

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.202

考虑连续双向拍卖机制的楼宇群日前优化调度

刘 辉, 熊振宇, 黄立冬

(广西大学 电气工程学院, 南宁 530000)

摘要:作为城市能耗的主体,智能楼宇低碳高效运行对实现“双碳”目标有着重要意义。为了增强楼宇经济性并提升楼宇能源共享和分布式能源消纳,提出了一种考虑楼宇特性、电能交易的楼宇群分布式优化调度模型。在楼宇优化层面,建立了以经济性和温度舒适性需求为目标的楼宇多目标运行优化模型;在楼宇群能源共享层面,建立了点对点(peer to peer, P2P)楼宇交易市场,并提出了结合楼宇优化结果和市场风险的新型连续双向拍卖交易机制。通过将市场交易结果反馈至各楼宇优化层面,实现楼宇运行的迭代优化和楼宇群内能源的互动共享,利用鲁棒优化检验该模型在各类不确定场景中的有效性。仿真结果表明,在多场景中,所提的楼宇群分布式优化调度模型均能在优化楼宇经济性的同时,提升楼宇群能源互补和分布式能源消纳的能力。

关键词:能源共享;连续双向拍卖交易;迭代优化;鲁棒优化

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)09-112-17

Day-ahead optimal scheduling of buildings considering continuous double auction trading mechanism

LIU Hui, XIONG Zhenyu, HUANG Lidong

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, P. R. China)

Abstract: As the main consumers of urban energy, the low carbon and efficient operation of intelligent buildings is crucial for achieving the goals of “peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality”. To enhance building economics while improving energy sharing and the consumption of distributed energy resources, a distributed optimal scheduling model for buildings taking into account building characteristics and energy trading was proposed. At the building optimization level, a multi-objective building operation optimization model considering economic and temperature comfort requirements was established. At the energy sharing level, a peer-to-peer buildings trading market was set up, and a new continuous double auction trading mechanism combining building optimization results and market risks was proposed. This mechanism feeds back the results of market transactions to the optimization level of each building, achieving iterative optimization and energy sharing within buildings. Robust optimization was used to test the effectiveness of the model in various uncertainty scenarios. Simulation results show that the distributed optimal scheduling model can optimize building economics while enhancing

收稿日期:2022-11-16 网络出版日期:2023-03-06

基金项目:综合能源高效协同运行关键技术及应用示范资助项目(2019YFE0118000)。

Supported by the Key Technology and Practice for Highly Efficient Collaboration of Integrated Energies (2019YFE0118000).

作者简介:刘辉,男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定与控制、能源需求侧响应等研究,(E-mail)hughlh@126.com。

通信作者:黄立冬,男,博士研究生,(E-mail)1144253028@qq.com。

energy complementarity and the consumption of distributed energy resources in various scenarios.

Keywords: energy sharing; continuous double auction trading; iterative optimization; robust optimization

在“双碳”背景下,实现能源清洁高效利用愈加重要^[1]。综合能源系统通过多能互补和转换,在提升能源利用率的同时减少碳排放,是实现双碳目标的有效途径^[2]。智能楼宇作为城市能耗的主体^[3]和综合能源系统负荷侧的终端应用形式^[4],具有交互性好、负荷灵活等特点,能适配各类分布式能源接入,因此,提升综合能源楼宇的经济性、环保性和分布式能源消纳能力,对能源低碳利用、缓解能源危机和改善环境等具有重要意义。

目前,国内外学者对智能楼宇的运行特性和能量管理开展了较多的研究工作。靳小龙等^[5]利用楼宇围护结构热延时的特性,构建楼宇热量的虚拟储能系统,实现楼宇虚拟储能系统的充放电管理。张风晓等^[6]利用滚动优化预测精度高的优点,采用模型预测控制方法,解决了可再生能源预测误差导致楼宇优化调控方案偏差的问题。Sharma等^[7]提出一种新型的建筑能源管理系统,并建立2阶段鲁棒优化模型处理楼宇分布式能源的不确定性,促进了楼宇可再生能源消纳。针对医院楼宇,Dedesko等^[8]以概率模型描述医院人员在室率和活动特征,并分析概率模型建模误差和不确定性对楼宇环境和运行特性的影响。这些研究没有考虑不同类型楼宇在结构、功能和人员行为上的差异,无法利用多类型楼宇之间的互补特性提升楼宇的经济性与分布式能源消纳能力,且对楼宇调度中不确定性的考虑过于单一,无法保证调度策略的可靠性。

近年来,电力市场的深化改革使市场交易更加多元化,并衍生出多种新型交易主体^[9],其中,端对端(peer to peer, P2P)交易^[10]模式能有效降低电能交易门槛和用户能源费用。配备分布式能源的智能楼宇兼具电能生产和消费能力,可直接参与电力市场进行电能交易^[11],或同其他楼宇进行P2P交易^[12-13],在完成电能共享的同时,提升楼宇经济性和分布式能源消纳能力。

针对楼宇间的能源共享和交易,近年来出现了较多的研究成果。葛少云等^[14]提出考虑楼宇特性的P2P交易方式,并采用非合作博弈和主从博弈分析交易中各主体的博弈关系。Li等^[15]提出楼宇间交易迭代的方式进行市场竞价,并探究不同竞价方式对交易市场的影响。Kopanos等^[16]提出在P2P框架下考虑微网内各楼宇用能需求后制定统一价格,并以微网总经济成本最小为目标进行楼宇能源共享。Huang等^[17]将下行风险约束应用于楼宇P2P交易中,进一步分析楼宇间共享储能对市场交易的影响。当前研究未考虑楼宇运行优化对交易的影响以及交易结果对楼宇运行的修正。

笔者针对综合能源楼宇主体,提出了一种考虑楼宇特性的电能交易的楼宇群分布式优化调度模型。首先,考虑楼宇围护结构、功能特性、人员行为等因素,对各类楼宇进行精细化建模和等级划分,建立以经济性和舒适性为目标的楼宇多目标运行优化模型。其次,根据楼宇等级划分、运行优化结果等,制定新型市场交易策略,实现楼宇间电能的交易。将市场交易结果反馈回各楼宇进行新一轮运行优化,实现楼宇运行的迭代优化和楼宇群内能源的互动共享。最后,通过仿真验证所提模型的有效性。

1 智能楼宇群框架

1.1 智能楼宇群构成

楼宇集群中,每个楼宇都是交易市场的主体,如图1所示。EMS表示能量管理系统(energy management system, EMS)。根据楼宇使用功能和围护结构,将楼宇分为住宅楼宇、商业楼宇和特殊楼宇,相关参数如表1所示。

智能楼宇的分布式能源系统主要考虑光伏发电(photovoltaic, PV)。据统计,建筑用能在总能耗中占比高达40%^[18],其中约一半能耗用于满足楼宇内温控负荷和空气调节(heating ventilation and air conditioning, HVAC)系统^[19],因此,智能楼宇用能主要考虑HVAC系统能耗、基础柔性负荷和人员负荷。智能楼宇配有EMS,用于管理楼宇运行,并与上级市场进行交易信息的传递。

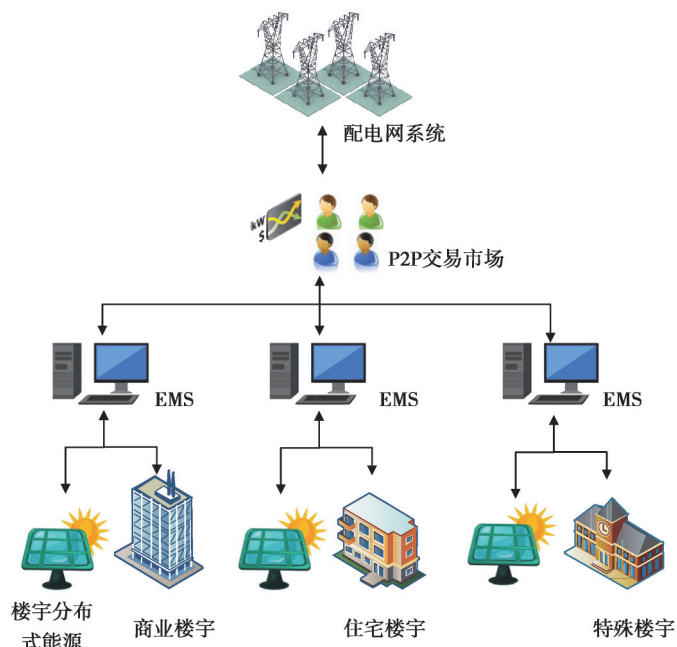


图 1 楼宇群构成

Fig. 1 The composition of buildings group

表 1 各楼宇设备配置

Table 1 Equipment configuration of each building

楼宇设备	住宅楼宇	商业楼宇	特殊楼宇
分布式能源	√	√	√
基础柔性负荷	√	√	√
HVAC 系统	√	√	√
储能设备	×	√	√
人员负荷	×	√	√

1.2 智能楼宇群运行框架

各楼宇在完成自身运行优化后向上级市场提供信息,并同其余楼宇达成交易。因此,在楼宇的初次运行优化中只考虑了楼宇自身的因素,未考虑后续市场交易对各楼宇运行的影响,使各楼宇在楼宇群中只作为独立的个体运行,忽略了楼宇间的相互影响。为实现市场交易结果对各楼宇优化运行的反馈、体现楼宇间的相互作用,并充分挖掘楼宇优化调控能力和楼宇间电能共享能力,将市场交易结果反馈至各楼宇进行运行优化迭代和市场交易迭代,具体的流程如图 2 所示。

