

基于碳市场的既有商业建筑虚拟电厂改造全生命周期技术经济性评估

尚楠¹, 刘玺¹, 潘珍², 朱浩骏¹

(1. 南方电网能源发展研究院, 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司, 南宁 530015)

摘要: 商业建筑占全国建筑总面积的 25 % 以上, 且碳排放强度较其他类型建筑更高。商业建筑虚拟电厂改造有助于找到降低商业建筑高碳排的路径。从全生命周期角度对商业建筑虚拟电厂改造进行探究, 提出了基于商业建筑参与碳交易场景下的商业建筑虚拟电厂改造的技术经济性评估方法。从经济性角度考虑包括改造初始投资成本、运营成本、参与碳市场交易收益等评价既有商业建筑虚拟电厂改造全生命周期的经济性。从技术性角度分析商业建筑碳排放行为特点, 从虚拟电厂用能、储能、发电三类改造行为出发, 评估既有商业建筑全生命周期的降碳潜力。仿真算例结果表明, 随着商业建筑虚拟电厂改造总成本的增加, 商业建筑生命周期碳排放量也会相对降低, 需要平衡两者关系, 最终实现虚拟电厂改造成本与商业建筑降碳之间的双赢。技术经济性评估表明, 商业建筑虚拟电厂改造静态投资回收期为 4 年左右, 其在水经济性方面具备可行性, 且商业建筑虚拟电厂改造具备显著降碳潜力。因此, 尽管需要一定初始投资, 但对既有商业建筑进行虚拟电厂改造在技术经济性上具有可行性。

关键词: 既有商业建筑; 虚拟电厂改造; 技术经济性评估; 全生命周期; 碳市场

Technical and Economic Assessment of the Full Life Cycle of Virtual Power Plant Renovation for Existing Commercial Buildings Based on Carbon Market

SHANG Nan¹, LIU Xi¹, PAN Zhen², ZHU Haojun¹

(1. Energy Development Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530015, China)

Abstract: Commercial buildings account for over 25 % of the total building area nationwide and exhibit higher carbon emission intensity than other building types. Retrofitting these buildings into virtual power plants (VPPs) offers a promising pathway to mitigate their carbon footprint. A technical and economic assessment method of the virtual power plants renovation in commercial buildings based on commercial buildings participating in carbon trading is proposed, exploring the transformation of virtual power plants in commercial buildings from a full lifecycle perspective. From an economic perspective, the analysis incorporates initial retrofit investment, operating costs, and revenue from carbon trading to evaluate lifecycle economic viability of virtual power plant renovation for existing commercial buildings. From a technical perspective, the characteristics of carbon emissions behavior in commercial buildings are analyzed, and the carbon reduction potential of existing commercial buildings throughout their entire lifecycle based on three types of transformation behaviors are evaluated: energy consumption, energy storage, and power generation in virtual power plants. The simulation results show that as the total cost of virtual power plant renovation in commercial buildings increases, the carbon emissions in the lifecycle of commercial buildings will also relatively decrease. It is necessary to balance the relationship between the two and ultimately achieve a win-win situation between the cost of virtual power plant renovation and carbon reduction in commercial buildings. The technical and economic assessment shows that the static investment payback period for the transformation of commercial building virtual power plants is about 4 years, which is feasible in terms of economy, and the transformation of commercial building virtual power plants has significant carbon reduction potential. Therefore, although a certain initial investment is required, the transformation of existing commercial buildings into virtual power plants is technically and economically feasible.

Key words: existing commercial buildings; virtual power plant renovation; technical and economic assessment; full life cycle; carbon market

0 引言

近年来,我国建筑全过程碳排放总量超 50.8 亿 t, 约占全国碳排放的 50.9%^[1]。其中,以商业建筑为主的公共建筑运行阶段碳排放高达 9.5 亿 t, 进一步证实了公共建筑降碳减排的重要性^[2]。目前,由于规模大、使用频率高、功能复杂等原因,大部分商业建筑能源利用率低且运行碳排放量高^[3]。随着建造规模的增长,商业建筑用能量及碳排放量也在逐年增长,如何在“双碳”背景下提高商业建筑能源利用效率、降低碳排放已成为新的关注焦点^[4]。

伴随我国商业建筑能源需求增长和能源结构调整,其负荷可调控特性日渐突出,同时商业建筑也具有可观的虚拟电厂开发潜力^[5]。商业建筑虚拟电厂作为一种新型的能源管理系统将成为商业建筑解决规模增长与高碳排矛盾的有效手段^[6],即虚拟电厂资源可以在不影响商业建筑运行的基础上调控产-储-用能之间的行为关系,减少高峰期间用电需求,进而通过可再生能源和储能技术的联合应用实现建筑负荷的“削峰填谷”及节能降碳^[7]。因此,商业建筑虚拟电厂已经成为解决商业建筑能源问题,提高能源利用效率、降低碳排放量的有效途径,也是实现建筑可持续发展的重要手段^[8]。图 1 为虚拟电厂运行关系图。

