负荷容量在 2050 年将达到 3.7 亿千瓦左右<sup>[8]</sup>。因此, 将广义负荷、储能等用户侧资源协同起来为电网提供辅助服务的潜力巨大<sup>[9]</sup>。

利用电动汽车入网(vehicle to grid, V2G)技术<sup>[8]</sup>, 除了可以作为负荷消耗电能, 还可以作为“电源”向电网发出电能; 空调-建筑物系统因为具有热惯性<sup>[11]</sup>, 温度不会随着空调制冷量变化而迅速随之改变, 可以在短时间内改变其电功率而不会影响人体的热舒适度。这种兼具发电和用电双重属性的广义负荷, 在一定程度上可以实现某个时段用能需求的增加或减少, 平衡电力系统能量, 与实体储能有异曲同工之处, 因此可以称之为虚拟储能<sup>[12-13]</sup>。文献[14]将空调虚拟储能纳入日前决策与实时调整两个阶段调控当中, 提出产消者最优申报及调度策略, 尽可能减小因光伏出力随机性带来的不利影响以及运行成本。文献[15]为有效利用供水子系统储水特性与供热子系统储热水特性所带来的灵活性, 定义其虚拟充放电功率、虚拟电容量和虚拟荷电状态 3 项虚拟储能参数。文献[16]在日前阶段, 建立有效快捷的电动汽车充放电管理模型, 对广义储能中的电动汽车充放电进行优化。上述研究均是微电网运行优化行之有效的方法, 但随着能源市场逐渐向交互竞争型结构转变, 微网运营商、储能运营商、用户等不同主体之间的利益冲突也逐渐凸显, 如何保障各方利益是目前微电网调度中亟需解决的难题。

微电网的高效运行依赖微网运营商、用户等多主体的协同配合, 核心问题就是解决如何描述复杂系统和不同主体之间的交互行为<sup>[17-18]</sup>, 即微网运营商首先制定售电价格, 用户根据电价制定合理的用电策略。主从博弈是一种解决存在先后顺序, 符合

主从递阶结构的动态互动过程的行之有效方法<sup>[19]</sup>, 所以非常适合解决市场环境下微网中各主体利益诉求不同且交互行为存在明显先后顺序的问题。

文献[20]基于主从博弈理论, 既考虑不同园区之间的信息交流, 又考虑园区与能源供应商之间的信息交流, 实现综合能源系统的分层分区协同优化。文献[21]确立配电网投资运营商与综合能源系统投资运营商在供需互动下的主从博弈关系, 提高了各主体的经济效益。然而灵活终端用户需要在考虑自身获取效能和满意度的同时自主参与能源市场, 上述优化方法忽略了负荷的灵活性和主动性。文献[22]以负荷聚合商为领导者, 广义负荷和分布式电源运营商为跟随者, 建立多主体主从博弈经济优化模型, 在保证各主体经济性的同时提高了新能源利用率。文献[23]基于 Stackelberg 博弈, 考虑供需两侧的互动机制, 以供电侧为领导者, 用户作为跟随者, 在实现供需两侧协调互动的同时, 保证双方的利益最大化。文献[24]提出一种基于综合需求响应和主从博弈优化调度策略, 兼顾多微网系统和用户的利益。上述研究主要对电源侧和负荷侧的主从博弈互动进行一定深入分析, 但未考虑储能侧的利益, 忽略了储能系统对微网内部交易的影响。

基于上述背景, 本文以海岛微电网为研究对象, 利用空调负荷和电动汽车的虚拟储能特性, 建立联合虚拟储能模型。然后, 提出一种基于联合虚拟储能系统的微电网主从博弈优化调度策略, 平衡各主体参与电力市场所获利益, 实现源-荷-储的协同运行。本文的主要创新点如下:

- 1) 根据热力学模型和人体舒适度模型, 分析建筑等效热阻、设定温度等因素与虚拟储能特性指标之间的耦合关系, 在此基础上考虑热交换与室外温度的影响对其进行修正, 并建立包含电动汽车和空调负荷的联合虚拟储能模型;

- 2) 以微网运营商为领导者、储能运营商和用户为跟随者, 提出一种兼顾源-荷-储三方利益的主从博弈模型, 优化微网运营商的电价信息、储能运营商的充放电策略以及用户用电策略, 并对博弈均衡解的存在性和唯一性进行分析论证;

- 3) 通过算例分析验证引入虚拟储能和主从博弈模型对微电网内各主体的效益均衡提升和减少对实体储能依赖性的作用, 以及该策略在实际应用中不同风况、不同负荷需求场景下的适用性。

# 1 海岛微电网架构及主从博弈框架

## 1.1 微电网结构

本文以福建宁德某海岛为研究对象，其微电网系统如图1所示。考虑到岛上风力资源丰富，风力发电宜作为微电网主力电源，也是微电网主要收益来源。目前岛上安装3台风电机组，每台风电机组的额定功率为2MW。同时，该岛湿气、盐雾较重，暂时不考虑光伏供电。储能系统配置主要考虑微电网离网运行时与风电机组配合，满足保障西洋岛用户供电的需求，配备储能容量为2MW/4MW·h。由于岛上最高负荷约2.8MW，现有配置盛风期可覆盖海岛中远期的负荷发展需求；弱风期电力可能会有一定缺额，但海岛电能通过双回路海缆进行传输，因此可以从市级电网买卖电能。同时，岛上还有一部分空调和电动汽车负荷可以作为灵活调控资源。电动汽车和空调均具有“源荷”双重属性，故可作为虚拟储能单元参与微网调度。电动汽车受用户的意愿影响较大，空调储能不能连续地进行充放电，所以二者可以实现优势互补，更加合理地完成海岛微电网功率平衡需求。

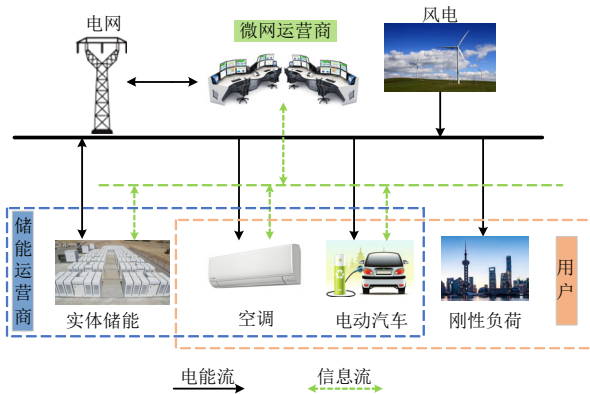


图1 微电网架构图

Fig. 1 Microgrid architecture diagram

## 1.2 多主体博弈互动框架

考虑到微网内部参与交互竞争型的市场交易时，微网运营商、储能运营商、用户属于不同的利益主体，建立主从博弈调度框架，如图2所示。各主体在分别追求自身效益最大化的同时进行博弈互动，经过有限次的迭代过程，直到微网运营商接受储能运营商和用户的最优响应策略为止。

微网运营商是一个双向电能流动的枢纽，是微电网的管理者。作为主从博弈中的领导者，微网运营商不仅可以为下层跟随者提供电能，还可以与上级电网进行交互，以保证微电网的功率平衡。日前阶段微网运营商根据风电机组出力和负荷需求等

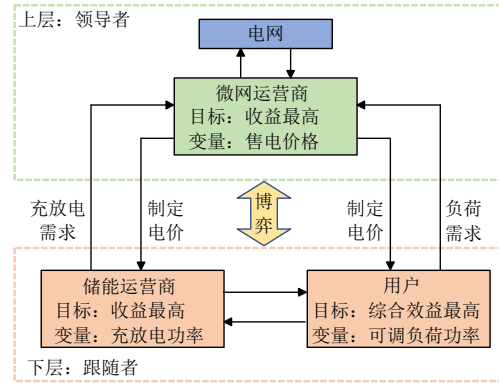


图2 多主体主从博弈框架

Fig. 2 Multi-agent master-slave game framework

实际情况，在微网内部优化电价，通过出售电能获取收益。微网运营商制定的售电价格更加灵活，可以更加有效地引导用户侧广义负荷参与调度。

储能运营商和用户为跟随者。储能运营商包括实体储能和虚拟储能，可以协调微网运营商与用户之间的供需平衡，根据售电价格的不同，在二者之间通过“低充高放”的策略安排充放电计划，从而获取收益。用户综合考虑用电成本和用电舒适度，通过合理调度一定的可调负荷使得综合效益最大，在保障用户舒适度的同时，减少用电成本。