首先,设置最大迭代次数 K ,初始化迭代次数 k 和各楼宇运行优化时的购售电均价等信息,初始的购售电均价为配电网购售电价。接着,各楼宇根据自身信息完成运行优化,并在交易市场同其余楼宇达成交易,若迭代次数 k 未超过最大值 K ,交易市场和各楼宇根据交易结果分别更新购售电均价和边际价格,为下一轮的运行优化和市场交易做准备。当迭代次数 k 超过最大值 K 时,迭代优化结束。

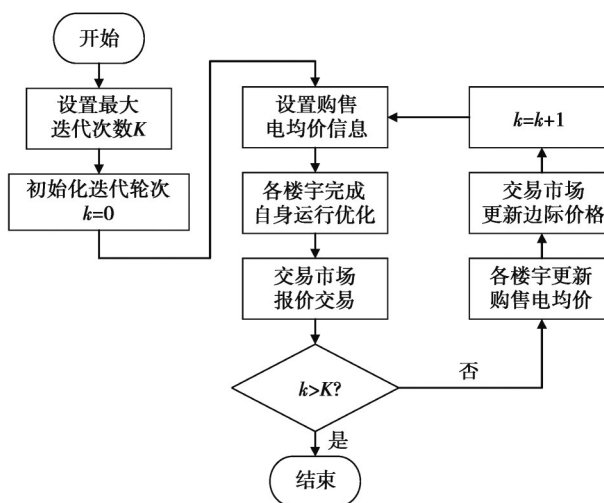


图 2 楼宇优化迭代流程图

Fig. 2 Iterative flowchart of building optimization

2 智能楼宇主体模型

2.1 楼宇热力学模型

采用的楼宇热力学模型如图3所示。以夏季制冷为例,构建楼宇热平衡方程^[20]。

$$\begin{cases} \Delta t(H_{\text{SUN},t} - H_{\text{HVAC},t} + H_{\text{rand},t}) - \Delta t(K_{\text{wall}}F_{\text{wall}} + K_{\text{win}}F_{\text{win}})(T_{\text{room},t} - T_{\text{out},t}) = \rho_{\text{air}}C_{\text{air}}V_{\text{room}}(T_{\text{room},t+1} - T_{\text{out},t}), \\ H_{\text{SUN},t} = I_{\text{SUN},t}F_{\text{win}}SC, \\ H_{\text{rand},t} = N_{\text{peo},t}Q_{\text{peo}} + P_{\text{equi},t}\varepsilon_{\text{e}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δt 为划分时段的时长; $H_{\text{SUN},t}$ 为 t 时段室内太阳辐射得热; $I_{\text{SUN},t}$ 为 t 时段太阳热辐射功率; F_{win} 为楼宇外窗总面积; SC 为外窗遮阳系数; $H_{\text{rand},t}$ 为 t 时段室内各类热源的散热功率; $N_{\text{peo},t}$ 为 t 时段楼宇在室人数总和; Q_{peo} 为人均散热量; $P_{\text{equi},t}$ 为 t 时段基础柔性负荷总功率值; ε_{e} 为散热系数; $H_{\text{HVAC},t}$ 为 t 时段HVAC系统的制冷功率; K_{wall} 为楼宇外墙传热系数; K_{win} 为楼宇外窗传热系数; F_{wall} 为楼宇外墙总面积; $T_{\text{room},t}$ 为 t 时段的室内温度; $T_{\text{out},t}$ 为 t 时段的室外温度; ρ_{air} 为室内的空气密度; C_{air} 为空气比热容; V_{room} 为室内空气容量; $T_{\text{room},t+1}$ 为下一时段的室内温度。

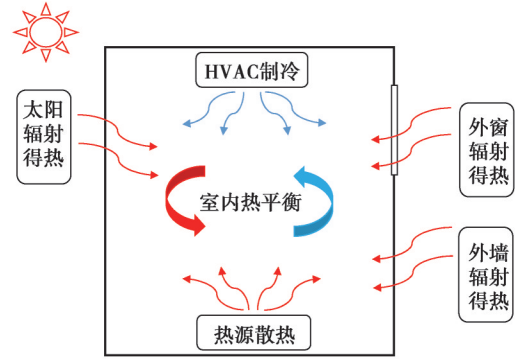


图3 楼宇室内热平衡

Fig. 3 Building heat balance

2.2 楼宇设备模型

2.2.1 基础柔性负荷模型

考虑各楼宇的基础柔性负荷,为简化模型,设定日内柔性负荷的总量一定,各时段调节能力在一定范围内,有

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{equi},t} = \sum_{t=1}^T P_{\text{equi,plan},t}, \quad (2)$$

$$|P_{\text{equi},t} - P_{\text{equi,plan},t}| \leq \varepsilon_p P_{\text{equi,plan},t}, \quad (3)$$

式中: $P_{\text{equi},t}$ 和 $P_{\text{equi,plan},t}$ 分别表示 t 时段该楼宇基础柔性负荷的实际用能和计划用能; ε_p 为调节系数; T 为一天内时间断面总数。

2.2.2 HVAC系统模型

HVAC系统总功率计算方式为

$$P_{\text{HVAC},t} = P_{\text{H},t} + P_{\text{W},t} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{HVAC},t}$ 为 t 时段HVAC系统的总耗电功率; $P_{\text{H},t}$ 和 $P_{\text{W},t}$ 分别为HVAC系统的制冷电功率和送风电功率。制冷电功率计算方法如下:

$$\begin{cases} H_{\text{HVAC},t} = m_f C_{\text{air}}(T_{\text{room},t} - T_{\text{HVAC},t}), \\ P_{\text{H},t} = \frac{m_f C_{\text{air}}(T_{\text{room},t} - T_{\text{HVAC},t})}{C_{\text{cop}}}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_f 为系统送风质量流; $T_{\text{HVAC},t}$ 为 t 时段系统送风温度; C_{cop} 为系统能效比。送风电功率计算方法如下:

$$P_{\text{W},t} = \frac{m_f \Delta P_{\text{tot}}}{\eta_{\text{fan}} \eta_{\text{motor}}}. \quad (6)$$

式中: η_{fan} 和 η_{motor} 分别表示送风设备的风机系数和电机系数; ΔP_{tot} 为送风设备内部压强差,具体计算方法为

$$\Delta P_{\text{tot}} = P_{\text{stastic}} + \frac{\rho_{\text{air}} v_{\text{air}}^2}{2}. \quad (7)$$

式中: P_{stastic} 为静态压强差; v_{air} 为送风风速。

2.2.3 储能设备模型

储能设备模型为

$$E_{\text{sto},t+1} = E_{\text{sto},t} + \left(\eta_{\text{ch}} S_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} - \frac{S_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t}}{\eta_{\text{dis}}} \right) \Delta t, \quad (8)$$

$$S_{\text{ch},t} + S_{\text{dis},t} \leq 1, \quad (9)$$

$$E_{\text{sto},T} = E_{\text{sto},0} \quad (10)$$

式中： $E_{\text{sto},t}$ 和 $E_{\text{sto},t+1}$ 分别表示 t 时段和下一时段的储能容量； $P_{\text{ch},t}$ 和 $P_{\text{dis},t}$ 表示 t 时段储能设备充放电功率； η_{ch} 和 η_{dis} 表示设备充放电效率； $S_{\text{ch},t}$ 和 $S_{\text{dis},t}$ 为0~1的变量，表示设备在 t 时段充放电状态； $E_{\text{sto},0}$ 和 $E_{\text{sto},T}$ 表示储能设备在运行周期内的始末状态。

2.2.4 光伏发电模型

将光伏发电功率简化为同光照强度成正比关系，具体设备模型为

$$P_{\text{PV},t} = P_{\text{STC}} I_{\text{SUN},t} \mu_{\text{SUN}} \quad (11)$$