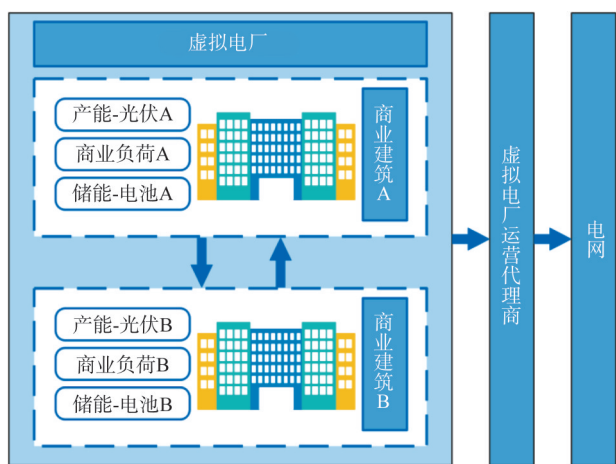


图 1 虚拟电厂运行关系图

Fig. 1 Virtual power plant operational relationship diagram

现阶段,碳市场发展迅速,自中国核证自愿减排市场(Chinese Certified Emission Reduction, CCER)正式上线以来已迅速发展为全球最大规模的

碳排放权交易体系之一,能源需求侧将逐步纳入碳市场中,其中,碳价格(碳交易市场中每吨 CO₂ 的交易成本)将会显著改变既有商业虚拟电厂改造的投资回报,当碳价格上升时,通过在虚拟电厂改造中减少碳排放所获得的碳交易收益提高项目的净现值和内部收益率。反之,碳价格走低则削弱了该类减排措施的经济吸引力。

本文将借助商业建筑虚拟电厂的构建在碳价格基础上考虑改造经济可行性,挖掘商业建筑减碳节能潜力,在全生命周期视角下实现分布式电源、储能系统、电动汽车等分布式能源聚合的技术经济最佳,最终达到商业建筑向智慧能源低碳转型的主要目的。

目前,对虚拟电厂的研究多从运营代理商角度进行剖析,例如:从运营代理商角度对虚拟电厂能源调度的灵活性进行评估^[9],但未在既有建筑背景下考虑碳市场因素对虚拟电厂调度的作用。随着双碳目标的发展,在虚拟电厂调度中引入碳交易机制也得到了广泛关注,有研究提出了不同虚拟电厂间的交易方法^[10],也有部分研究在虚拟电厂调度策略中引入碳交易机制,分析了低碳对虚拟电厂调度的影响^[11-12],但均未从既有建筑角度给予虚拟电厂资源改造建议。有研究从经济性角度出发建立核-火-虚拟电厂三阶段调度优化模型,以调峰成本最小为目标,对虚拟电厂的调峰策略进行研究^[13],但未考虑虚拟电厂改造前期费用。而既有建筑改造的研究多集中于技术路径和能效提升的描述性分析^[30-32],缺乏对实际改造过程中经济性约束^[33-35]及政策执行障碍的批判性评估^[36]。综上,本文结合碳价格及虚拟电厂既有建筑改造的全生命周期成本,从商业建筑角度出发,对虚拟电厂降碳潜力及经济性进行评估,以挖掘需求侧建筑降碳潜力,最终实现建筑运行成本与减碳目标的优化共赢。

1 商业建筑碳排放特点

商业建筑的碳排放分为直接碳排放与间接碳排放。直接碳排放为商业建筑在提供餐饮服务时使用化石燃料进行烹饪、加热水等产生的直接碳排放。直接碳排放商业建筑碳排放中所占比重较小,在推进建筑电气化的过程中,直接碳排放的占比将逐步降低至 0,因此,本文不考虑商业建筑产生的直接碳排放。间接碳排放主要来源为电力消耗和热力

供应。商业建筑中的照明、空调、电梯、办公设备等都需要消耗大量的电力,其中电力均来源于外部的燃煤、燃气或其他化石燃料发电产生,上述电力消费所产生的碳排放即为间接碳排放。就冷热力供应而言,在冬季供暖或夏季供冷时,商业建筑会依赖外部的冷热力供应系统,这些系统如果使用化石燃料作为热源,同样会产生间接碳排放。

2 商业建筑虚拟电厂碳排放量计算

利用商业建筑虚拟电厂资源建设完成商业建筑参与需求响应及能源调度,协调商业建筑产能、储能及用能行为间的关系,最终实现减碳目标。本文对商业建筑虚拟电厂资源中的光伏发电、储能及用能3种行为建立模型,依托行为模型测算商业建筑的碳排放量,为实现商业建筑虚拟电厂节能降碳奠定基础。

2.1 光伏发电行为模型

面对商业建筑能耗高的特点,安装光伏发电系统可以有效减少碳排放,且商业建筑的屋顶和外立面具备较大空间,便于安装光伏板,无需额外占用土地。商业建筑光伏发电过程主要考虑的指标因素为光电转换效率、系统效率和辐射量。光电转换效率是衡量光伏电池将太阳光转换为电能的能力,是评价光伏技术潜力的核心指标。系统效率为一段时间内光伏电站满发小时数与理论满发小时数的比值,用于衡量光伏电站的发电性能,对商业建筑光伏发电性能评价具有重要意义。辐射量是表征商业建筑所在地的太阳辐射量的指标,其直接影响商业建筑光伏发电量的多少。光伏系统将与商业建筑能源管理系统结合,实现能源的智能监控和优化使用,为虚拟电厂资源实现最佳的能源效率和经济效益提供能源供应保障。本研究针对商业建筑光伏系统建立模型如式(1)所示。

$$P_{PV,t} = \eta S_{PV} \tau_t \quad (1)$$

式中: $P_{PV,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻光伏输出功率; η 为输出效率; S_{PV} 为光照面积; τ_t 为 t 时刻单位面积光照强度。

光照强度如式(2)所示。

$$\tau_t = \begin{cases} \frac{G(\alpha)G(\beta)}{G(\alpha) + G(\beta)} N^{\alpha-1} (1-N)^{\beta-1}, & 0 \leq N \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $G(\cdot)$ 为伽马函数; α, β 为形状系数; N 为实际光照强度与光照最强时的系数比。

