

考虑碳交易及需求响应的虚拟电厂运行优化策略

李文琦¹, 孙伟卿^{1,2}, 杨文威³

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 智慧应急管理学院, 上海 200093;

3. 上海嘉柒智能科技有限公司, 上海 200442)

摘要: 为有效提升虚拟电厂的碳减排能力和经济效益水平, 提出一种考虑多种柔性电负荷参与需求响应的虚拟电厂运行优化方法。首先, 综合考虑柔性电负荷特性并进行分类, 建立虚拟电厂的柔性电负荷多元化模型; 其次, 对传统阶梯式碳交易价格模式进行优化, 建立改进阶梯式碳交易机制模型, 推动系统碳减排; 然后, 综合考虑系统运行成本和碳交易成本, 以总运行成本最小为目标, 建立虚拟电厂运行优化模型, 并利用 Cplex 求解器对模型进行求解; 最后, 设置 3 种场景进行对比分析以验证模型的有效性。结果表明, 制定合理的碳交易基价和碳交易区间长度能够协同低碳性和经济性, 改进阶梯式碳交易机制和需求响应均可降低虚拟电厂的运行成本, 减少碳排放量, 能够带来巨大的经济效益和环境效益。

关键词: 虚拟电厂; 改进阶梯式碳交易; 需求响应; 低碳经济运行

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A

Virtual power plant operation optimization strategy considering carbon trading and demand response

LI Wenqi¹, SUN Weiqing^{1,2}, YANG Wenwei³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Shanghai Jiaqi Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 200442, China)

Abstract: In order to effectively improve the carbon emission reduction ability and economic benefit level of virtual power plant, a virtual power plant operation optimization method considering various flexible electric loads participating in demand response was proposed. Firstly, considering the characteristics of flexible electric load and classifying it, a diversified model of flexible electric load of

收稿日期: 2024-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777126)

第一作者: 李文琦(1999-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 电力供需预警、低碳电力. E-mail: wenqi0112@163.com

通信作者: 孙伟卿(1985-), 男, 教授. 研究方向: 电力系统规划与优化、虚拟电厂. E-mail: sidsqw@163.com

引文格式: 李文琦, 孙伟卿, 杨文威. 考虑碳交易及需求响应的虚拟电厂运行优化策略[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 484-493.

Citation: LI Wenqi, SUN Weiqing, YANG Wenwei. Virtual power plant operation optimization strategy considering carbon trading and demand response[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(5): 484-493.

virtual power plant was established. Secondly, the traditional stepped carbon trading price model was optimized, and the improved stepped carbon trading mechanism model was established to promote the system carbon emission reduction. Then, considering the system operation cost and carbon trading cost comprehensively, the virtual power plant operation optimization model was established to minimize the total operation cost, and the model was solved by Cplex solver. Finally, three scenarios were set for comparative analysis to verify the effectiveness of the model. The results show that reasonable carbon trading base price and carbon trading interval length can cooperate with low carbon and economy, and the improvement of the cascade carbon trading mechanism and demand response can reduce the operating costs of virtual power plants, reduce carbon emissions, and bring huge economic and environmental benefits.

Keywords: *virtual power plant; improved stepped carbon trading; demand response; low-carbon and economic operation*

随着全球气候变化和环境保护意识的不断提高, 低碳经济和可持续发展成为了全球发展的大趋势^[1]。面对传统电力生产带来的环境问题, 太阳能、风能等分布式新能源发电方式将满足对清洁、可靠能源的需求。但是分布式发电具有容量小、数量多和地域分散等特点, 在接入电网时波动较大、成本较高, 严重影响电网的稳定运行。为解决该问题, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的概念被提出, 其能够整合电源侧各类分散的可再生能源和负荷侧各类可调负荷, 利用先进的通信技术采集、组织、分类和处理大量信息并提供智能控制策略, 降低分布式新能源发电接入电网的成本, 提高电网稳定性。然而, 大规模分布式新能源发电的随机性和负荷需求的不确定性给 VPP 的可靠、经济运行带来了巨大挑战^[2]。因此, 高效管理和利用 VPP 的能源资源, 增强系统的调节灵活性, 提高电力的可靠供应^[3], 具有重要的研究意义。