式中： $P_{\text{PV},t}$ 为 t 时段光伏发电功率； P_{STC} 为光电转换率； μ_{SUN} 为光伏系数，不同楼宇因光伏板面积、光照角度的不同而有所区别。

3 智能楼宇运行优化策略

3.1 优化目标函数

目标函数主要由2部分组成：

$$\begin{cases} \min C_{\text{Building}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{Trade},t} + C_{\text{Tem},t}), \\ C_{\text{Trade},t} = C_{\text{TC},s,t} P_{\text{Building},b,t} - C_{\text{TC},b,t} P_{\text{Building},s,t}, \\ C_{\text{Tem},t} = \gamma |T_{\text{room},t} - T_{\text{set}}| \end{cases} \quad (12)$$

式中： C_{Building} 为楼宇一天内的总成本； $C_{\text{Trade},t}$ 为 t 时段楼宇运行经济成本，其含义是该楼宇与交易市场的交易成本； $C_{\text{TC},s,t}$ 和 $C_{\text{TC},b,t}$ 分别表示 t 时段该楼宇在交易市场的售电和购电均价； $P_{\text{Building},b,t}$ 和 $P_{\text{Building},s,t}$ 分别表示该楼宇 t 时段在交易市场总的购电和售电量； $C_{\text{Tem},t}$ 为 t 时段影响用户温度舒适度的惩罚成本； T_{set} 为室内最适温度，设定为24℃； γ 为温度惩罚因子，选值受楼宇结构的影响，如文献[5]所述，太高的惩罚因子会降低楼宇虚拟储能效果。太低的惩罚因子同样会降低楼宇虚拟储能效果，因此，温度惩罚因子为充分体现楼宇虚拟储能特性的选值。

3.2 约束条件

3.2.1 储能设备模型

楼宇优化运行中主要包含电功率平衡约束和热平衡约束，热平衡约束如式(1)所示，电功率平衡约束指该楼宇分布式能源发电量、交易购电量和储能设备发电量总和等于楼宇交易售电量、HVAC系统能耗、楼宇基础电负荷和储能设备充电量总和：

$$\begin{cases} P_{\text{PV},t} + P_{\text{Building},b,t} + S_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t} = S_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} + P_{\text{Building},s,t} + P_{\text{HVAC},t} + P_{\text{rand},t}, \\ P_{\text{rand},t} = P_{\text{equi},t} + N_{\text{peo},t} P_{\text{peo}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $P_{\text{rand},t}$ 为楼宇 t 时段的基础电负荷； P_{peo} 为楼宇在室人员的人均耗电功率。

3.2.2 设备运行约束

楼宇设备运行约束主要包含HVAC系统运行约束、温度约束、储能约束和光伏出力约束，表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{HVAC},\min} \leq P_{\text{HVAC},t} \leq P_{\text{HVAC},\max}, \\ T_{\text{HVAC},\min} \leq T_{\text{HVAC},t} \leq T_{\text{HVAC},\max}, \\ P_{\text{ch},\min} \leq P_{\text{ch},t} \leq P_{\text{ch},\max}, \\ P_{\text{dis},\min} \leq P_{\text{dis},t} \leq P_{\text{dis},\max}, \\ P_{\text{PV},\min} \leq P_{\text{PV},t} \leq P_{\text{PV},\max} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中包含了HVAC系统总功率、出风温度的上下限约束，储能充放电功率的上下限约束，以及光伏出力的上下限约束。

3.3 不确定性处理

光照强度和人员数量的不确定性会影响楼宇运行优化结果,商业楼宇的在室人员状态可通过几何分布再现,人员到达或离开楼宇的数量可通过正态分布再现^[21],因此,可根据楼宇在室人数峰值,利用正态分布函数,通过蒙特卡洛模拟方法生成各类人员在室场景。各类光照强度场景通过历史数据获取。采用鲁棒优化方法处理不确定性问题,下面以 x_{un} 表示不确定性参数。

$$\begin{cases} x_{un} \in [x_{un,ave} - \Gamma x_{un,dval}, x_{un,ave} + \Gamma x_{un,dval}], \\ \Gamma \in [0, |J|], \\ x_{un,ave} = (x_{max} + x_{min}) / 2, \\ x_{un,dval} = (x_{max} - x_{min}) / 2. \end{cases} \quad (15)$$

式中: x_{max} 和 x_{min} 分别表示不确定参数的上下限; $x_{un,ave}$ 表示不确定性参数的均值; $x_{un,dval}$ 表示不确定性参数均值与极值间的距离;为平衡保守性和经济性引入鲁棒系数 Γ ,通过 Γ 的取值反应不确定参数的保守程度; J 为不确定性参数的集合。人员数量、光照强度的不确定性区间可表示为:

$$\begin{cases} N_{pco,t} \in [N_{pco,ave,t} - \Gamma_{pco} N_{pco,dval,t}, N_{pco,ave,t} + \Gamma_{pco} N_{pco,dval,t}], \\ \Gamma_{pco} \in [0, |J_{pco}|], \\ I_{SUN,t} \in [I_{SUN,ave,t} - \Gamma_{SUN} I_{SUN,dval,t}, I_{SUN,ave,t} + \Gamma_{SUN} I_{SUN,dval,t}], \\ \Gamma_{SUN} \in [0, |J_{SUN}|]. \end{cases} \quad (16)$$

式中: Γ_{pco} 和 Γ_{SUN} 分别表示人员数量和光照强度的鲁棒系数,在任意时间段内上述2种量纲都只有一个不确定性参数,因此 J_{pco} 和 J_{SUN} 均为1。具体的鲁棒约束为

$$\begin{cases} N_{pco,t} - \Gamma_{pco} \varepsilon_{pco,t} - k_{pco,t} \geq \frac{(N_{pco,max} + N_{pco,min})}{2}, \\ I_{SUN,t} + \Gamma_{SUN} \varepsilon_{SUN,t} + k_{SUN,t} \leq \frac{(I_{SUN,max} + I_{SUN,min})}{2}, \\ \varepsilon_{pco,t} + k_{pco,t} \geq \frac{(N_{pco,max} - N_{pco,min}) \pi_{pco,t}}{2}, \\ \varepsilon_{SUN,t} + k_{SUN,t} \geq \frac{(I_{SUN,max} - I_{SUN,min}) \pi_{SUN,t}}{2}, \\ \varepsilon_{pco,t}, \varepsilon_{SUN,t}, k_{pco,t}, k_{SUN,t} \geq 0, \\ \pi_{pco,t}, \pi_{SUN,t} \geq 1. \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\varepsilon_{pco,t}$ 、 $\varepsilon_{SUN,t}$ 、 $k_{pco,t}$ 、 $k_{SUN,t}$ 、 $\pi_{pco,t}$ 、 $\pi_{SUN,t}$ 均为引入计算的鲁棒辅助系数。

4 楼宇群交易市场模型

为使每个楼宇可同时作为能源消费者和生产者融入电力市场,搭建了考虑楼宇运行和电力市场特性的P2P交易市场,提出了结合市场清算规则和交易风险的新型连续双向拍卖(continues double auction, CDA)交易机制。

4.1 交易市场结构

在P2P交易市场中,各楼宇均为独立的主体,在物理层和信息层通过能量交易中心与配电网相连,交易流程如图4所示。交易过程基本规则如下。

- 1)结合电力市场清算规则,购售电方的报价均在配电网购售电价区间内。
- 2)交易过程遵循价格优先原则,寻找出价最高的购电方和出价最低的售电方,当最高出价超过最低出价则达成交易,交易价格为双方的报价均价,交易电量为待交易量少的一方。
- 3)为区分楼宇负荷等级,设定特殊楼宇等级最高,住宅楼宇等级最低,若报价相同,高等级楼宇优先交易。所有楼宇不断更新报价直至完成交易任务,若超过最大交易次数 N 或交易市场中只存在一方报价,则关闭当前时段交易市场,未完成交易任务的楼宇同配电网进行市场清算。