2.2 储能行为模型

商业建筑储能行为是指在商业建筑虚拟电厂资源中使用储能系统来优化能源使用、降低能源成本、提高能源效率和可靠性的行为,以保证商业建筑达到节能降碳的目标。商业建筑对储能容量需求较大,其目的是满足高能耗峰值期间的能源需求,并提供备用电源供应。目前商业建筑应用最广泛的储能设备以电化学储能为主,包括锂离子电池、钠硫电池、压缩空气储能等,其充放电效率是影响选择的重要因素之一。储能设备的充放电效率能够有效衡量能量转换情况及能源损失,因此,其成为商业建筑储能效率的重要指标。本文针对商业建筑的电化学储能行为进行模拟,具体模型如式(3)所示。

$$P_{bat,t} = P_{c,t} \eta^c - P_{d,t} / \eta^d \quad (3)$$

式中: $P_{bat,t}$ 为商业建筑 t 时刻净功率; $P_{c,t}$ 为 t 时刻充电功率; $P_{d,t}$ 为 t 时刻放电功率; η^c, η^d 分别为充、放电效率。

同时,储能系统的能量应满足式(4)。

$$E_t = E_{t-1} + P_{bat,t} \Delta t \quad (4)$$

式中: E_t 为储能系统 t 时刻的能量; Δt 为储能系统计算时段的时间步长。

2.3 用能行为模型

商业建筑用能区别于一般建筑,在用能上有明显的时间差异,从而形成明显的用能峰谷效应^[14]。在非工作日(周末或节假日)内,商业建筑用能较非工作日用能通常会有较高能源需求,主要原因在于非工作日建筑内活动与人员较多。同理,傍晚下班后时段也成为商业建筑用能高峰期,主要用于照明、空调、电梯运行等活动过程。相反,夜晚商业建筑关闭或活动减少时,用能行为也会大幅减少,能源需求减少,如表1所示。

由此可见,商业建筑具有较大空间且人流量大的特点,尤其在高峰时段,空调为满足舒适度需求在建筑运行阶段能耗占有较大比例,且可调节潜力大,因此本文将空调负荷作为柔性可调负荷在用能减碳行为中予以调控。照明系统也是商业建筑中的主要能耗来源,由于商业建筑需保证充足的光照和良好的视觉环境,因此,商业建筑中的照明系统需在营业阶段长期开启,且需要照明设备大范围覆

表1 商业建筑不同时段用能行为特征

Tab. 1 Energy consumption behavior characteristics of commercial buildings at different time periods

时间段	用能行为			
	空调用能	照明用能	电梯用能	电动汽车用能
工作日				
10:00—17:30	人员在室率低,设备能耗低,可调控程度高	照明功率密度低,能耗低,不可调控	使用频次低,能耗低	人员使用率低,设备能耗低
17:30—21:00	人员在室率高,设备能耗大,可调控程度低	设备开启时长大,能耗较高,不可调控	使用频次高,能耗较高,不可调控	人员使用率低,设备能耗低
非工作日				
09:00—17:30	人员在室率中等,设备能耗低,可调控程度中等	照明功率密度低,能耗低,不可调控	使用频次高,能耗较高,不可调控	人员使用率高,设备能耗高
17:30—21:00	人员在室率高,设备能耗高,可调控程度低	设备开启时间长,能耗较高,不可调控	使用频次高,能耗较高,不可调控	人员使用率高,设备能耗高

盖,故将其划分为不可调节能耗。电梯作为垂直运输的主要工具,其能耗与使用频率密切相关,使用次数越多,能耗越高。因此,商业建筑中电梯在高峰时段运行频率和速度显著增加,能耗不可调节。电动汽车充放电具备较大可调控能力,其能耗与商业建筑人流量及人员行为习惯有直接联系。综上,商业建筑耗能大,分布式能源系统灵活性调节能力强。

依据上述用能行为特点,为达到商业建筑虚拟电厂改造资源协同调度减碳的目的,本文对商业建筑能源使用行为进行建模,将负荷种类按照负荷特点进行分类,分为不可调控负荷、可调控负荷以及电动汽车负荷。具体公式如式(5)所示。

$$P_{T,t} = P_{B,t} + P_{A,t} + P_{EV,t} \quad (5)$$

式中: $P_{T,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻总负荷功率; $P_{B,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻不可调控负荷功率; $P_{A,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻可调控负荷功率; $P_{EV,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻电动汽车充电或者放电功率。

不可调控负荷 $P_{B,t}$ 为商业建筑虚拟电厂使用中的基础负荷,是各时段中的最小用能量,其表达式如式(6)所示。

$$P_{B,t} = P_t^{\min} \quad (6)$$

式中 $P_t^{\min}$ 为商业建筑虚拟电厂在 t 时刻的最小用能

负荷需求。

可调控负荷 $P_{A,t}$ 为商业建筑虚拟电厂使用中可以调节的负荷,是各时段中能发生调度的灵活性用能量,其表达式如式(7)所示。

$$\sum_{t=1}^T P_{A,t} = P_A^{\text{total}} \quad (7)$$

式中: P_A^{total} 为商业建筑虚拟电厂可被调控的用能总量约束; T 为整个计算周期划分出的总时段数量。

电动汽车由于其充放电功能不同,既包含充电负荷也包含放电负荷,对其模型构建如式(8)所示。

$$P_{EV,t} = \frac{P_t^+}{\mu_1} + \mu_2 P_t^- \quad (8)$$

式中: μ_1 为电动汽车放电效率; μ_2 为电动汽车充电效率; P_t^+ 为 t 时刻电动汽车充电功率变化; P_t^- 为 t 时刻电动汽车放电功率变化。