## 2 联合虚拟储能系统构建

### 2.1 空调负荷模型

考虑室内外温差造成的热量消耗，太阳热辐射，建筑内人体及设备的发热量以及制冷设备的制冷量等影响建筑物内部热量的主要因素，有如下热平衡方程：

$$(K_{wall} S_{wall} (T_{out}^t - T_{in}^t) + K_{win} S_{win} (T_{out}^t - T_{in}^t) + G^t S_{win} S_c + P_{in}^t - P_{AC}^t) \Delta t = \rho V C (T_{in}^{t+1} - T_{in}^t) \quad (1)$$

式中： $K_{wall}$ 表示外墙传热系数； $S_{wall}$ 表示外墙面积； $T_{out}^t$ 表示 $t$ 时刻的室外温度； $T_{in}^t$ 表示 $t$ 时刻的室内温度； $K_{win}$ 表示外窗传热系数； $S_{win}$ 表示外窗传热面积； $P_{in}^t$ 表示 $t$ 时刻的建筑物内热源的发热功率； $G^t$ 表示 $t$ 时刻的太阳辐射强度； $P_{AC}^t$ 表示 $t$ 时刻制冷设备的制冷功率； $\rho$ 表示空气密度； $V$ 表示室内空气容量； $C$ 表示空气比热容。

人体对热量的感知具有一定的模糊性，为一个区间值。本文采用热感觉平均标度预测(predicted mean vote, PMV)指标来表征人体对周围环境温度的要求。PMV计算公式如下：

$$I_{PMV} = 2.43 - \frac{3.76(T_s - T_{in}^t)}{M(I_{cl} + 0.1)} \quad (2)$$

式中： $M$  表示人体能量代谢率； $I_{cl}$  表示服装的热阻； $T_s$  表示人体皮肤在舒适状态下的平均温度。

PMV 的值  $I_{pWV}$  与人体感受的关系如表 1 所示。

《GB 50019-2016 采暖通风与空气调节设计规范》规定  $I_{pWV}$  在  $\pm 1$  范围内，可以满足夏季人体舒适度需求。

表 1 PMV 值与人体舒适度关系

Table 1 Relationship between IPWM and human comfort

热感觉	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
$I_{PMV}$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

## 2.2 电动汽车模型

电动汽车具有源荷双重属性，既可以向微网充电，又可以向微网放电，类似于储能系统，其模型与实体储能类似：

$$S_{OC-EV}^{t+1} = S_{OC-EV}^t + P_{EV,ch}^t \eta_{EV,ch} - \frac{P_{EV,dis}^t}{\eta_{EV,dis}} \quad (3)$$

式中： $S_{OC-EV}^t$  表示  $t$  时刻电动汽车的荷电状态； $P_{EV,ch}^t$  和  $P_{EV,dis}^t$  分别表示  $t$  时刻的充电功率和放电功率； $\eta_{EV,ch}$  和  $\eta_{EV,dis}$  分别表示充电效率和放电效率。

考虑到电动汽车有较多的不确定性，如接入与驶离时间、日行驶里程数等，为了保证不影响用户的正常使用，有如下约束：

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{OC-EV\_min} \leq S_{OC-EV}^t \leq S_{OC-EV\_max} \\ P_{EV,ch}^t = P_{EV,dis}^t = 0, t \notin [t^{ar}, t^{lea}] \\ \mu_{ch}^t P_{EV,ch\_min} \leq P_{EV,ch}^t \leq \mu_{ch}^t P_{EV,ch\_max} \\ \mu_{dis}^t P_{EV,dis\_min} \leq P_{EV,dis}^t \leq \mu_{dis}^t P_{EV,dis\_max} \\ \mu_{ch}^t + \mu_{dis}^t \leq 1 \\ S_{OC-EV}^W = \frac{\omega e}{B} \\ (S_{OC-EV\_min} + S_{OC-EV}^W) \leq S_{OC-EV}^{lea} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中： $S_{OC-EV\_min}$  和  $S_{OC-EV\_max}$  分别表示荷电状态的最小值和最大值； $t^{ar}$  和  $t^{lea}$  分别表示电动汽车的接入与驶离电网的时间； $P_{EV,ch\_min}$  和  $P_{EV,ch\_max}$  分别表示充电功率的最小值和最大值； $P_{EV,dis\_min}$  和  $P_{EV,dis\_max}$  分别表示放电功率的最小值和最大值； $\mu_{ch}$  和  $\mu_{dis}$  分别表示充电状态和放电状态，是为 1，否为 0； $\omega$  表示电动汽车的日行驶里程； $e$  表示电动汽车行驶百公里耗电量； $B$  表示电动汽车电池容量。为不影响用户的用车习惯，其日行驶里程数所需荷电状态  $S_{OC-EV}^W$  与最小荷电状态之和必须小于驶离时荷电状态  $S_{OC-EV}^{lea}$ 。

## 2.3 虚拟储能模型

由于电动汽车模型与实体储能类似，本文主要介绍空调虚拟储能模型。目前，为了分析空调-建筑系统虚拟储能特性，通常简化成一阶等效热参数模型<sup>[25]</sup>(equivalent thermal parameter, ETP)，详细推导见附录 A。

$t$  时刻空调的虚拟储电量为

$$E_{AC}^t = \begin{cases} T_{max} - T_{in}^t \\ \eta_{AC} R_E \end{cases} \quad (5)$$

式中  $T_{max}$  和  $T_{min}$  分别表示满足人体舒适度要求的温度上下限。

空调虚拟储能的额定储电量为从  $T_{min}$  升至  $T_{max}$  消耗的电功率：

$$E_{N,AC} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\eta_{AC} R_E} \quad (6)$$

空调虚拟储能的荷电状态为

$$S_{OC-AC}^t = \begin{cases} T_{max} - T_{in}^t \\ T_{max} - T_{min} \end{cases} \quad (7)$$

由上述推导可知，空调虚拟储能的储电量与温度上限和室内温度的差值成正比，与空调的运行效率和空调-建筑系统的等效热阻的乘积成反比。通过室内温度和满足人体舒适度要求的上下限温度可以分析空调虚拟储能的荷电状态，了解其调节能力。

在实际应用中，由式(1)可知，建筑与外界环境的热交换、室外温度都会影响空调电功率，所以需要修正额定储电量进行修正。本文仅考虑夏季制冷工况。

1) 建筑与外界环境的热交换主要包括热对流、热传导以及热储存<sup>[26-27]</sup>。热对流包括室内空气与建筑内表面之间的强制对流和室外空气与建筑外表面之间的自然对流：

$$\begin{cases} Q_{d\_in} = k_d S (T_{in} - T_A) \\ Q_{d\_out} = k_d S (T_{out} - T_B) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $Q_{d\_in}$  和  $Q_{d\_out}$  分别表示室内空气与建筑内表面之间的强制对流和室外空气与建筑外表面之间的自然对流传递的热量； $k_d$  表示对流传热系数； $S$  表示建筑的表面积； $T_A$  和  $T_B$  分别表示建筑内外表面温度。

由于建筑内外表面存在温度差，热量会从温度较高的外表面传递给温度较低的内表面：

$$Q_c = k_c \frac{S}{D} (T_B - T_A) \quad (9)$$

式中： $Q_c$ 表示传导的热量； $k_c$ 表示建筑围护结构的导热系数； $D$ 表示建筑围护结构的厚度。

在通过建筑围护结构传递热量的过程中，会有部分热量存储在围护结构当中：

$$Q_m = cm(T_B - T_A) \quad (10)$$

式中： $Q_m$ 表示建筑围护结构储存的热量； $c$ 表示建筑围护材料的比热容； $m$ 为材料的质量。

由式(8)–(10)，可得到修正之后的虚拟储电量为

$$E_{AC,xz}^t = \frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{out} - T_{in}) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right] \quad (11)$$