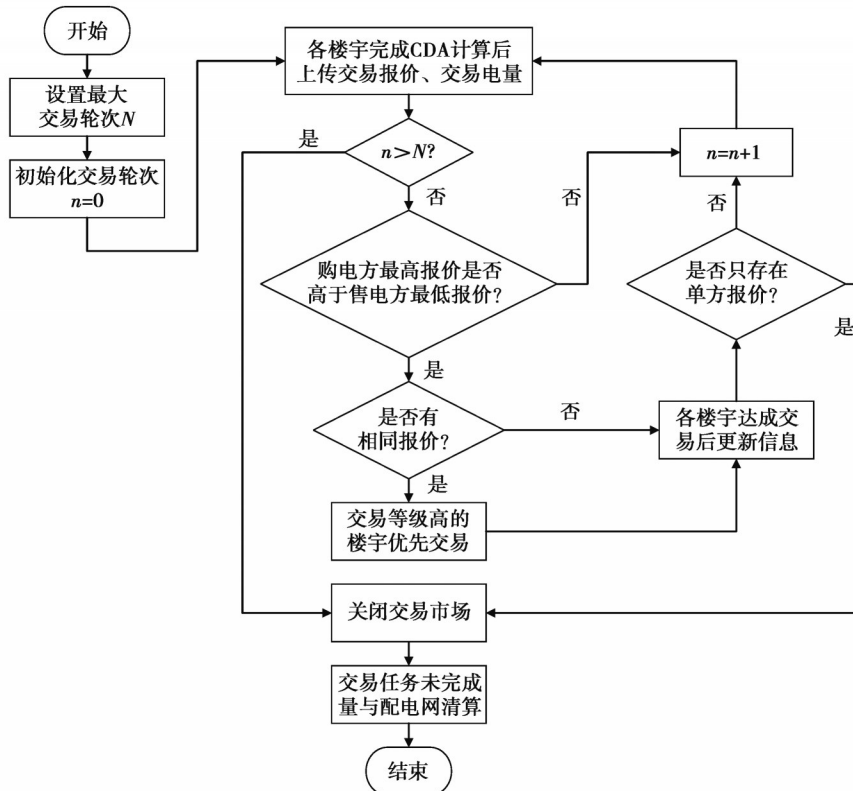


图4 交易流程图

Fig. 4 Trading flowchart

4.2 新型CDA交易机制

各楼宇根据运行情况、交易轮次、交易风险和历史报价等信息不断更新自身报价。在报价范围内,购电方报价越高、售电方报价越低则越利于交易的达成,反之则会阻碍交易。因此,引入交易风险因子 μ_n ,反映市场变化和交易电量差异对各楼宇交易报价的影响。

交易市场分为买方和卖方市场,其中买方市场指市场总购电电量小于售电电量,市场价格利好倾向于购电方;卖方市场指市场总购电电量大于售电电量,市场价格利好倾向于售电方。买方市场中的购电方和卖方市场中的售电方均为趋向风险型即 $\mu_n \geq 0$,待交易电量越小风险因子越大,交易中越趋向寻求更高利益;买方市场中的售电方和卖方市场中的购电方都为规避风险型即 $\mu_n \leq 0$,待交易电量越小风险因子绝对值越大,交易中越趋向提高交易成功率而非寻求更高利益。交易风险因子表达式为

$$\begin{cases} \mu_{\text{set},t} = 1 - \frac{P_{i,t}}{P_{\text{all},t}}, \\ \mu_{(n+1),t} = \mu_{n,t} + l(\mu_{\text{set},t} - \mu_{n,t}). \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mu_{\text{set},t}$ 为 t 时段风险因子设置值,同该楼宇 t 时段交易电量 $P_{i,t}$ 和交易市场总交易量 $P_{\text{all},t}$ 相关,且在交易过程中随两者的变化而变化; $\mu_{n,t}$ 和 $\mu_{(n+1),t}$ 为 t 时段第 n 轮和下一轮次的风险因子; l 为风险因子自学习率。考虑交易风险并引入风险因子的CDA交易机制如下。

1) 针对购电方,在 t 时段第 n 轮次报价大于历史成交价格最低值时:

$$\begin{cases} B_{n,t} \geq \min\{B_{B,t,\text{his}}\}; \\ \text{if } \mu_{n,t} \leq 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} - \alpha(1 - \lambda_n)(B_{n,t} - P_{b,t}) - \beta\mu_{n,t}(P_{s,t} - B_{n,t}); \\ \text{if } \mu_{n,t} > 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} - \alpha(1 - \lambda_n)(B_{n,t} - P_{b,t}) - \beta\mu_{n,t}(B_{n,t} - P_{b,t}). \end{cases} \quad (19)$$

小于历史成交价格最低值时:

$$\begin{cases} B_{n,t} \leq \min\{B_{B,t,his}\}; \\ \text{if } \mu_{n,t} \leq 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} + \alpha\lambda_n(P_{s,t} - B_{n,t}) - \beta\mu_{n,t}(P_{s,t} - B_{n,t}); \\ \text{if } \mu_{n,t} > 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} + \alpha\lambda_n(P_{s,t} - B_{n,t}) - \beta\mu_{n,t}(B_{n,t} - P_{b,t}). \end{cases} \quad (20)$$

2)针对售电方,在 t 时段第 n 轮次报价小于历史成交价格最高值时:

$$\begin{cases} B_{n,t} \leq \max\{B_{S,t,his}\}; \\ \text{if } \mu_{n,t} \leq 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} + \alpha(1 - \lambda_n)(P_{s,t} - B_{n,t}) + \beta\mu_{n,t}(B_{n,t} - P_{b,t}); \\ \text{if } \mu_{n,t} > 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} + \alpha(1 - \lambda_n)(P_{s,t} - B_{n,t}) + \beta\mu_{n,t}(P_{s,t} - B_{n,t}). \end{cases} \quad (21)$$

大于历史成交价格最高值时:

$$\begin{cases} B_{n,t} \geq \max\{B_{S,t,his}\}; \\ \text{if } \mu_{n,t} \leq 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} - \alpha\lambda_n(B_{n,t} - P_{b,t}) + \beta\mu_{n,t}(B_{n,t} - P_{b,t}); \\ \text{if } \mu_{n,t} > 0, B_{(n+1),t} = B_{n,t} - \alpha\lambda_n(B_{n,t} - P_{b,t}) + \beta\mu_{n,t}(P_{s,t} - B_{n,t}). \end{cases} \quad (22)$$

式中: $B_{B,t,his}$ 为购电方 t 时段的历史成交价; $B_{S,t,his}$ 为售电方 t 时段的历史成交价; $B_{n,t}$ 为该楼宇 t 时段第 n 轮次的交易报价; $P_{b,t}$ 和 $P_{s,t}$ 表示 t 时段交易市场的边际购售电价,为配电网的购售电价或各楼宇迭代优化中更新的购售电均价; α 和 β 为交易权重系数。为推进交易报价的进行引入悲观系数 λ_n ,其表达式为

$$\lambda_n = \frac{n^2}{N^2}. \quad (23)$$

5 算例分析

5.1 模型参数

算例分析包含 3 栋住宅楼宇、2 栋商业楼宇和 1 栋特殊楼宇。各楼宇建筑参数、设备参数、运行优化特性见表 2~4,典型日在室人数见图 5,各楼宇基础柔性负荷见图 6。算例选取中国北方夏季某典型日,室外温度和光照辐射强度曲线见图 7。

表 2 楼宇建筑参数

Table 2 Building parameters

楼宇编号	$K_{wall}/(W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1})$	F_{wall}/m^2	$K_{win}/(W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1})$	F_{win}/m^2
住宅楼宇 A	0.93	810	1.76	440
住宅楼宇 B	0.95	1 065	1.85	600
住宅楼宇 C	0.98	980	1.94	530
商业楼宇 D	1.09	700	2.80	1 600
商业楼宇 E	1.29	615	2.80	960
特殊楼宇 F	0.93	1 620	2.00	2 800

表 3 楼宇设备参数

Table 3 Building equipment parameters

设备参数	数值	设备参数	数值
空气密度 $\rho_{air}/(kg \cdot m^{-3})$	1.29	储能设备容量 $E_{sto}/(kW \cdot h)$	100,80,140
空气比热容 $C_{air}/(J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1})$	1 005	储能设备充电功率 $P_{ch}/(kW \cdot h)$	15,10,20
HVAC 能效比 C_{cop}	3	储能设备放电功率 $P_{dis}/(kW \cdot h)$	15,10,20
送风风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	4	充电效率 η_{ch}	0.95
静态压强差 P_{static}/Pa	135	放电效率 η_{dis}	0.95
风机电机系数积 $\eta_{fan}\eta_{motor}$	0.15	光伏系数 μ_{sun}	1.4~3.0
送风温度 $T_{HVAC}/^\circ C$	20~30	光电转换率 P_{STC}	0.436
送风质量流 $m_f/(kg \cdot s^{-1})$	30~135	人均散热量 Q_{peo}/W	43.84
柔性负荷调节系数 ε_p	0.15	人均耗电功率 P_{peo}/W	100

表4 楼宇优化特性

Table 4 Building optimization characteristics

楼宇类型	温度范围/°C	优化时段	最大迭代次数 K	温度惩罚系数 γ
住宅楼宇	21.5~26.5	全天	4	0.06,0.09,0.08
商业楼宇	21.5~26.5	8:00—19:00	4	0.31,0.18
特殊楼宇	22.5~25.5	全天	4	0.23