同时,电动汽车的能量变化应满足式(9)。

$$E_t^1 = E_{t-1}^1 + P_{EV,t} \Delta t \quad (9)$$

式中 E_t^1 为电动汽车 t 时刻的能量。

2.4 商业建筑虚拟电厂碳排放量密度

碳排放强度控制是建筑“双控”的有效控制指标之一,商业建筑虚拟电厂碳排放量密度是指在商业建筑虚拟电厂运行阶段内,建筑物每平方米面积所产生的碳排放总量,该指标用于衡量虚拟电厂内建筑的节碳效率和可持续性,是建筑行业评估和改进建筑性能的重要参数。本文挖掘商业建筑虚拟电厂资源,计算商业建筑虚拟电厂碳排放量密度。

根据商业建筑本身功率平衡的特点,建立等式关系如式(10)所示。

$$P_{B,t} + P_{EV,t} = P_{PV,t} - P_{c,t} \eta^c + P_{d,t} / \eta^d + P_G^+ - P_G^- + P_{i,t}^E \quad (10)$$

式中: $P_{PV,t}$ 为商业建筑虚拟电厂 t 时刻光伏输出功率; P_G^+ 为商业建筑虚拟电厂在 t 时刻外购电功率; P_G^- 为商业建筑虚拟电厂在 t 时刻放电功率; $P_{i,t}^E$ 为商业建筑虚拟电厂参与共享的功率。

由于商业建筑的主要碳排放均来自间接碳排放,因此,根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366—2019)^[37],商业建筑虚拟电厂碳排放量密度计算公式如式(11)所示。

$$C^S = \frac{\sigma \sum_{t \in T} P_G^+}{A} \quad (11)$$

式中: C^S 为商业建筑单位建筑面积的碳排放量; σ 为区域电网碳排放因子; A 为建筑面积。

3 商业建筑虚拟电厂资源全生命周期经济评价

对商业建筑虚拟电厂资源的经济性分析可以综合反映商业建筑虚拟电厂资源利用情况以及商业建筑在低碳转型中的作用和潜力,为投资决策、政策制定和市场发展提供科学依据。考虑我国建筑碳排放“双控”政策及碳交易市场的逐步启动,本文分别依据全生命周期中虚拟电厂建设、运营以及拆除3个阶段,选取虚拟电厂建设初始投资成本、基于碳交易及电力交易的商业建筑运营成本以及设备达到使用寿命后剩余残值作为商业建筑虚拟电厂资源经济性评价指标。具体计算公式如式(12)–(18)所示。

$$F = F_0 + F_u - F_r \quad (12)$$

式中: F 为全生命周期商业建筑虚拟电厂建设总成本; F_0 为商业建筑虚拟电厂建设初始投资成本; F_u 为商业建筑虚拟电厂运营成本; F_r 为商业建筑虚拟电厂设备达到使用寿命后的剩余残值。

$$F_0 = F_{PV} \times S_{PV} + F_{bat} \times W_{bat} + F_{EV} \times W_{EV} \quad (13)$$

式中: F_0 为商业建筑虚拟电厂建设初始投资成本; F_{PV} 为商业建筑虚拟电厂光伏设备单位面积的初始投资额; S_{PV} 为光伏板覆盖面积; F_{bat} 为商业建筑虚拟电厂储能设备单位容量的初始投资额; W_{bat} 为储能设备容量; F_{EV} 为商业建筑虚拟电厂电动汽车充电桩单位个数的初始投资额; W_{EV} 为充电桩数量。

$$F_u = \sum_{t \in T} (\lambda_t^b P_G^{t+}) + \sum_{t \in T} (\lambda_t^{PV} P_{PV,t}) + K (P_{c,t} + P_{d,t}) + \sum_{t \in T} (\lambda_t^{EV} P_{EV,t}) - \sum_{t \in T} \lambda_t^c C_t^{total} - \sum_{t \in T} (\lambda_t^s P_G^{t-}) \quad (14)$$

式中: F_u 为商业建筑虚拟电厂运营成本; λ_t^s 为商业建筑虚拟电厂售电单价; λ_t^b 为商业建筑虚拟电厂外购电单价; λ_t^{PV} 为商业建筑虚拟电厂光伏运行成本单价; K 为储能系统充放电成本系数; λ_t^{EV} 为电动汽车充放电使用成本; λ_t^c 为 t 时刻商业建筑虚拟电厂参与碳交易单价; C_t^{total} 为 t 时刻商业建筑虚拟电厂碳排放密度。

$$F_r = \varepsilon_{PV} \times F_{PV} \times S_{PV} + \varepsilon_{bat} \times F_{bat} \times W_{bat} + \varepsilon_{EV} \times F_{EV} \times W_{EV} \quad (15)$$

式中: F_r 为商业建筑虚拟电厂设备达到使用寿命后剩余残值; ε_{PV} 为商业建筑虚拟电厂光伏设备残值率; ε_{bat} 为商业建筑虚拟电厂储能设备残值率; ε_{EV}

为商业建筑虚拟电厂电动汽车充电桩残值率。

设备残值率的计算如下。

$$\varepsilon_{PV} = (F_{PV} - F_{PV} \times \phi_{PV} \times N_{PV}) \div F_{PV} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{bat} = (F_{bat} - F_{bat} \times \phi_{bat} \times N_{bat}) \div F_{bat} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{EV} = (F_{EV} - F_{EV} \times \phi_{EV} \times N_{EV}) \div F_{EV} \quad (18)$$