2) 当外界温度  $T_{out}$  低于温度设定值  $T_{set}$  时，空调停止工作；当  $T_{out}$  高于  $T_{set}$  (此时  $T_{out}$  高于温度下限  $T_{min}$ ) 且小于温度上限  $T_{max}$  时，空调开始工作，但此时室内温度  $T_{in}$  可升至的最高值不再是  $T_{max}$ ，而是外界温度  $T_{out}$ ；当  $T_{out}$  高于  $T_{max}$  时，室内温度最高可升至  $T_{max}$ 。故温度设定值有如下几种情况：

$$S_{OC-virtual}^t = \begin{cases} \frac{\frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{out}^t - T_{in}^t) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right] + E_{EV}^t}{\frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{max} - T_{min}) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right] + E_{N,EV}^t}, & T_{set} < T_{out}^t < T_{max} \\ \frac{\frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{max} - T_{in}^t) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right] + E_{EV}^t}{\frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{max} - T_{min}) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right] + E_{N,EV}^t}, & T_{out}^t > T_{max} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $S_{OC-virtual}^t$ 表示  $t$  时刻的虚拟储能系统的荷电状态； $E_{EV}^t$ 表示  $t$  时刻的电动汽车虚拟储能系统的储电量容量； $E_{N,EV}$ 表示电动汽车的电池额定容量。联合虚拟储能系统充放电功率为

$$P_{virtual} = P_{virtual}^{before} - P_{virtual}^{after} \quad (15)$$

式中： $P_{virtual}$ 表示虚拟储能系统的充放电功率，放电为正，充电为负； $P_{virtual}^{before}$ 表示考虑联合虚拟储能系统之前消耗的功率； $P_{virtual}^{after}$ 表示考虑联合虚拟储能系统之后消耗的功率。

### 3 多主体主从博弈模型

#### 3.1 微网运营商

##### 3.1.1 微网运营商目标函数

微网运营商的目标函数如下所示：

$$\begin{cases} \max f_{ier} = \sum_{t=1}^T C_{cell}^t - C_{grid}^t \\ C_{sell}^t = R_c^t P_{DL}^t \\ C_{grid}^t = \max(P_{grid}^t, 0) \cdot R_{grid,s}^t + \min(P_{grid}^t, 0) \cdot R_{grid,b}^t \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} T_{min} < T_{set}^t < T_{out}^t, & T_{out}^t < T_{min} \\ T_{min} < T_{set}^t < T_{out}^t, & T_{min} < T_{out}^t < T_{max} \\ T_{min} < T_{set}^t < T_{max}^t, & T_{max} < T_{out}^t \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得到修正之后的空调虚拟储能量：

$$E_{N,AC} = \begin{cases} 0, & T_{out}^t < T_{set} \\ \frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{out} - T_{min}) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right], & T_{set} < T_{out}^t < T_{max} \\ \frac{1}{\eta} \left[ \left( \frac{1}{R_E} - k_d S \right) (T_{max} - T_{in}) + (k_d S + k_c \frac{S}{D} - cm)(T_B - T_A) \right], & T_{out}^t > T_{max} \end{cases} \quad (13)$$

当外界温度低于温度上限且高于设定温度时，虚拟储能的额定储电量随着外界温度的上升而增加，当外界温度高于温度上限时，其额定储电量与外界温度无关。由此可见，虚拟储能与室外温度密切相关，有很强的时效性。

联合虚拟储能系统的荷电状态为

式中： $C_{sell}^t$ 表示  $t$  时刻微网运营商的售电收益； $C_{grid}^t$ 表示  $t$  时刻的微网运营商与上级电网的交互成本； $R_c^t$ 表示  $t$  时刻的购电价格； $P_{DL}^t$ 表示  $t$  时刻总的电负荷； $P_{grid}^t$ 表示  $t$  时刻与电网的交互功率，当  $P_{grid}^t$  大于 0 时表示从上级电网购买电能，小于 0 表示向上级电网出售电能； $P_{grid,s}^t$ 表示微网运营商与上级电网的购电价格； $P_{grid,b}^t$ 表示上网电价。

##### 3.1.2 约束条件

###### 1) 电网交互约束。

微网运营商与电网之间的功率应满足上下限约束：

$$\begin{cases} 0 \leq \max(P_{grid}^t, 0) \leq P_{gb\_max} \\ P_{gs\_max} \leq \min(P_{grid}^t, 0) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_{gb\_max}$ 表示上级电网输送给微网的最大功率； $P_{gs\_max}$ 表示微网输送给上级电网的最大功率。

###### 2) 售能价格约束。

$$\begin{cases} R_{e\_min} \leq R_e^t \leq R_{e\_max} \\ \sum_{t=1}^T R_e^t \leq T \bar{R}_{e\_max}^t \end{cases} \quad (18)$$

式中： $R_{e\_min}$  和  $R_{e\_max}$  分别表示微网内部电价的上限和下限； $\bar{R}_{e\_max}^t$  表示  $t$  时刻的平均售电价格上限。

### 3.2 储能运营商

#### 3.2.1 储能运营商目标函数

储能运营商依靠“低价充能，高价放能”获取收益，包括实体储能和虚拟储能。其目标函数为

$$\begin{cases} \max f_{cer} = \sum_{t=1}^T (C_{BT}^t + C_{virtual}^t - C_m^t) \\ C_{BT}^t = R_e^t P_{BT,dis}^t - R_e^t P_{BT,ch}^t \\ C_{virtual}^t = (\lambda + R_e^t)(P_{virtual,dis}^t - P_{virtual,ch}^t) \\ C_m^t = \alpha_{BT}(P_{BT,dis}^t + P_{BT,ch}^t) + P_{EV,ch}^t(1 - \eta_{EV,ch}) + \\ P_{EV,dis}^t \left( \frac{1}{\eta_{EV,dis}} - \eta_{EV,dis} \right) \end{cases} \quad (19)$$

式中： $C_{BT}^t$ 、 $C_{virtual}^t$  分别表示  $t$  时刻的蓄电池、联合虚拟储能系统的收益； $C_m^t$  表示  $t$  时刻的储能运营商的运行成本； $P_{BT,dis}^t$  和  $P_{BT,ch}^t$  分别表示  $t$  时刻的蓄电池的放电量和充电量； $\lambda$  表示  $t$  时刻的虚拟储能充放电单位功率的补贴价格； $P_{virtual,dis}^t$  和  $P_{virtual,ch}^t$  分别表示  $t$  时刻的联合虚拟储能系统的放电量和充电量； $\alpha_{BT}$  表示  $t$  时刻的蓄电池的成本系数。

#### 3.2.2 储能约束

$$S_{OC-BT}^t = S_{OC-BT}^{t-1} + [\eta_{BT,c} P_{BT,ch}^t - P_{BT,dis}^t / \eta_{BT,d}] \Delta t \quad (20)$$

式中  $S_{OC-BT}^t$  表示  $t$  时刻蓄电池的荷电状态。

为避免因过充过放缩短电池的使用寿命，运行时应满足以下约束：

$$\begin{cases} X_{BT,ch}^t \cdot P_{BT,ch\_min} \leq P_{BT,ch}^t \leq X_{BT,ch}^t \cdot P_{BT,ch\_max} \\ X_{BT,dis}^t \cdot P_{BT,dis\_min} \leq P_{BT,dis}^t \leq X_{BT,dis}^t \cdot P_{BT,dis\_max} \\ S_{OC-BT\_min} \leq S_{OC-BT}^t \leq S_{OC-BT\_max} \\ 0 \leq X_{BT,ch}^t + X_{BT,dis}^t \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T (X_{BT,ch}^t + X_{BT,dis}^t) \leq N \end{cases} \quad (21)$$

式中： $X_{BT,ch}^t$  和  $X_{BT,dis}^t$  分别表示  $t$  时刻的充放电状态，用 0 和 1 表示； $P_{BT,ch\_max}$  和  $P_{BT,ch\_min}$  分别表示蓄电池充电功率的上下限； $P_{BT,dis\_max}$  和  $P_{BT,dis\_min}$  分别表示蓄电池放电功率的上下限； $S_{OCBT\_max}$  和  $S_{OCBT\_min}$  分别表示蓄电池荷电状态的上下限； $N$  表示最大充放电次数。

### 3.3 参与虚拟储能的用户

#### 3.3.1 用户目标函数

考虑到用户获得的效益不仅是购能价格最优，还包括对电能使用效果的满意度。所以引入效用函数对用户满意度进行量化。目标函数为

$$\begin{cases} \max f_{user} = \sum_{t=1}^T (C_s^t - C_{buy}^t) \\ C_{buy}^t = R_e^t P_{DL}^t \\ C_s^t = \alpha_c P_{DL}^t - \frac{\beta_c}{2} (P_{DL}^t)^2 \end{cases} \quad (22)$$