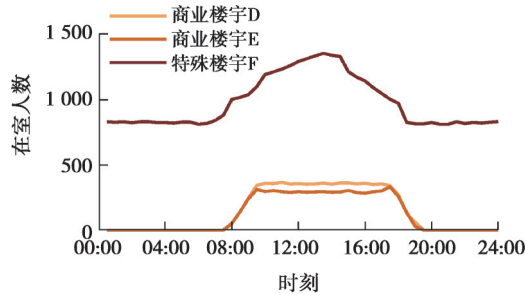
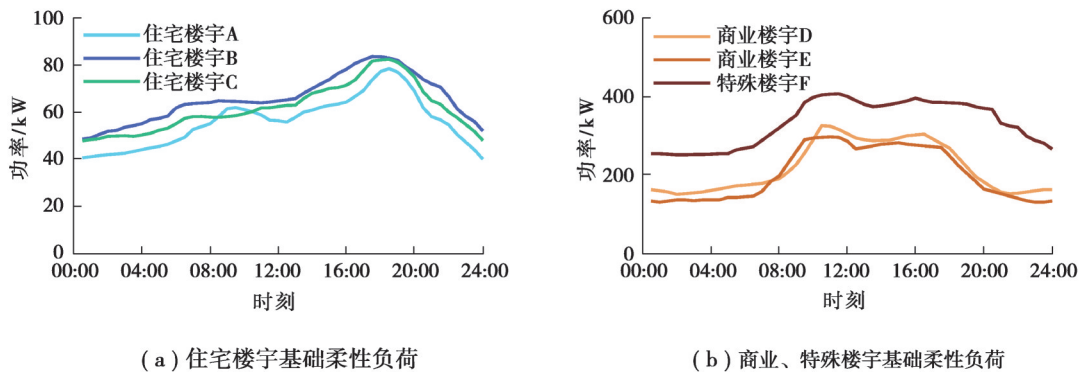


图5 楼宇在室人数

Fig. 5 Number of people in buildings



(a) 住宅楼宇基础柔性负荷

(b) 商业、特殊楼宇基础柔性负荷

图6 楼宇基础柔性负荷

Fig. 6 Flexible load of buildings

考虑1天的经济优化调度,设定30 min为1个时段,配电网实时购售电价格如图8所示,通过Gurobi求解器进行问题求解,针对目标函数中的绝对值,利用yalmip求解工具中的implies函数进行优化处理。

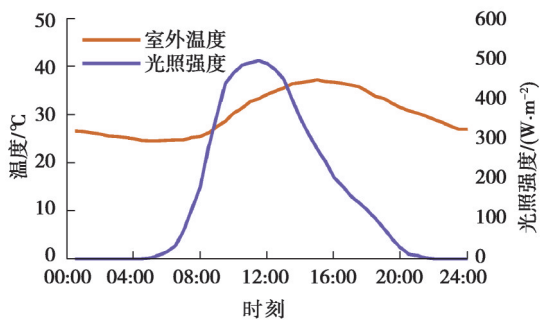


图7 光照强度及室外温度

Fig. 7 Solar radiation and outdoor temperature

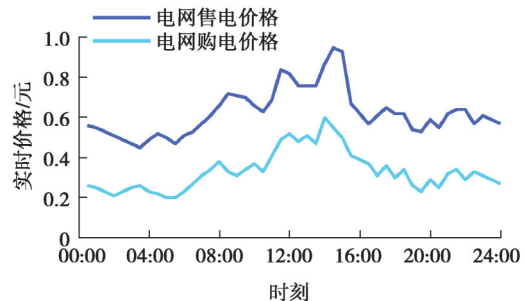


图8 实时电价

Fig. 8 Real-time price of electricity

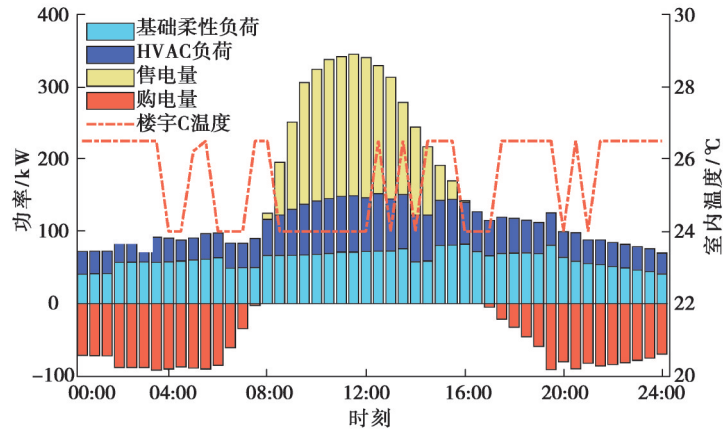
5.2 结果分析

5.2.1 楼宇运行优化分析

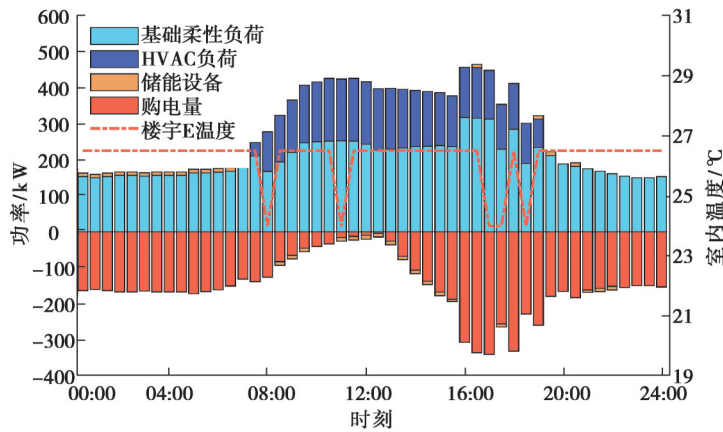
各楼宇参与市场交易前的运行优化结果,因楼宇结构、使用特性和设备组成的不同有所区别。以住宅楼宇C,商业楼宇E,和特殊楼宇F进行对比分析。

从图9(a)可看出,住宅楼宇C的基础柔性负荷受配电网购售电价影响,16:00—21:00的用电高峰向9:00—13:00分布式能源发电较多的时段偏移。该楼宇在8:00—16:00为售电方,HVAC系统能耗受配电网购

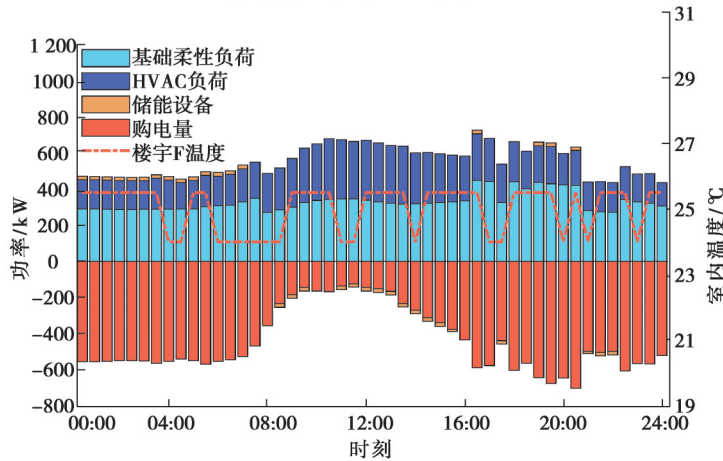
电电价影响,低电价时段增加能耗,降低室温实现虚拟储能;高电价时段减少能耗,释放虚拟储能。从图 9(b)可看出,商业楼宇 E 受配电网售电价影响,9:30—15:30 的高电价时段峰值负荷向两侧低电价时段转移;受基础柔性负荷、储能设备和 HVAC 系统能耗共同调节作用,商业楼宇 E 在高电价 9:30—15:30 时段购电量明显下降。从图 9(c)可看出,特殊楼宇 F 同楼宇商业 E 类似,9:00—16:00 的基础柔性负荷向两侧低电价时段转移,受基础柔性负荷、储能设备和 HVAC 系统能耗共同调节作用,特殊楼宇 F 在高电价 9:30—15:30 时段购电量同样下降明显。



(a) 住宅楼宇 C 运行情况



(b) 商业楼宇 E 运行情况



(c) 特殊楼宇 F 运行情况

图 9 楼宇运行情况

Fig. 9 Buildings operation

各楼宇设备用能情况受配电网购售电价影响,在高电价时段降低用能以减少购电量或增加售电量;减少的购电量有效降低了楼宇运行成本,但同时削弱了楼宇群的能源共享量。

5.2.2 P2P交易特性分析

各楼宇完成运行优化后向上级市场提交信息进行P2P交易,各楼宇待交易情况和CDA交易机制参数设置如表5和表6所示。选取2个时间段的交易情况进行对比分析,其中8:30—9:00为卖方市场,售电方能以较高价格达成交易;9:00—9:30为买方市场,购电方能以较低价格达成交易。