式中: ϕ_{PV} 为商业建筑虚拟电厂光伏设备每年的折现率; N_{PV} 为商业建筑虚拟电厂光伏设备使用年限; ϕ_{bat} 为商业建筑虚拟电厂储能设备每年的折现率; N_{bat} 为商业建筑虚拟电厂储能设备使用年限; ϕ_{EV} 为商业建筑虚拟电厂电动汽车充电桩每年的折现率; N_{EV} 为商业建筑虚拟电厂电动汽车充电桩使用年限。

4 基于碳价格的商业建筑虚拟电厂降碳潜力评估

针对商业建筑能耗高、碳排放量大的问题,本文利用商业建筑虚拟电厂资源对商业建筑能源进行精细化调节,将碳交易机制引入商业建筑运营成本中,在考虑虚拟电厂资源全生命周期经济性最优的同时保证商业建筑碳排放量最少,从而挖掘商业建筑降碳潜力,最终实现商业建筑低碳及低改造全生命周期成本。

商业建筑虚拟电厂全生命周期收益与成本的有效管理能保证商业建筑在参与虚拟电厂能源管理过程中的优势地位,也是保持商业建筑在碳-电力市场竞争力的关键。本文以商业建筑虚拟电厂从建设、运营到拆除的全生命周期成本最低为目标函数,如式(19)所示。

$$\min F = F_0 + F_u - F_r \quad (19)$$

虚拟电厂的管理和调度能源将影响商业建筑碳排放情况,以商业建筑虚拟电厂碳排放密度为评价指标建立商业建筑碳排放密度最少为目标函数,如式(20)所示。

$$\min C^{total} = \sigma \sum_{t \in T} P_G^{t+} \quad (20)$$

式中 C^{total} 为商业建筑虚拟电厂碳排放密度。

同时,建立约束条件,商业建筑虚拟电厂电动汽车系统中荷电状态如式(21)所示。

$$r^{\min} \leq E_i^1 / E_{cap}^1 \leq r^{\max} \quad (21)$$

式中: E_{cap}^1 为商业建筑电动汽车充(放)电系统额定容量; $r^{\min}$ 为商业建筑电动汽车充(放)电系统最小电荷状态; $r^{\max}$ 为商业建筑电动汽车充(放)电系统最大电荷状态。

商业建筑虚拟电厂使用中可调节的功率约束如式(22)所示。

$$P_t^{\min} \leq P_{A,t} \leq P_t^{\max} \quad (22)$$

式中: $P_{A,t}$ 为商业建筑虚拟电厂的充放电功率; $P_t^{\max}$ 、 $P_t^{\min}$ 分别为商业建筑虚拟电厂的充放电功率上、下限。

商业建筑虚拟电厂储能系统中充放电功率约束如式(23)所示。

$$P_E^{\min} \leq P_{EV,t} \leq P_E^{\max} \quad (23)$$

式中: $P_{EV,t}$ 为商业建筑储能系统充放电功率; $P_E^{\max}$ 、 $P_E^{\min}$ 分别为商业建筑储能系统最大、最小充放电功率。

最后,本文在考虑虚拟电厂建设经济性及能源精细化管理的基础上对商业建筑降碳潜力进行评估,具体计算如式(24)所示。

$$\Delta C = C_0 - C^{\text{total}} \quad (24)$$

式中: ΔC 为商业建筑建设虚拟电厂前后碳排放密度减少量; C_0 为商业建筑未使用虚拟电厂资源条件下的碳排放密度。

5 算例分析

为验证上述模型,本文将对商业建筑虚拟电厂进行分析,该商业建筑建筑面积 50 000 m²,其中建筑可削减负荷响应量不超过总负荷的 10%,商业建筑包含电动汽车 30 辆^[15-18]。碳排放因子为 0.45^[19],电网电价参考文献[20-22],碳价格参考最新碳市场交易价格^[23],单位光伏设备投资成本为 3 402 元/kW,单位储能设备投资成本为 1 631 元/kW^[24-26],考虑光伏及储能设备使用寿命为 25 a^[27],按照直线法计提折旧,依据文献[28]本研究假设光伏、储能及充电桩设备残值率为 5%,其中商业建筑虚拟电厂资源相关参数^[22]如表 2 所示。

本商业建筑外立面安装光伏设备,负荷分布及分布式能源出力情况如图 2 所示^[29]。

表 2 商业建筑虚拟电厂资源相关参数

Tab. 2 Key parameters of commercial buildings as VPP

参数	数值	参数	数值
储能成本系数	0.026	光伏成本系数	0.045
储能最大充电功率/kW	300	EV 最大荷电状态	10
储能最大放电功率/kW	300	EV 最小荷电状态	10
储能充放电效率	0.95	EV 充放电效率	0.9
虚拟电厂最大放电功率/kW	300	虚拟电厂最小放功率/kW	0

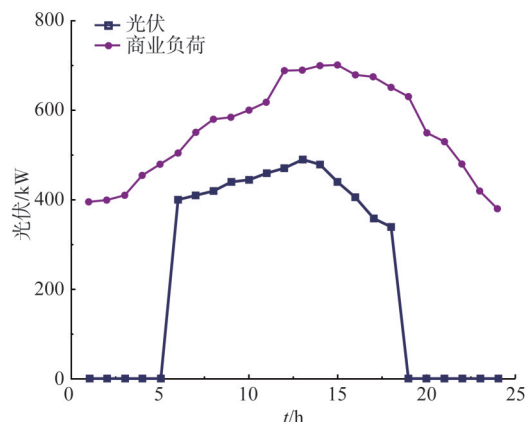


图 2 商业建筑负荷及光伏产能出力图

Fig. 2 Load profile of a commercial building and corresponding photovoltaic generation output