式中： $C_s^t$  表示  $t$  时刻的用户满意度； $C_{buy}^t$  表示  $t$  时刻的用户的购能成本； $\alpha_c$ 、 $\beta_c$  分别表示用户用电效益系数。

#### 3.3.2 约束条件

##### 1) 负荷约束：

$$\begin{cases} P_{DL}^t = P_{load,s}^t + P_{load,d}^t \\ 0 \leq P_{load,s}^t \leq P_{load,s\_max}^t \end{cases} \quad (23)$$

式中： $P_{load,s}^t$ 、 $P_{load,d}^t$  分别表示  $t$  时刻的广义负荷和刚性负荷； $P_{load,s\_max}^t$  表示  $t$  时刻广义负荷的最大值。

##### 2) 功率平衡约束：

$$P_{WT}^t + P_{BT,dis}^t + P_{grid}^t + P_{virtual,dis}^t = P_{load,c}^t + P_{load,d}^t + P_{grid,ch}^t + P_{virtual,ch}^t \quad (24)$$

式中  $P_{WT}$  表示风力发电的输出功率。

## 4 多主体博弈互动分析及求解方法

### 4.1 多主体 Stackelberg 博弈互动均衡

多主体 Stackelberg 博弈是描述微网运营商、储能运营商、用户追求各自利益最大化的决策过程。微网运营商作为领导者，会优先行动，制定使得自身利益最大化的售电价格。储能运营商和用户作为跟随者，根据领导者制定的电价来优化自身的策略并反作用于电价。最后，领导者会根据跟随者的决策选择有利于最多主体的策略。该 Stackelberg 博弈模型可表达如下：

$$\Omega = \{A; \{m_{ier}, m_{ser}, m_{user}\}; \{f_{ier}, f_{ser}, f_{user}\}\} \quad (25)$$

上述模型主要包括参与者、策略和效益，具体表示为：

1) 参与者为微网运营商、储能运营商、用户。参与者集合可表示为

$$A = \{ier; ser; user\} \quad (26)$$

2) 微网运营商的策略包括售电价格；储能运

营商的策略为实体储能和虚拟储能的充放电功率；用户侧策略为可调度的广义负荷。表达式如下：

$$m_{ier} = \{R_e\} \quad (27)$$

$$\begin{cases} m_{ser} = \{P_{BT,dis}, P_{BT,ch}, P_{virtual,dis}, P_{virtual,ch}\} \\ m_{user} = \{P_{load,s}\} \end{cases} \quad (28)$$

3) 各主体的效益分别为各自的目标函数如式(16)、(19)、(22)。

当任何主体都不能单方面改变策略来获得更多的收益时，即达到 Stackelberg 均衡，需满足以下条件：

$$\begin{cases} f_{ier}(m_{ier}^*, m_{ser}^*, m_{user}^*) \geq f_{ier}(m_{ier}, m_{ser}, m_{user}) \\ f_{ser}(m_{ier}^*, m_{ser}^*, m_{user}^*) \geq f_{ser}(m_{ier}, m_{ser}, m_{user}) \\ f_{user}(m_{ier}^*, m_{ser}^*, m_{user}^*) \geq f_{user}(m_{ier}, m_{ser}, m_{user}) \end{cases} \quad (29)$$

式中  $(m_{ier}^*, m_{ser}^*, m_{user}^*)$  为 Stackelberg 的均衡解。

#### 4.2 Stackelberg 均衡唯一存在证明

在求解 Stackelberg 均衡解之前，需要先证明其存在性和唯一性，当主从博弈模型满足以下条件时，则存在唯一的 Stackelberg 均衡<sup>[28]</sup>：

- 1) 领导者和跟随者的策略集是非空紧凸集；
- 2) 当领导者的策略确定之后，所有跟随者均存在唯一最优解；
- 3) 当跟随者的策略确定之后，领导者存在唯一最优解。

证明过程如附录 B 所示。

#### 4.3 主从博弈求解方法

本文对博弈的求解方法如附图 C1 所示。主要分为 10 个步骤：

- 1) 输入初始数据，并设置参数；
- 2) 初始化种群 a，令迭代次数  $k=0$ ；
- 3) 微网运营商作为领导者，将优化后的内部售电价格传给跟随者，即储能运营商和用户；
- 4) 储能运营商和用户根据售电价格优化自身效益，并得到跟随者的策略集；
- 5) 微网运营商根据跟随者的策略集，计算自身的效益；
- 6) 对种群 a 进行选择、变异、交叉，形成新的种群 b，为平衡搜索效率和收敛速度，交叉的概率为 0.89，为维持种群多样性以及避免陷入局部最优解，变异的概率为 0.076；
- 7) 储能运营商和用户再次优化自身效益；
- 8) 微网运营商再次计算自身的效益；
- 9) 选择微网运营商效益更高的种群；

10) 最大迭代次数为 300 次，若达到最大迭代次数，则输出结果；若没有达到，则重新对该种群进行变异、交叉形成新的种群。

## 5 算例分析

本文以福建省宁德市某海岛为具体研究对象，其拓扑结构如附图 C2 所示，该海岛的可再生能源发电为风力发电，共有 3 台风电机组进行供电，每台风电机组额定功率为 2MW，需要保证岛上负荷，特别是军用负荷的安全可靠供电，蓄电池容量为 2MW/4MW·h。海岛微电网全年每天风电出力情况如附图 C3 所示，在此基础上得到夏季典型日的风电机组出力，其与刚性负荷如附图 C4 所示，夏季典型室外温度如附图 C5 所示。用户用电效益系数  $\alpha_e$ 、 $\beta_e$  分别为 1.5、0.0009。建筑的相关参数、太阳辐射强度详见文献[12]。参考对家庭 EVs 行程的社会调查数据可知，电动汽车的日行驶里程基本服从(3.2, 0.87)的对数正态分布，车辆接入电网的时间服从(17.3, 9.6)正态分布<sup>[29]</sup>。

### 5.1 优化调度结果分析

为验证基于本文所提策略的有效性，设计以下 4 种场景进行对比分析。

场景 1：考虑分时电价，只考虑微网运营商的收益(无主从博弈)，不考虑虚拟储能。

场景 2：考虑分时电价，只考虑用户的收益(无主从博弈)，不考虑虚拟储能。

场景 3：考虑微网运营商、储能运营商、用户的收益，利用主从博弈优化实时电价，不考虑虚拟储能。

场景 4：在场景 3 的基础上引入虚拟储能。

场景 4 中微网运营商、储能运营商和用户的优化迭代过程如附图 D1 所示，第 127 次迭代时，结果已经收敛。可以看出，本文所采用的方法具有很好的收敛效果。当达到 Stackelberg 均衡时，所有策略均不再改变。此时，任何参与者都不能单独改变自身的策略而提高收益，三方收益最终分别稳定在 26832、1132 和 16740 元。

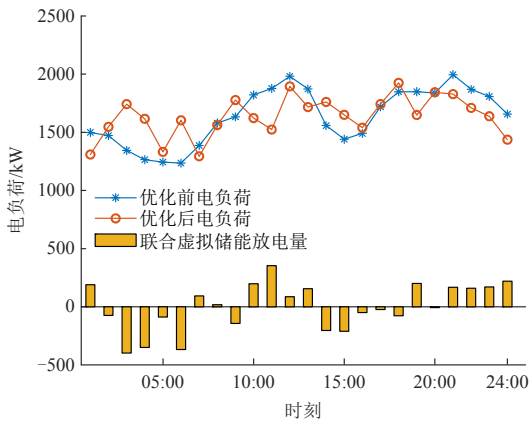
上述 4 种场景各主体的效益如表 2 所示，不同场景售电价格如附图 D2 所示。

负荷曲线优化结果如图 3 所示。由引入虚拟储能前后负荷对比可知，在 02:00—07:00 和 14:00—16:00 负荷低谷时段，联合虚拟储能进行充电；在 10:00—13:00 和 19:00—24:00 负荷高峰时段进行放