表5 楼宇待交易情况
Table 5 Pending trading of buildings

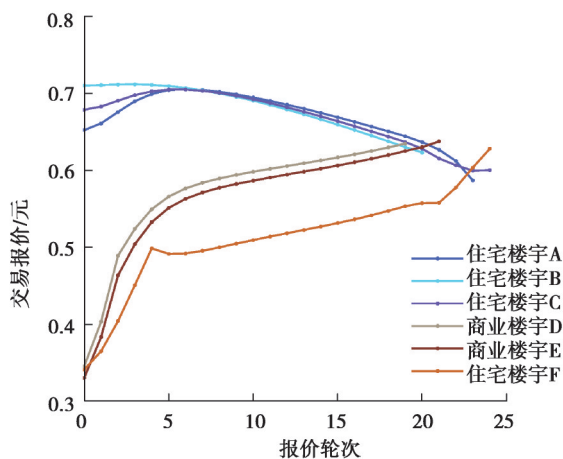
楼宇编号	8:30—9:00待交易 电量/(kW·h)	8:30—9:00初始 风险因子设置值	9:00—9:30待交易 电量/(kW·h)	9:00—9:30初始 风险因子设置值
楼宇A	-26.1	0.76	-45.5	-0.75
楼宇B	-44.2	0.59	-73.3	-0.59
楼宇C	-36.5	0.66	-60.5	-0.66
楼宇D	22.2	-0.88	6.7	0.94
楼宇E	41.3	-0.77	32.6	0.75
楼宇F	116.8	-0.35	91.8	0.29

表6 交易设置
Table 6 Trading settings

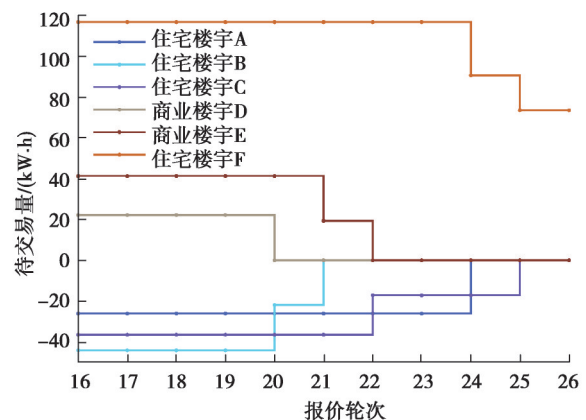
最大交易轮次 N	风险因子自学率 l	悲观系数权重 α	风险因子权重 β
30	0.3	0.4	0.6

由图10可知,各楼宇报价受买卖市场关系和风险因子值的影响,如在8:30—9:00第22轮次,住宅楼宇C和商业楼宇E达成交易后,剩余待交易电量小于住宅楼宇A,此时楼宇C的交易风险更小,更新风险因子后为追求更高利益楼宇C在第23和24轮次的报价下降速率低于楼宇A,并最终高于楼宇A的报价达成交易。对比2类市场交易情况,购售电双方中低风险的楼宇为寻求更高利益,会比高风险楼宇以更靠后的交易轮次和更优的报价达成交易。综上,P2P交易市场本质是利用市场关系,使卖方市场中成交价格倾向配电网售电价,使买方市场中成交价格倾向配电网购电价。

交易完成后,各楼宇根据报价情况更新自身购售电均价,以住宅楼宇A和商业楼宇E为例。如图11所示,住宅楼宇A为售电方,能在卖方市场8:30—9:00、14:00—15:30时段以较高价格售电,其余时段售电价格也高于配电网购电价;商业楼宇E为购电方,能在买方市场9:00—13:30时段以较低价格购电,其余时段购电价格也低于配电网售电价。



(a) 8:30—9:00市场报价情况



(b) 8:30—9:00交易达成情况

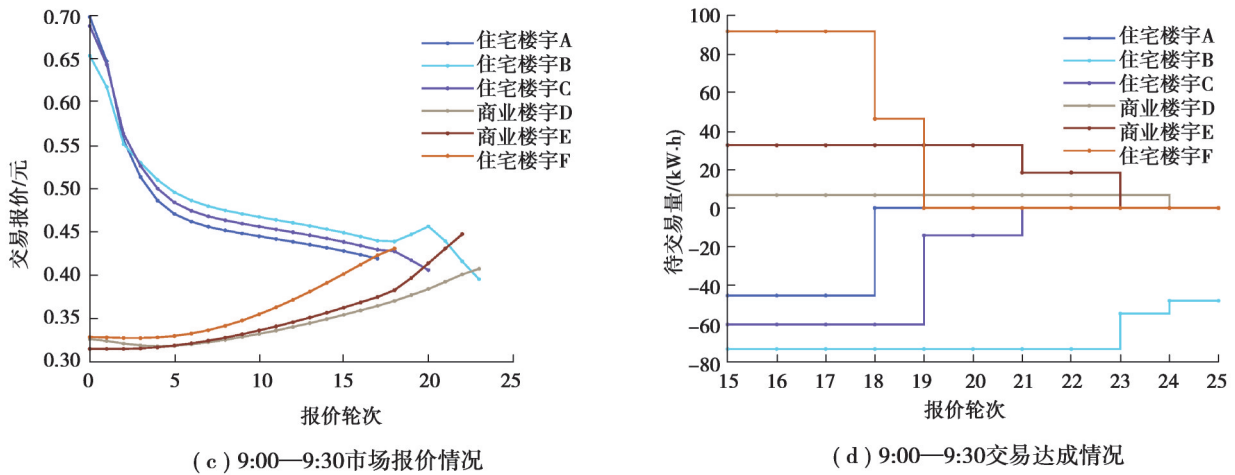


图 10 市场交易情况

Fig. 10 Market trading situation

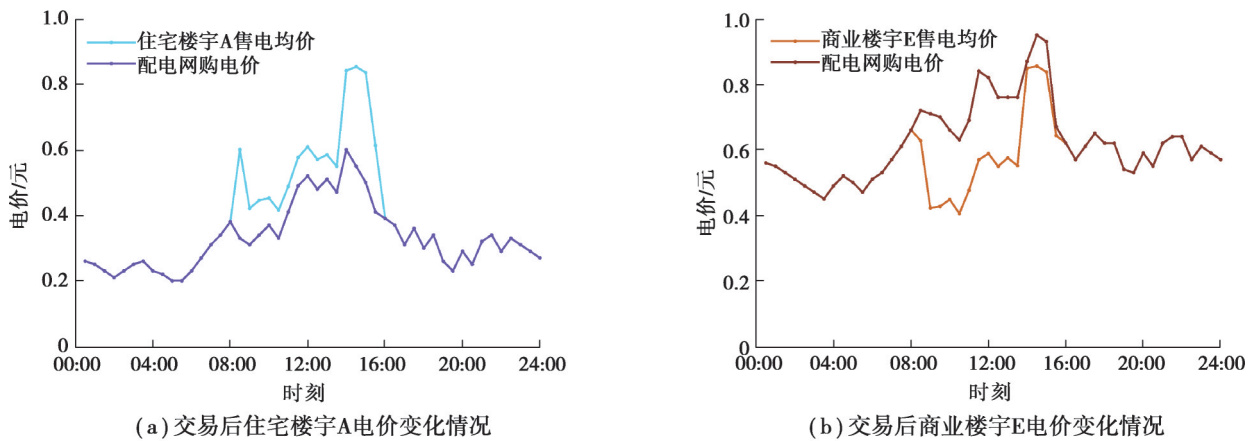


图 11 交易后楼宇电价变化情况

Fig. 11 Changes in building electricity price after trading

提出的新型 CDA 交易机制能稳定反映买卖双方市场关系、交易风险对各楼宇交易报价和交易结果的影响;该 CDA 交易机制拥有较好的动态特性,能通过实时更新的交易报价,更好地反映各楼宇在交易过程中信息的动态变化。

5.2.3 楼宇运行迭代优化分析

为验证所提交易市场和迭代优化对各楼宇运行和楼宇群能源共享的影响,对住宅楼宇 C、商业楼宇 E 和特殊楼宇 F 以下列 2 种案例进行对比分析,并探究在案例 2 条件下的最大迭代次数选值问题。

案例 1:各楼宇完成运行优化后,进行 P2P 市场交易,不考虑楼宇的迭代优化。

案例 2:各楼宇考虑迭代优化,完成楼宇运行优化迭代和市场交易迭代。

对比表 7 中各楼宇运行优化和案例 1 最终成本可知,楼宇 C 在市场交易后成本优化明显,是因为市场开放时段,楼宇 C 为售电方,且交易电量在自身总能耗中占比较高;楼宇 E 受基础柔性负荷调节影响,市场开放时段的交易电量占比较低,因此,交易后成本变化不明显。