5.1 商业建筑虚拟电厂全生命周期经济性评价结果

利用 MOPSO 算法迭代 200 代产生 100 个 Pareto 最优解,得到商业建筑虚拟电厂碳排放量与商业建筑虚拟电厂建设总成本的最优前沿如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着商业建筑虚拟电厂建设总成本的增加商业建筑的碳排放量也在相对降低,虚拟电厂资源的利用成本与商业建筑碳排放量之间关系是相互矛盾的,需要平衡两者关系,最终实现虚拟电厂成本与商业建筑降碳之间的双赢。

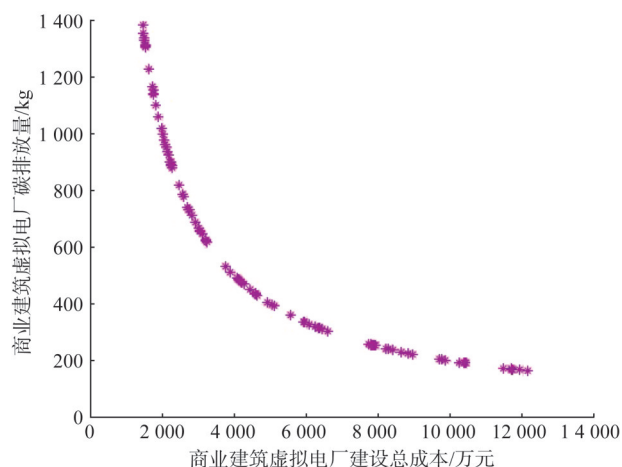


图 3 虚拟电厂建设总成本与商业建筑碳排放关系

Fig. 3 Correlation between total VPP construction cost and carbon emissions in commercial buildings

在本算例中,商业建筑改造后虚拟电厂在运行过程中将对建筑本身光伏-储能-用能以及电网之间的关系进行调度,进而达到节能降碳的目的。考虑商业建筑虚拟电厂碳排放最少且经济性最佳为目标

的情况,基于碳市场交易收益,商业建筑虚拟电厂建设前后的运营成本对比如图4所示,虽然初始投资费用较高,但商业建筑虚拟电厂运营成本明显低于原商业建筑运营成本,且利用虚拟电厂资源商业建筑日平均节省运营费用12 642.69元。由图4可知,由于阶梯电价影响,商业建筑运营成本在各时段差异较大,高峰集中在尖峰电价时段,而虚拟电厂资源可帮助商业建筑完成产能-储能-用能的灵活管理,显著降低商业建筑运营成本且可以在碳-电交易市场中获得收益。

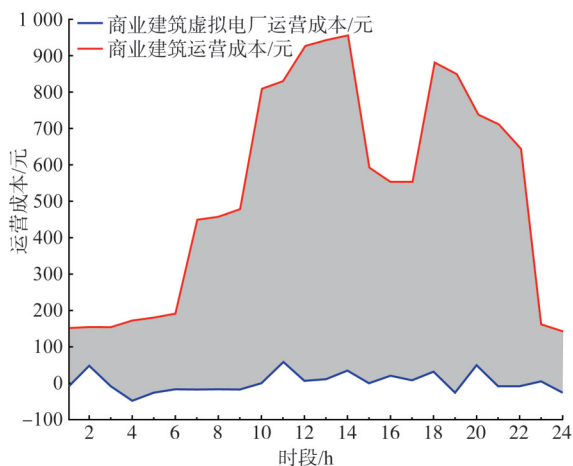


图4 商业建筑虚拟电厂应用前后运营成本对比图

Fig. 4 Comparison of operating costs of commercial buildings before and after VPP implementation

按照商业建筑虚拟电厂改造总投资为14 117 786.63元、每年降低商业建筑运营成本4 614 580.73元计算,商业建筑虚拟电厂静态投资回收期为4 a,即商业建筑虚拟电厂资源可在4 a内收回投资,因此,建立商业建筑虚拟电厂经济性较好。

5.2 商业建筑虚拟电厂降碳潜力评估结果

考虑以商业建筑虚拟电厂资源利用总成本最低且节碳性能最佳为目标对虚拟电厂调度进行仿真模拟,迭代次数为200次时得到图5所示的碳排放折线图,其中虚拟电厂资源可帮助商业建筑显著降碳,在建筑参与中国核证自愿减排量市场(CCER市场)场景下,当商业建筑虚拟电厂售碳给CCER市场时,可帮助其他建筑或企业减碳,因此本算例中商业建筑虚拟电厂碳排放量在某时刻会出现负值。由图5可知,虚拟电厂资源的利用将明显减少商业建筑碳排放量。因此,基于碳交易市场,商业