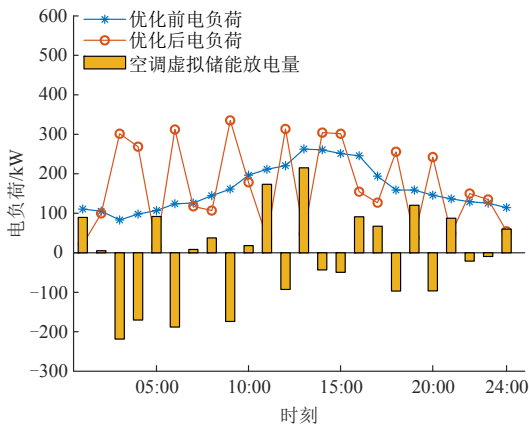
表 2 不同场景下各主体效益

Table 2 Profit of different stakeholders under different scenarios

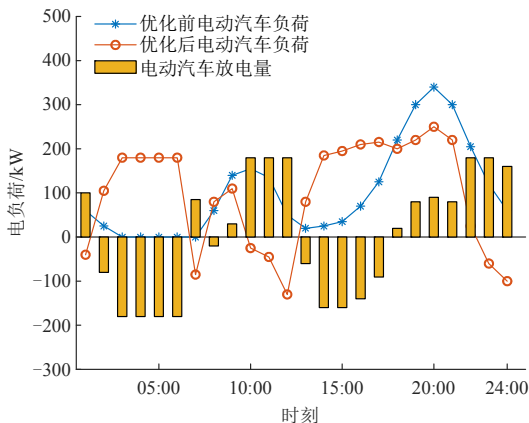
场景	$f_{ier}/\text{元}$	$f_{ser}/\text{元}$	$f_{user}/\text{元}$
1	27120	904	14650
2	24876	480	17004
3	25932	854	15633
4	26832	1132	16740



(a) 引入虚拟储能前后负荷曲线



(b) 参与调度前后空调负荷曲线



(c) 参与调度前后电动汽车负荷曲线

图 3 负荷曲线优化结果

Fig. 3 Optimization results of load curve

电。通过对广义负荷进行合理调度，实现了联合虚拟储能系统的充放电，从而实现消峰填谷的目的。

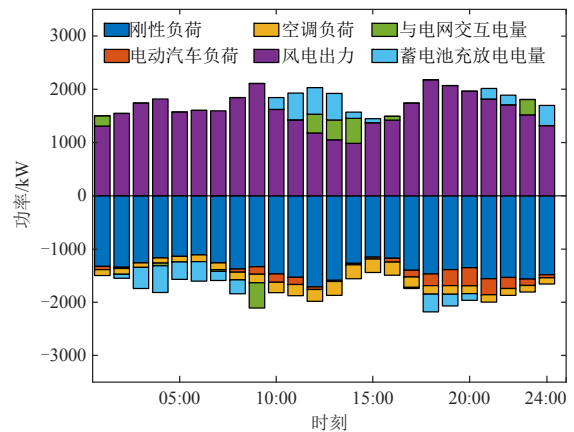
对于空调负荷，其储能能力受外界因素的影响

较大。如果空调虚拟储能连续充电之后没有放电，其储存的能量就会消散，这样就失去了储能的作用。因此，空调虚拟储能不能连续地进行充放电，这也导致其负荷波动较大。由空调负荷参与调控的对比图 3 和表 2 可知，引入虚拟储能后，空调负荷上下波动，以无虚拟储能为基准，高于基准部分表示充电，低于基准部分表示放电。在负荷低谷时段充电较多，在负荷高峰时段放电较多，在削峰填谷的同时提高了用户的效益。

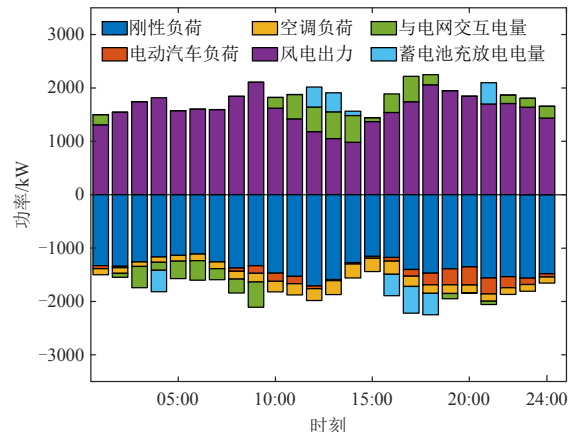
对于电动汽车负荷，大量电动汽车充电时段由 18:00—22:00 充电高峰时段转移至 02:00—06:00 负荷低谷时段，并且在 10:00—12:00 和 22:00—24:00 等时段进行放电，在不影响用户的正常出行的前提下减小了峰谷差。在长时间的用电高峰时段，电动汽车作为空调虚拟储能的补充；在其余时段，电动汽车有较稳定的充放电计划，空调虚拟储能用来弥补功率差额。二者相互配合，可以更加合理地完成虚拟储能的充放电需求。

### 5.2 供需平衡分析

不同场景的功率平衡如图 4 所示。由场景 1 和表 2 可知，场景 1 以微网运营商的效益最大为目标，所以微网运营商的收益较高，用户的效益较低。



(a) 场景1



(b) 场景2



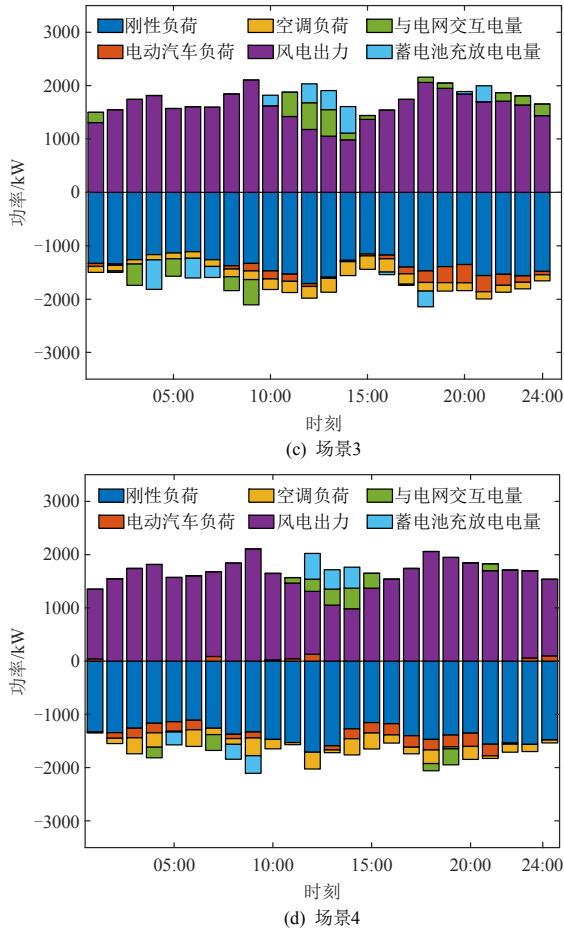


图4 不同场景的功率平衡

Fig. 4 Power balance in different scenarios

为降低成本, 优先选择风力发电为微网内部提供电能; 为减少与上级电网的交互成本, 优先选择蓄电池的充放电维持电功率平衡, 这也导致储能运营商的效益较高。而场景2以用户的效益最大为目标, 与场景1相比, 微网运营商的效益降低了2244元, 用户的效益提高了2354元。由于用户的效益与电网的交互成本无关, 优先选择与上级电网交互的方式维持电功率平衡, 使得蓄电池有充足的电能保证用户的正常用电, 其储能运营商的效益相比场景1因此降低了424元。

场景3通过主从博弈的方式综合考虑了不同主体的效益, 在风电出力多与负荷需求时, 多余的电能由蓄电池储存或者出售给上级电网; 同样, 在风电出力较少时, 缺少的电能由蓄电池和上级电网共同提供。与场景1、场景2相比, 不会过多得依赖上级电网或者蓄电池, 各主体的效益也会更加均衡。

场景4由于引入了虚拟储能系统, 而虚拟储能的成本较低, 优先选择通过虚拟储能系统灵活地充放电的方式维持微电网内部的供需平衡。与场景3相比, 大大减少了蓄电池的使用, 其中单次蓄电池