表 7 案例对比

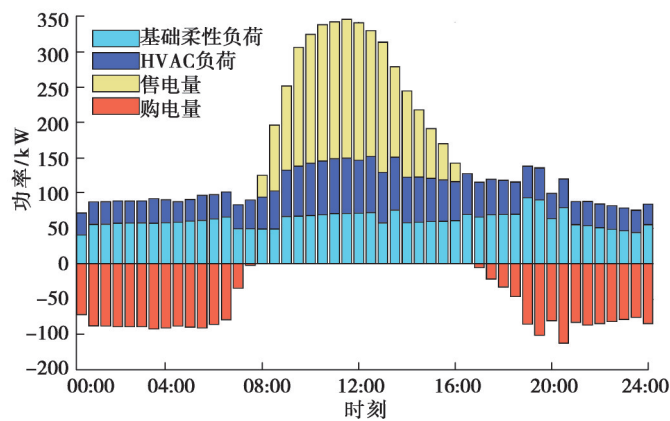
Table 7 Case comparison			元
楼宇编号	楼宇运行优化成本	案例 1 最终成本	案例 2 最终成本
楼宇 C	113.5	45.4	17.7
楼宇 E	2 146.8	2 093.8	2 023.4
楼宇 F	6 291.4	6 073.7	5 948.3

P2P市场交易本质是利用市场关系,使买、卖方市场中的交易价格倾向配电网的购电、售电价。如表8所示,随着最大迭代次数的增加和P2P市场交易迭代的进行,各楼宇交易报价区间不断缩小,使交易和迭代优化结果趋于平稳。为平衡优化效果和优化运行时间,设定最大交易迭代次数为4。

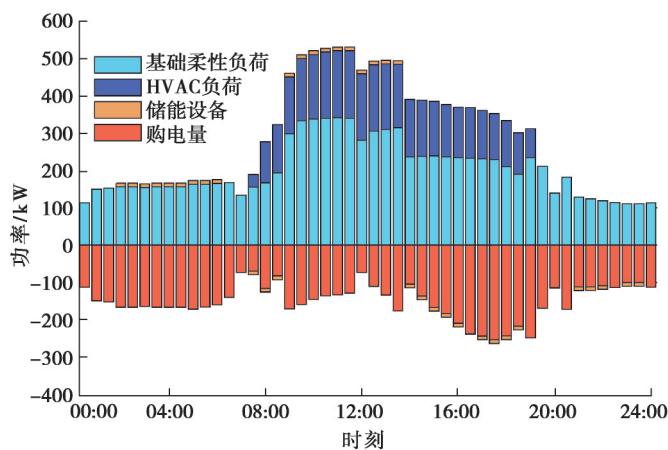
表8 案例2最大迭代次数分析
Table 8 Maximum iterations analysis of case 2

迭代次数	最终成本/元		
	楼宇C	楼宇E	楼宇F
2	18.2	2 027.2	5 956.9
3	17.8	2 023.9	5 951.1
4	17.7	2 023.4	5 948.3
5	17.6	2 023.4	5 948.3

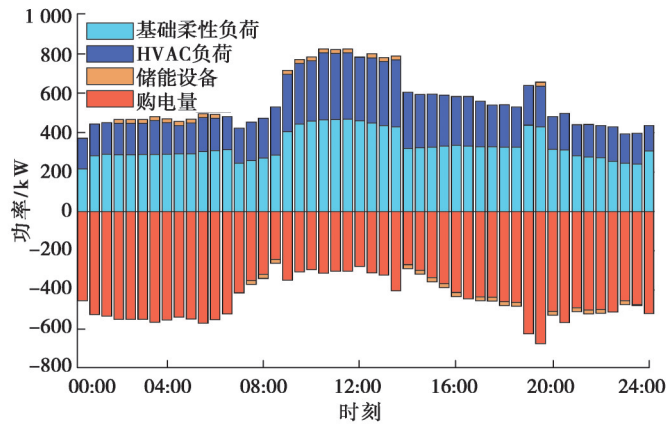
对比图9和图12,受迭代优化影响,各楼宇设备运行情况发生较大改变。9:00—13:30时段分布式能源发电多,交易市场为买方市场,购电方能以较低价格达成交易,因此,案例2中楼宇E和楼宇F的基础柔性负荷、储能设备和HVAC系统能耗均向该时段偏移;8:00—9:00和13:30—16:00时段分布式能源发电降低,交易市场为卖方市场,售电方能以较高价格达成交易,因此,案例2中楼宇C为能在卖方市场时段出售更多电能,其基础柔性负荷和HVAC系统能耗向该时段两侧偏移。如表7所示,受价格变化和负荷调整共同影响,案例2中各楼宇的最终成本均有所降低。



(a) 案例2住宅楼宇C运行情况



(b) 案例2商业楼宇E运行情况



(c) 案例2特殊楼宇 F运行情况

图 12 案例 2 楼宇运行情况

Fig. 12 Buildings operation of case2

迭代优化中市场价格的变化对楼宇运行状况和楼宇群能源共享能力有较大影响。通过价格变化驱使各楼宇调整运行状态,将各类负荷峰值向分布式能源发电量较多的时段转移,改善了楼宇群能源共享情况。如图 13 所示,楼宇群分布式能源对配电网售电量由 1 563.8 kW·h 降低至 100.6 kW·h,楼宇群能源共享量由 1 645.8 kW·h 提升至 3 275.1 kW·h。通过迭代优化,提升了各楼宇运行的经济性,并极大提升了楼宇群能源共享的能力和对分布式能源的消纳能力。

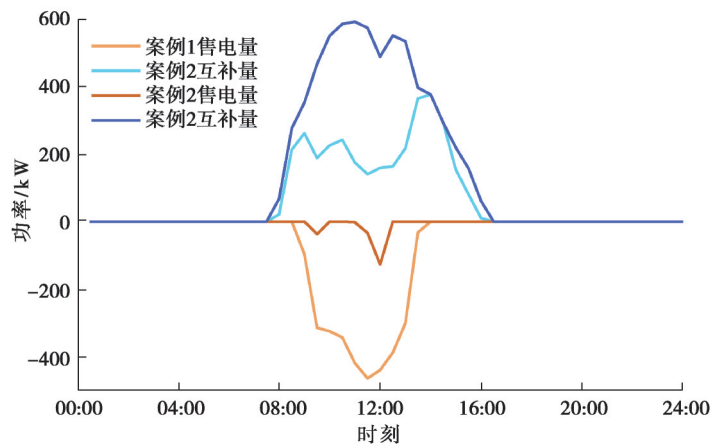


图 13 楼宇群能源利用情况

Fig. 13 Energy utilization in buildings

为进一步探究文中所提交易市场、交易机制和配电网购售电价对楼宇群能源共享和分布式能源消纳能力的影响,选取不同的交易权重系数和配电网购售电价进行对比分析,如表 9 所示。随着风险因子系数 β 提升,各楼宇交易后更新的购售电均价越接近配电网购售电价,交易市场变化导致的价格差越大,通过迭代优化,更大的价格差对各楼宇负荷的调整作用更明显,因此,楼宇群能源共享量不断提升,楼宇群对外售电量不断减少,即分布式能源的消纳能力不断提升。如表 10 所示,经过迭代优化后,更大的配电网购售电价格差同样会使各楼宇的负荷调节作用更加明显,使楼宇群能源共享和对外售电优化比不断提升。

表 9 交易权重系数对比

Table 9 Trading weight factor comparison

交易权重	能源共享量/(kW·h)	对外售电量/(kW·h)
$\alpha=0.8;\beta=0.2$	3 221.2	199.7
$\alpha=0.6;\beta=0.4$	3 234.6	151.5
$\alpha=0.4;\beta=0.6$	3 275.1	100.6
$\alpha=0.2;\beta=0.8$	3 301.3	64.6

表10 电网分时电价对比

Table 10 Time-of-day tariff comparison

购售电价	能源共享优化比/%	对外售电优化比/%
原购售电价	98.9	93.6
售电价+0.05,购电价-0.05	110.7	96.9
售电价+0.1,购电价-0.1	111.1	98.0

5.2.4 楼宇运行鲁棒特性分析

为研究不同不确定因素和鲁棒系数 r 对楼宇群能源共享和分布式能源消纳的影响,本工作在案例2的基础上分3类情况进行讨论分析:考虑人员不确定性;考虑光照强度不确定性;同时考虑两者不确定性。