建筑虚拟电厂降碳潜力巨大。

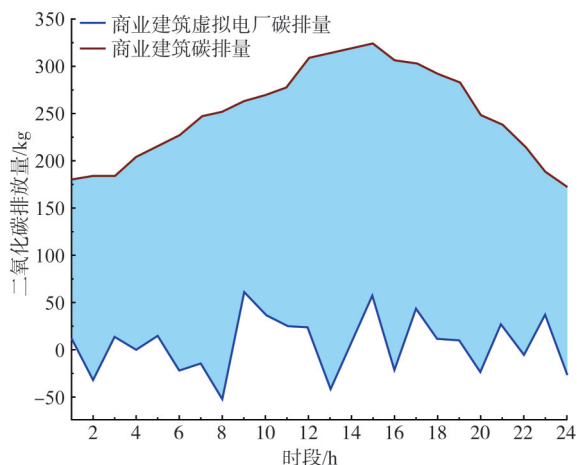


图5 商业建筑虚拟电厂降碳潜力

Fig. 5 Carbon mitigation potential of VPP deployment in commercial buildings

6 结论

在我国商业建筑高能耗高碳排且未找到有效解决路径的背景下,本文总结了商业建筑碳排放行为特点,建立了商业建筑虚拟电厂碳排放计量模型,利用虚拟电厂资源对商业建筑进行能源与碳排放管理,结合虚拟电厂经济性分析,在建筑参与碳交易的场景下,评估出商业建筑虚拟电厂降碳潜力。主要结论如下。

1)商业建筑虚拟电厂改造在经济性方面具备可行性。根据本文经济性分析结果,商业建筑借助虚拟电厂实现能源调度与碳资产管理,进而参与电力-碳市场交易,最终降低建筑运营成本,实现既有商业建筑虚拟电厂改造全生命周期成本可控,为探索碳资产服务咨询、能源合同管理等创新性商业模式奠定经济基础。

2)商业建筑虚拟电厂改造后具备显著降碳潜力。在经济可行的基础上,利用本文所提出的评估方法计量商业建筑虚拟电厂改造前后碳排放量,发现商业建筑通过参与虚拟电厂从而灵活调整能源使用模式,降碳效果明显,为商业建筑虚拟电厂资源降碳模式提供了参考。

因此,商业建筑虚拟电厂改造具备全生命周期技术经济可行性,性价比较高。通过光伏发电技术、储能技术、用能技术,虚拟电厂改造能够实现既有商业建筑运营阶段的高效节能降碳,显著降低

运营成本。同时,在电碳耦合市场下,多样化的收入模式和政策支持为商业建筑虚拟电厂改造的可持续发展提供了坚实保障。

针对既有商业建筑开展虚拟电厂改造,本研究同时给出如下建议。首先,设立专项补贴或低息贷款等金融融资方式,支持前期能效评估与可行性研究,其次,完善时段电价和需求响应激励机制,让灵活用能真正产生收益,然后将商业建筑虚拟电厂改造后的节碳量纳入碳交易市场,允许企业通过出售碳配额获取额外收益,最后,推广公共-私营合作模式,整合多方资金与技术力量,实现项目规模化。未来随着技术的不断进步和市场需求的增加,商业建筑虚拟电厂改造将在能源转型中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院. 2023 中国建筑能耗与碳排放研究报告[J]. 建筑, 2024(2): 46-59.
- [2] 中国建筑节能协会,重庆大学. 2023 年中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告[R]. 北京: 建筑杂志社. 2023.
- [3] 王昕,黄晨,刘有虎,等. 上海某商业建筑温室气体排放变化特征研究[J]. 建筑学报, 2011(S2): 49-52.
WANG Xin, HUANG Chen, LIU Youhu, et al. Study on the variation characteristics of greenhouse gas emissions in a commercial building in Shanghai[J]. Architectural Journal, 2011(S2): 49-52.
- [4] 陈家骏. 公共建筑领域虚拟电厂发展前景研究[J]. 绿色建筑, 2023, 15(5): 51-54, 63.
CHEN Jiajun. Study on the development prospects of virtual power plants in the public building sector[J]. Journal of Green Building, 2023, 15(5): 51-54, 63.
- [5] ABB 集团. 能源管理系统在商业建筑领域的应用设计方案[C]//2017 中国苏州智能建筑电气论坛, 2017 年 5 月 1 日, 苏州, 中国, ABB 集团, 2017: 18-20.
- [6] 温舒晴,张伟荣,杨志伟,等. 基于实测能耗数据的商业建筑碳排放量预测[J]. 建设科技, 2021(23): 37-43.
WEN Shuqing, ZHANG Weirong, YANG Zhiwei, et al. Carbon emission prediction of commercial buildings based on measured energy consumption data[J]. Construction Science and Technology, 2021(23): 37-43.
- [7] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific issues and research framework of virtual power plants with scalable flexible resources in new type power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [8] 李东东,王啸林,沈运帷,等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 210-217, 251.
LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant considering multiple uncertainties and including demand response and electricity-carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 210-217, 251.
- [9] LI Q, ZHOU Y, WEI F, et al. Multi-time scale scheduling for virtual power plants: Integrating the flexibility of power generation and multi-user loads while considering the capacity degradation of energy storage systems[J]. Applied Energy, 2024(362): 122980.1-122980.12.
- [10] 沈思辰,韩海腾,周亦洲,等. 基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用 P2P 交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 147-157.
SHEN Sichen, HAN Haiteng, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 147-157.
- [11] 陈登勇,刘方,刘帅. 基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2042-2054.
CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimal scheduling of virtual power plant with P2G-CCS coupling and hydrogen-blending in gas based on ladder-type carbon trading[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2042-2054.
- [12] 周任军,孙洪,唐夏菲,等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.
ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch of wind-power and carbon-capture virtual power plant under dual-carbon-quantity constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.
- [13] 李旭东,艾欣,胡俊杰,等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Research on Three-stage joint peak-regulation strategy of nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [14] 陈启鑫,吕睿可,郭鸿业,等. 面向需求响应的电力用户行为建模: 研究现状与应用[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 23-37.
CHEN Qixin, LÜ Ruike, GUO Hongye, et al. Modeling of power-users' behavior for demand response: research status and applications[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 23-37.
- [15] 陈丽丹,聂涌泉,钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. Charging load forecasting model of electric vehicle based on travel Chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [16] 别佩,林少华,王宁,等. 基于电力潮流追踪与绿色电力交易的企业用电侧碳排放因子核算[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 34-43.
BIE Pei, LIN Shaohua, WANG Ning, et al. Accounting of carbon emission factors on enterprise's power-consumption side based on power flow tracing and green power trading[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 34-43.
- [17] 谢典,高亚静,芦新波,等. 基于随机生产模拟的电力行业碳