的最大放电量减少了22.2%, 充放电次数减少了5次。各主体的效益均有所提升, 微网运营商的效益提高了900元, 储能运营商的效益提高了278元, 用户的效益提高了1107元。

由表3可知, 场景1由于只考虑了微网运营商的收益, 为减少与上级电网的交互成本, 对蓄电池的依赖较大。场景2只考虑了用户效益, 相较于蓄电池, 会更加依赖与上级电网的交互。场景3由于考虑了各主体的收益, 会更加均衡地使用蓄电池或者与上级电网交互。相较于场景3, 场景4考虑了虚拟储能, 其蓄电池的充放电次数、最大充放电功率、总充放电功率均有所降低, 即对实体储能的依赖有所降低。

表3 不同场景下各项储能参数

Table 3 Energy storage parameters in different scenarios

场景	充/放电次数	最大充/放电功率	总充/放电功率
场景1	10次/9次	500kW/500kW	2663kW/2780kW
场景2	4次/4次	500kW/400kW	1214kW/1700kW
场景3	5次/6次	500kW/500kW	1749kW/1419kW
场景4	3次/3次	330kW/485kW	1240kW/950kW

### 5.3 不同负荷需求和风况下仿真结果分析

由于该地区全年风况有相似的峰谷规律, 但是出力大小有明显差异, 故大致可分为盛风、中等风况、弱风3种情况。同样, 负荷需求也具有明显的大小差异, 也可分为大负荷、中等负荷、小负荷3种情况。针对不同出力大小的风电和负荷带来的影响, 在场景4的基础上采用5种算例进行分析。

算例1: 弱风情况, 即负荷不变, 风电出力为场景4的0.8倍;

算例2: 中等风况或中等负荷情况, 即上文中的场景4, 即夏季典型日风电机组出力和负荷需求;

算例3: 盛风情况, 即负荷不变, 风电出力为场景4的1.2倍;

算例4: 小负荷情况, 即风电出力不变, 负荷为场景4的0.8倍;

算例5: 大负荷情况, 即风电出力不变, 负荷为场景4的1.2倍。

不同算例的负荷曲线如图5所示。

由图5可知, 算例1与算例5均较难满足用户的用电需求, 在11:00—13:00风电出力较低时段, 为了保证微网内部的正常供电, 虚拟储能放出较多电能, 使得此时段的负荷量有所降低。在08:00—10:00和18:00—20:00风电出力较高时段, 虚拟储能充电量增大, 导致这两个时段出现负荷高峰。算

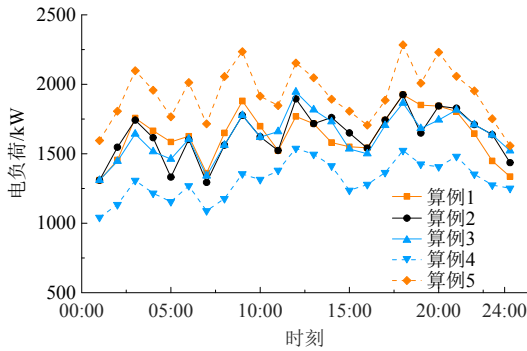


图 5 不同算例下的负荷曲线

Fig. 5 Load curves in different cases

例 5 相较于算例 1，其虚拟储能容量较大，其负荷曲线波动幅度也较为剧烈。算例 3 与算例 4 均较容易满足负荷需求，在 10:00—13:00 用电高峰时段的负荷量有所增大。此时，微网运营商在该售电价格较高时段出售更多电能，获取更多的收益，用户满意度也因为负荷改变量的减小有所提升。算例 4 相较于算例 3，其虚拟储能容量较小，使得负荷曲线波动较为平缓。

综上所述，在弱风大负荷的情况下，微网内部的电力电量更难平衡，对虚拟储能的依赖更大；在盛风小负荷的情况下，负荷曲线波动更为平缓，电力电量平衡也更加容易。因此，风况和负荷需求波动越大，弱风大负荷的情况发生的概率越大，保证微网内部正常供电所需的虚拟储能容量就越多。

## 6 结论

本文基于联合虚拟储能系统和微网内部不同主体的利益相关性，构建了以微网运营商为领导者，储能运营商和用户为跟随者的多主体的交互机制。实现了微网内部多主体的博弈互动和虚拟储能参与的经济优化调度。主要得到以下结论：

1) 考虑源-荷-储三方的利益相关性，建立了多主体主从博弈优化模型，并证明其存在唯一的 Stackelberg 均衡解。

2) 算例仿真结果说明本文所提的多主体主从博弈优化模型通过优化价格信息，灵活引导储能系统的充放电和用户的用电计划，在满足用户的用电需求的同时实现多主体的协调优化。

3) 在博弈模型中引入联合虚拟储能系统，分析了空调负荷和电动汽车的负荷特性，算例仿真结果说明联合虚拟储能可以通过对广义负荷的灵活调度，有效减少实体储能的使用，减少了峰谷差，实现各方共赢。

本文通过建立灵活可调的虚拟储能模型，促进用户参与市场交易当中，并建立多主体主从博弈模型分析源-荷-储三方利益主体之间的交互过程，找到最优的均衡策略，实现了源-荷-储的协同运行，为电力市场提供重要的参考信息。

本文所研究的海岛微电网，前期建设规划的负荷容量较小，仅靠风电和储能系统配合便可满足岛上用户的负荷需求。随着海岛建设规模扩大，负荷需求可能会逐渐增加，仅靠清洁能源供电的方式恐难以维持岛上的供需平衡，需要进一步改进微电网调控策略，同时进一步考虑不同用户用能习惯以及不同季节用户的用能情况等因素的差异性。

## 参考文献

- [1] 丁苏阳, 林湘宁, 陈哲, 等. 资源富集岛蓄-氢-冷联合可再生能源消纳系统设计及调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4659-4673.  
DING Suyang, LIN Xiangning, CHEN Zhe, et al. A design and dispatch strategy of storage-hydrogen-cooling combined renewable energy absorption facility on rich resource island [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4659-4673 (in Chinese).
- [2] 赵波, 李得民, 吴在军, 等. 基于 100%绿色能源供电目标的海岛微电网群容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 932-946.  
ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-946 (in Chinese).
- [3] 胡梦瑶. 计及海水淡化系统的海岛微电网项目投资风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.  
HU Mengyao. Research on investment risk assessment of island microgrid project including seawater desalination system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021 (in Chinese).
- [4] SUI Quan, WEI Fanrong, WU Chuantao, et al. Day-ahead energy management for pelagic island microgrid groups considering non-integer-hour energy transmission[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5249-5259.
- [5] 徐诗鸿, 张宏志, 林湘宁, 等. 近海海岛多态能源供需自洽系统日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 15-29.  
XU Shihong, ZHANG Hongzhi, LIN Xiangning, et al. Optimal day-ahead dispatching strategy for polymorphic energy self-consistent system with supply and demand for offshore island[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 15-29 (in Chinese).
- [6] 公安部. 新注册登记机动车 3478 万辆[EB/OL].