人员不确定性主要影响商业、特殊楼宇的基础电负荷。上述2类楼宇均为购电方,如表11和图14(a)所示,随着鲁棒系数提高,增加的基础电负荷会提升这2类楼宇的购电量,进而提升楼宇群的共享电量,减少对外售电量,且基础电负荷量越大优化效果越好;楼宇群的初始共享量和优化后的共享量均随鲁棒系数的提高而提高,但增加的能源互补量相对固定,所以表现出楼宇群能源互补优化百分比下降的趋势。

表11 人员不确定性鲁棒分析

Table 11 Robust analysis of personnel uncertainty

鲁棒系数	初始共享量/(kW·h)	优化共享量/(kW·h)	初始售电量/(kW·h)	优化售电量/(kW·h)
0.2	1 656.1	3 291.2	1 553.5	81.8
0.4	1 666.4	3 301.2	1 543.3	76.0
0.6	1 676.7	3 292.4	1 533.0	73.3
0.8	1 686.9	3 308.7	1 522.7	60.0
1.0	1 697.2	3 308.1	1 512.5	54.8

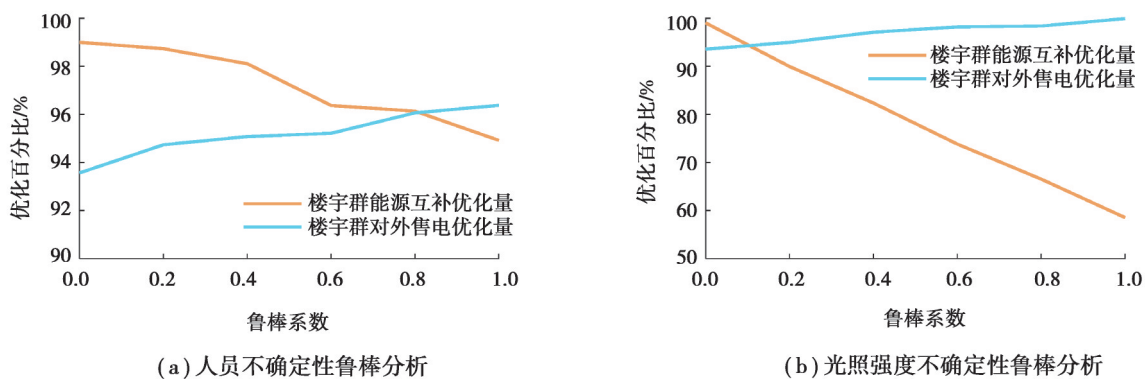


图14 鲁棒优化分析

Fig. 14 Robust optimization analysis

光照强度不确定性主要影响楼宇分布式能源发电量。如表12和图14(b)所示,随着鲁棒系数变大,分布式能源发电量和交易时段均减少,针对基础负荷的调控能力减弱,因此,楼宇群能源互补优化量下降;尽管楼宇群对外售电优化量随鲁棒系数的增加有所减少,但分布式能源发电量减少的速率更快,所以楼宇群对外售电优化百分比仍表现出上升的趋势。

同时考虑两者不确定性的结果同图14(b)类似,由此可知,楼宇群能源互补优化量主要受分布式能源发电量的影响,楼宇群对外售电优化百分比在两者共同作用下仍呈现上升趋势。因此,提出的楼宇优化迭代方法能在各类场景下以经济性为目标,有效提升楼宇群能源共享和分布式能源消纳能力。

表 12 光照强度不确定性鲁棒分析

Table 12 Robust analysis of Solar radiation uncertainty

鲁棒系数	初始共享量/(kW·h)	优化共享量/(kW·h)	初始售电量/(kW·h)	优化售电量/(kW·h)
0.2	1 689.3	3 209.1	1 413.4	71.1
0.4	1 720.6	3 137.8	1 276.8	37.1
0.6	1 753.9	3 048.4	1 140.1	20.5
0.8	1 772.4	2 951.8	1 018.7	16.7
1.0	1 791.5	2 840.3	898.0	0.9

4 结 论

提出了一种考虑楼宇特性、电能交易的楼宇群分布式优化调度模型,建立了以经济性、舒适性为目标的楼宇运行优化模型,并通过考虑市场关系、交易风险的新型连续拍卖交易机制,激励和引导各楼宇实现各类不确定条件下的楼宇群能源共享。主要结论如下:

1)提出一种新型连续拍卖交易机制,可根据市场关系、楼宇运行情况完成市场竞价,各楼宇报价根据整体交易情况实时更新,具有良好的稳定性和动态特性。

2)通过交易价格的更新引导各楼宇完成迭代优化,提升楼宇经济性的同时进一步挖掘各楼宇调节负荷的能力;实现楼宇间能源共享的同时,提升楼宇群能源共享的能力和分布式能源消纳能力,并在算例中讨论了不同交易权重的影响。

3)提出考虑人员不确定性和光照强度不确定性的楼宇群分布式鲁棒优化模型,验证了该模型能在各类场景下有效提升楼宇群能源共享的能力和分布式能源消纳能力。

参考文献

- [1] 杜祥琬. 我国能源转型几个关键问题值得深思[J]. 中国石油企业, 2020(12): 10-11.
Du X W. Several key issues in China's energy transformation are worth pondering[J]. China Petroleum Enterprise, 2020(12): 10-11.(in Chinese)
- [2] 张显, 史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 1-11.
Zhang X, Shi L J. Future research areas and key technologies of electricity market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 1-11.(in Chinese)
- [3] Tian W, Heo Y, de Wilde P, et al. A review of uncertainty analysis in building energy assessment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 285-301.
- [4] Majdi A, Dwijendra N K A, Muda I, et al. A smart building with integrated energy management: steps toward the creation of a smart city[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102663.
- [5] 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 X L, Mu Y F, Jia H J, 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)
- [6] 张风晓, 靳小龙, 穆云飞, 等. 融合虚拟储能系统的楼宇微网模型预测调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4420-4428, 4642.
Zhang F X, Jin X L, Mu Y F, et al. Model predictive scheduling method for a building microgrid considering virtual storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4420-4428, 4642.(in Chinese)
- [7] Sharma S, Verma A, Xu Y, et al. Robustly coordinated bi-level energy management of a multi-energy building under multiple uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 3-13.
- [8] Dedesko S, Stephens B, Gilbert J A, et al. Methods to assess human occupancy and occupant activity in hospital patient rooms [J]. Building and Environment, 2015, 90: 136-145.
- [9] Ruan H B, Gao H J, Gooi H B, et al. Active distribution network operation management integrated with P2P trading[J]. Applied

- Energy, 2022, 323: 119632.
- [10] Soto E A, Bosman L B, Wollega E, et al. Peer-to-peer energy trading: a review of the literature[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116268.
- [11] 朱嘉远, 刘洋, 许立雄, 等. 考虑风电消纳的热电联供型微网日前鲁棒经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 40-48.
Zhu J Y, Liu Y, Xu L X, et al. Robust day-ahead economic dispatch of microgrid with combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 40-48.(in Chinese)
- [12] Park B R, Chung M H, Moon J W. Becoming a building suitable for participation in peer-to-peer energy trading[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103436.
- [13] Jian P R, Guo T T, Wang D, et al. RETRACTED: risk-based energy management of industrial buildings in smart cities and peer-to-peer electricity trading using second-order stochastic dominance procedure[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 77: 103550.
- [14] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑智能建筑特性的多微网端对端能量交易方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 203-214.
Ge S Y, Li J F, Liu H, et al. Peer-to-peer energy trading method for multiple microgrids considering characteristics of smart building[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 203-214.(in Chinese)
- [15] Li Z P, Ma T. Distributed photovoltaics with peer-to-peer electricity trading[J]. Energy and Built Environment, 2022, 3(4): 424-432.
- [16] Kopanos G M, Georgiadis M C, Pistikopoulos E N. Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators[J]. Applied Energy, 2013, 102: 1522-1534.
- [17] Huang Y, Valipour E, Nojavan S, et al. RETRACTED: risk modeling of an industrial area with shared storage of several buildings using downside risk constraint method considering peer-to-peer trading[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47: 103540.
- [18] Wei Z, Xu W, Wang D, et al. A study of city-level building energy efficiency benchmarking system for China[J]. Energy and Buildings, 2018, 179: 1-14.
- [19] Shi H S, Chen Q. Building energy management decision-making in the real world: a comparative study of HVAC cooling strategies[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101869.
- [20] Buonomano A, Palombo A. Building energy performance analysis by an in-house developed dynamic simulation code: an investigation for different case studies[J]. Applied Energy, 2014, 113: 788-807.
- [21] Luo X, Lam K P, Chen Y X, et al. Performance evaluation of an agent-based occupancy simulation model[J]. Building and Environment, 2017, 115: 42-53.

(编辑 吕建斌)