- 减排分析模型[J]. 南方电网技术, 2015, 19(8): 83–93.
- XIE Dian, GAO Yajing, LU Xinbo, et al. Analysis model of carbon emission reduction in power industry based on stochastic production simulation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 19(8): 83–93.
- [18] 杨芑, 杨晓辉, 杨莉, 等. 基于碳市场与绿证分配制度的源荷低碳经济调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 87–95.
- YANG Peng, YANG Xiaohui, YANG Li, et al. Low-carbon economic dispatch of source-load based on carbon market and green certificate allocation system [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 87–95.
- [19] 生态环境部, 国家统计局, 关于发布2022年电力二氧化碳排放因子的公告[R]. 北京: 生态环境部、国家统计局, 2024.
- [20] 余苏敏, 杜洋, 史一炜, 等. 考虑V2B智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 95–101.
- YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 95–101.
- [21] 王婧. 分布式光伏储能系统经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [22] 于浩. 商业楼宇集群虚拟电厂调度策略研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2023.
- [23] 广州碳排放权交易中心. 广州碳排放权交易中心官网[EB/OL]. 2024. <https://www.cnemission.com/>.
- [24] 梁安琪, 蒋一博, 丁屹峰, 等. 园区电热协同低品位热源利用的供能规划策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 167–178.
- LIANG Anqi, JIANG Yibo, DING Yifeng, et al. Energy-supply planning strategy for utilization of low-grade heat sources in park with electric-thermal synergy [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 167–178.
- [25] 周春雷, 陈士翀, 张羽舒, 等. 基于“电-碳”关系的公共建筑运行阶段碳排放测算方法[J]. 建筑科学, 2024, 40(10): 134–142.
- ZHOU Chunlei, CHEN Shichong, ZHANG Yushu, et al. Carbon emission calculation method for public buildings in operation stage based on “electricity-carbon” relationship [J]. Building Science, 2024, 40(10): 134–142.
- [26] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 建筑结构隐含碳排放限值预设方法研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 187–197.
- XIAO Jianzhuang, XIA Bing, XIAO Xunwen, et al. Presetting method for embodied carbon emission limit of building structures [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 187–197.
- [27] 程丽娟. 锂离子电池低温性能改善及在光伏储能系统中应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [28] HAMMAD M, EBAID M S Y. Comparative economic viability and environmental impact of PV, diesel and grid systems for large underground water pumping application (55 wells) in Jordan [J]. Renewables: Wind, Water, and Solar, 2015(2): 1–22.
- [29] 杜怡萱, 吴蓓伦. 结构平面配置变化对建筑结构体建材用量及碳排放量之影响[J]. 建筑学报, 2019(110): 49–66.
- DU Yixuan, WU Peilun. Influence of structural plan configuration changes on building structure material consumption and carbon emissions [J]. Journal of Architecture, 2019(110): 49–66.
- [30] OLIVEIRA C C, VAZ I C M, GHISI E. Retrofit strategies to improve energy efficiency in buildings: an integrative review [J]. Energy and Buildings, 2024(321): 114624.1–114624.9.
- [31] IMANI E, DAWOOD H, DAWOOD N, et al. Enhancing building sustainability: a comprehensive review and methodological roadmap for retrofit strategies [J]. Information Technology in Construction (ITcon), 2024(29): 1275–1292.
- [32] 苟凯杰, 吕鸣阳, 高悦, 等. 风-光-储和需求响应协同的虚拟电厂日前经济调度优化[J]. 广东电力, 2024, 37(2): 18–24.
- GOU Kaijie, LÜ Mingyang, GAO Yue, et al. Day-ahead economic dispatch optimization of virtual power plant based on wind-photovoltaic-energy storage and demand response synergy [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2): 18–24.
- [33] ALABID J, BENNADJI A, SEDDIKI M. A review on the energy retrofit policies and improvements of the UK existing buildings, challenges and benefits [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022(159): 112161.1–112161.11.
- [34] 刘亚鑫, 蔺红, 马越, 等. 考虑分时碳价的虚拟电厂分布鲁棒竞标方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 12–19.
- LIU Yaxin, LIN Hong, MA Yue, et al. Distributionally robust bidding method for virtual power plant considering time-of-use carbon price [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 12–19.
- [35] PANAKADUWA C, COATES P, MUNIR M. Identifying sustainable retrofit challenges of historical buildings: a systematic review [J]. Energy and Buildings, 2024(313): 114226.1–114226.8.
- [36] ZHOU H, TIAN X, ZHAO Y, et al. Investigation of policy tools for energy efficiency improvement in public buildings in China—current situation, obstacles, and solutions [J]. City and Built Environment, 2024, 2(1): 2–10.
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

收稿日期: 2025-04-16; 网络首发日期: 2025-08-30

作者简介:

尚楠(1993), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为能源电力改革、电碳耦合, shangnan@csg.cn;

刘玺(1995), 男, 工程师, 博士, 研究方向为电碳耦合、能源规划, liuxi@csg.cn;

潘珍(1983), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电网规划研究工作, pan_z@gx.csg.cn。