- (2023-1-11). [https://app.mps.gov.cn/searchweb/search\\_new.jsp](https://app.mps.gov.cn/searchweb/search_new.jsp). Ministry of public security. New registration 34.78 million vehicles[EB/OL]. (2023-1-11). [https://app.mps.gov.cn/searchweb/search\\_new.jsp](https://app.mps.gov.cn/searchweb/search_new.jsp)(in Chinese).
- [7] 金永花. 新发展机遇期我国新能源汽车产业链水平提升研究[J]. 经济纵横, 2022(1): 83-90.  
JIN Yonghua. Research on the improvement of China's new energy vehicle industry chain in the new development opportunity period[J]. Economic Review, 2022(1): 83-90 (in Chinese).
- [8] 乐零陵. 计及温控负荷聚合灵活性的电力及综合能源系统优化调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
LE Lingling. Optimal scheduling of power system and integrated energy system considering aggregation flexibility of thermostatically controlled loads [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022 (in Chinese).
- [9] SHEN Yunwei, LI Yang, ZHANG Qiwei, et al. State-shift priority based progressive load control of residential HVAC units for frequency regulation [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182: 106194.
- [10] YUE Huanzhan, ZHANG Qian, ZENG Xiaosong, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle cluster based on index evaluation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1212-1221.
- [11] 陈厚合, 吴桐, 李本新, 等. 考虑建筑热惯性的园区代理商电价策略及用能优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 148-156.  
CHEN Houhe, WU Tong, LI Benxin, et al. Electricity pricing strategy of park retailer and energy optimization considering thermal inertia of building[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 148-156 (in Chinese).
- [12] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-591.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591 (in Chinese).
- [13] MITRA J, NGUYEN N. Grid-scale virtual energy storage to advance renewable energy penetration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(6): 7952-7965.
- [14] 殷爽睿, 艾芊, 王大鹏, 等. 考虑空调负荷虚拟储能的产消者鲁棒日前申报策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 24-34.  
YIN Shuangrui, AI Qian, WANG Dapeng, et al. Day-ahead robust bidding strategy for prosumer considering virtual energy storage of air-conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 24-34 (in Chinese).
- [15] 穆云飞, 唐志鹏, 吴志军, 等. 计及虚拟储能的电-水-热综合能源系统日前优化调度方法[J/OL]. 电力系统自动化, 2023: 1-16[2023-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230629.1528.002.html>.  
MU Yunfei, TANG Zhipeng, WU Zhijun, et al. Optimal day-ahead scheduling method for Electricity Water Hot water Integrated Energy System considering Virtual Energy Storage[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-16[2023-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230629.1528.002.html> (in Chinese).
- [16] 王瑞东, 吴杰康, 蔡志宏, 等. 含广义储能虚拟电厂电-气-热三阶段协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1857-1868.  
WANG Ruidong, WU Jiekang, CAI Zhihong, et al. Three-stage collaborative optimal scheduling of electricity-gas-heat in virtual power plant with generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1857-1868 (in Chinese).
- [17] LI Hui, REN Zhouyang, TRIVEDI A, et al. A noncooperative game-based approach for microgrid planning considering existing interconnected and clustered microgrids on an island[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2064-2078.
- [18] 刘志坚, 刘瑞光, 梁宁, 等. 一种基于博弈论的多微网能源交易方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 587-595.  
LIU Zhijian, LIU Ruiguang, LIANG Ning, et al. Energy trading method of multi-microgrids based on game theory[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 587-595 (in Chinese).
- [19] 崔明勇, 宣名阳, 卢志刚, 等. 基于合作博弈的多综合能源服务商运行优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3548-3563.  
CUI Mingyong, XUAN Mingyang, LU Zhigang, et al. Operation optimization strategy of multi integrated energy service companies based on cooperative game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3548-3563 (in Chinese).
- [20] LI Peng, WANG Zixuan, YANG Weihong, et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game[J]. Energy, 2021, 214: 119006.
- [21] 刘畅, 刘文霞, 高雪倩, 等. 基于主从博弈的配电网-多综合能源系统协调规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 45-52.  
LIU Chang, LIU Wenxia, GAO Xueqian, et al. Coordinative planning of distribution network and multiple integrated energy systems based on Stackelberg game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 45-52 (in Chinese).
- [22] 龚诚嘉锐, 林顺富, 边晓燕, 等. 基于多主体主从博弈

的负荷聚合商经济优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 30-40.

GONG Chengjiarui, LIN Shunfu, BIAN Xiaoyan, et al. Economic optimization model of a load aggregator based on the multi-agent Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 30-40 (in Chinese).

[23] LIU Nian, ZHOU Linjie, WANG Cheng, et al. Heat-electricity coupled peak load shifting for multi-energy industrial parks: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1858-1869.

[24] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321.

LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1321 (in Chinese).

[25] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167. SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167 (in Chinese).

[26] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.

WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401 (in Chinese).

[27] 李卓阳, 靳小龙, 贾宏杰, 等. 考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3928-3939.

LI Zhuoyang, JIN Xiaolong, JIA Hongjie, et al. Model predictive control method for the HVAC system of buildings considering the thermal dynamic characteristics of the envelope[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3928-3939 (in Chinese).

[28] 王海洋, 李珂, 张承慧, 等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5435-5444.

WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5444 (in Chinese).

[29] 陆燕娟, 潘庭龙, 杨朝辉. 计及电动汽车的社区微网储能容量配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 362-367. LU Yanjuan, PAN Tinglong, YANG Zhaohui. Energy storage capacity configuration in community microgrid

considering electric vehicles[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(12): 362-367 (in Chinese).

## 附录 A 详细推导过程

ETP 微分方程为

$$\frac{dT_{in}'}{dt} = \frac{1}{R_E C_E} (T_{out} - T_{in}') - \frac{Q_E}{C_E} \quad (A1)$$

式中:  $R_E$  表示空调-建筑系统的等效热阻;  $C_E$  表示等效热容;  $Q_E$  表示空调的制冷量。

其中, 空调的制冷功率  $P_{AC}$  与制冷量  $Q_E$  之间的关系为

$$P_{AC} = \frac{Q_E}{\eta_{AC}} \quad (A2)$$

式中  $\eta_{AC}$  表示空调的运行效率。

当不考虑其他外界因素时, 在短时间内认为室温保持不变, 空调制冷量等于外界与建筑之间交互的热量, 即室内温度的变化率为零。令式(A1)中等号左侧为 0, 则可得到空调制冷量为

$$Q_E = \frac{T_{out} - T_{in}}{R_E} \quad (A3)$$

空调消耗的电功率为

$$P_{AC} = \frac{T_{out} - T_{in}}{\eta_{AC} R_E} \quad (A4)$$

为了平衡源荷两侧的功率波动, 空调的电负荷需要不断地变化。由式(A4)可知, 空调消耗的电功率只与室内温度有关, 即只与空调温度设定值有关。当改变空调温度设定值至  $T_{set}$  时, 外界与建筑之间交互的热量为

$$Q = \frac{T_{set} - T_{in}}{R_E} \quad (A5)$$

当  $T_{set}$  高于  $T_{in}$  时, 空调虚拟储能开始放电。  $T_{in}$  升高至满足人体舒适度要求的温度上限  $T_{max}$  时, 达到最大放电量。故  $t$  时刻空调的虚拟储电量为

$$E'_{AC} = \begin{cases} T_{max} - T_{in}' \\ \eta_{AC} R_E \end{cases} \quad (A6)$$

式中  $T_{max}$  和  $T_{min}$  分别为满足人体舒适度要求的温度上下限。

当  $T_{set}$  低于  $T_{in}$  时, 空调虚拟储能开始充电。  $T_{in}$  降低至满足人体舒适度要求的温度下限  $T_{min}$  时, 达到最大充电量。故空调虚拟储能的额定储电量为从  $T_{min}$  升至  $T_{max}$  消耗的电功率:

$$E_{N,AC} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\eta_{AC} R_E} \quad (A7)$$

空调虚拟储能的荷电状态为

$$S_{OC-AC} = \begin{cases} T_{max} - T_{in}' \\ T_{max} - T_{min} \end{cases} \quad (A8)$$

## 附录 B 证明过程

证明: 下面将分别证明本文所提的主从博弈模型, 满足上述 Stackelberg 均衡存在且唯一的 3 个条件。

1) 首先证明第 1 个条件。领导者的策略需要满足式(17)、(18), 储能侧跟随者的策略需要满足式(20)、(21), 用户侧跟随者的策略需要满足式(23), 所以每个参与者的策略集都是

非空且紧凸的。

2) 其次证明第2个条件。由于篇幅限制, 本文只证明用户存在唯一最优解。对用户的目标函数式(22)求关于  $P'_{load,s}$  的一阶偏导, 得到:

$$\frac{\partial f_{user}}{\partial P'_{load,s}} = \alpha_c - \beta_c P'_{DL} - R'_c \quad (B1)$$

令一阶偏导等于0, 得到:

$$P'_{load,s,0} = \frac{\alpha_c - R'_c}{\beta_c} - P'_{load,d} \quad (B2)$$

再对式(22)求关于  $P'_{load,s}$  的二阶偏导, 得到:

$$\frac{\partial^2 f_{user}}{\partial (P'_{load,s})^2} = -\beta_c \quad (B3)$$

由于用户的效益系数为正, 所以二阶偏导小于0,  $P'_{load,s,0}$  为式(22)的极大值点, 所以用户的效益存在唯一的最大值。

3) 最后证明第3个条件。对微网运营商的目标函数式(21)求关于  $R'_c$  的一阶偏导, 根据式(B2)得到:

$$\frac{\partial f_{ier}}{\partial R'_c} = P'_{DL} = \frac{\alpha_c - R'_c}{\beta_c} \quad (B4)$$

再对式(B1)求关于  $R'_c$  的二阶偏导, 得到:

$$\frac{\partial^2 f_{ier}}{\partial (R'_c)^2} = -\frac{1}{\beta_c} \quad (B5)$$

由于二阶偏导小于0, 故微网运营商的收益存在唯一的最大值。

附录C 相关附图

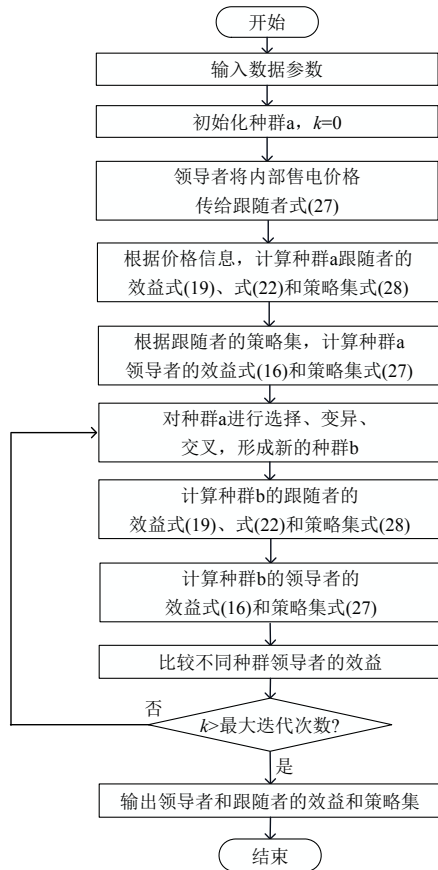


图 C1 主从博弈求解流程图  
Fig. C1 Solving flow chart of master-slave game

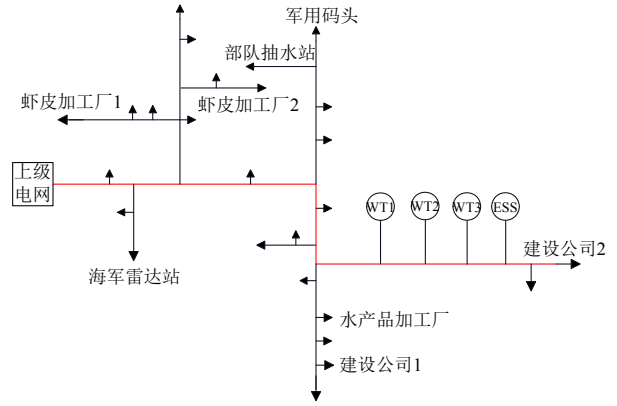


图 C2 海岛微网拓扑图

Fig. C2 Structure diagram of island microgrid

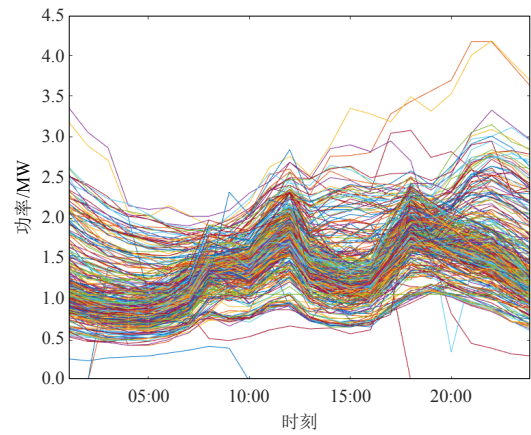


图 C3 全年每天风电出力情况

Fig. C3 Daily wind power output throughout the year

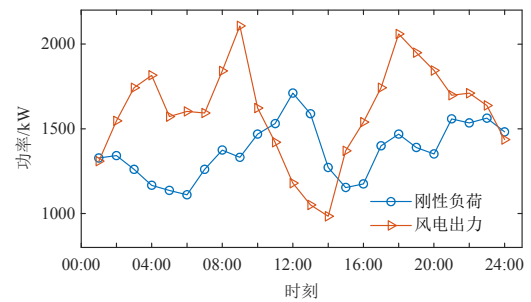


图 C4 刚性负荷和风电机组出力

Fig. C4 Rigid load and power outputs of WT

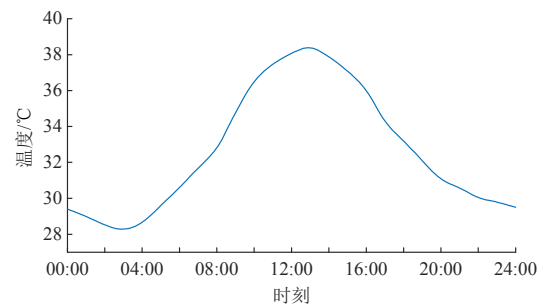


图 C5 夏季典型日室外温度

Fig. C5 Typical daily outdoor temperature in summer

附录 D 优化迭代过程

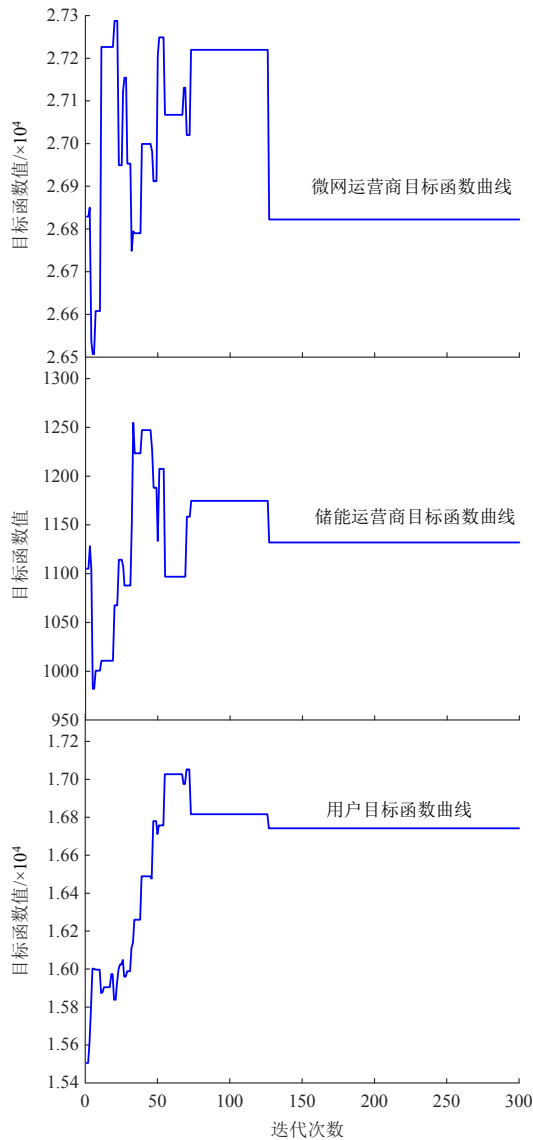


图 D1 主从博弈收敛结果

Fig. D1 Convergence process of master-slave game

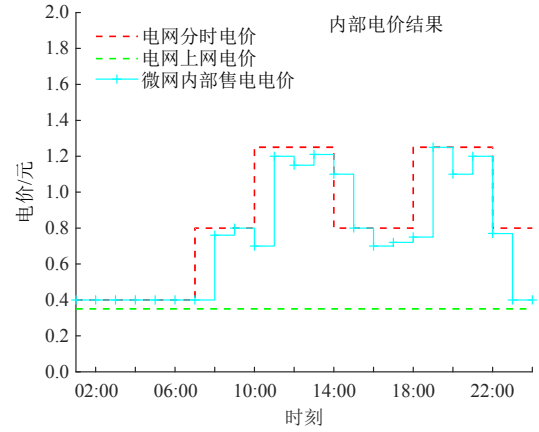


图 D2 分时电价与优化电价

Fig. D2 Tou and optimize delectricity price



李东东

收稿日期：2023-06-19。

作者简介：

李东东(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电, psldd@163.com;

陈天旭(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化, 广义负荷, chentianxul@163.com;

\*通信作者: 沈运帷(1992), 女, 博士, 讲师, 研究方向为需求响应、综合能源和辅助服务市场, ywshen@shiep.edu.cn。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)