目前, 许多文献对 VPP 的优化调度和智能控制展开了一系列研究。李嘉森等^[4]采用随机优化处理 VPP 中的风光出力不确定性问题, 结合光热电站构建了含光热 VPP 热电联合优化调度模型, 智能优化调度 VPP 内部机组出力, 在满足系统运行经济性的同时实现了风电的最大消纳。Yi 等^[5]提出了一种基于双层规划的 VPP-主动配电网优化运行方法, 对可控机组出力、可靠响应负荷、电价等进行优化调度, 提高了系统经济性能。Baringo 等^[6]以 VPP 净利润最大化为目标, 提出了一种面向能源交易和备用市场的 VPP 日前调度模型, 实

现了 VPP 多个发电单元间的高效协同调度。袁桂丽等^[7]考虑了碳捕集技术和需求响应对虚拟电厂进行优化调度, 提出的调度策略可以提高系统的总收益和新能源消纳能力, 同时降低了碳排放量。

在“双碳”背景下, 电力能源行业亟需减少碳排放量, 而碳交易机制是通过市场化手段推动碳排放责任主体响应节能减排政策的有效手段, 分为传统式碳交易机制和阶梯式碳交易机制^[8]。张立辉等^[9]基于碳交易机制进行 VPP 调度分析, 证明碳交易机制可以提高风能消纳量, 从而增加 VPP 碳减排效益; Liu 等^[10]以包含风电、燃气轮机以及电动汽车等的 VPP 为研究对象, 考虑碳交易提出 VPP 联合投标策略模型。上述文献采用的是传统碳交易机制, 碳交易价格单一, 碳减排能力受到一定限制。而彭思佳等^[11]将阶梯型碳交易机制引入到 VPP 优化调度模型中, 对系统碳排放量起到了更好的制约效果。

随着需求侧用电负荷的增长, 需求响应机制可通过调用用户侧的柔性负荷, 有效降低峰谷差, 缓解供需矛盾, 其应用于 VPP 既能提升可再生资源消纳率和系统的低碳性能, 又可以体现 VPP 对柔性负荷的智能控制和灵活管理。师阳等^[12]建立了计及激励型需求响应的热电互联 VPP 优化调度模型, 考虑了柔性负荷的可转移和可削减特性, 平滑了负荷曲线, 提高了 VPP 整体经济效益; 袁桂丽等^[13]引入负荷侧基于分时电价与可中断负荷激励的需求响应, 建立 VPP 源-荷协调多目标优化调度模型, 有效降低了系统运行成本, 提高了可再生能源的消纳水平; Kong 等^[14]利用需求

响应管理实现了 VPP 分布式能源的多目标优化,降低了用户用电成本。上述文献对需求响应的潜力进行了挖掘,大多着眼于改善系统的经济性,缺乏对系统运行低碳性的研究,同时引入的柔性负荷种类不够全面,在多元柔性负荷对 VPP 优化运行影响方面的研究相对较少。

针对上述问题,本文提出一种改进阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的 VPP 优化运行模型,以 VPP 综合日运行成本最小为目标,建立改进阶梯式碳交易成本模型以及包括可平移、可转移、可削减电负荷在内的多元化柔性电负荷需求响应模型,兼顾经济性与低碳性,通过算例分析改进阶梯式碳交易相比传统阶梯式碳交易的优势以及多种类柔性电负荷需求响应对 VPP 减小负荷峰谷差、减排降碳的作用,通过不同场景的对比验证研究的合理性与有效性。

1 虚拟电厂中的柔性负荷模型

在系统调度方面,综合能源系统和虚拟电厂均是对调度方案进行优化管理,综合能源系统是基于多能互补理念,对不同形式能源的生产、传输、转换和利用进行集成,实现能源系统的优化配置;而 VPP 研究的对象主要是电力系统,通过集成分布式能源资源和负荷的灵活性,对电力进行优化调度,实现电力系统的高效运行。本文所考虑的虚拟电厂运行架构在发电侧聚合了风电机组、光伏机组、电网电能和燃气轮机;需求侧聚合了具有一定弹性的包含可平移负荷、可转移负荷以及可削减负荷在内的柔性负荷;此外还考虑了储能装置对 VPP 整体运行的影响。由于本文以 VPP 为研究对象,因此燃气轮机只考虑电能的输出,进行了简化处理,相应运行架构如图 1 所示。

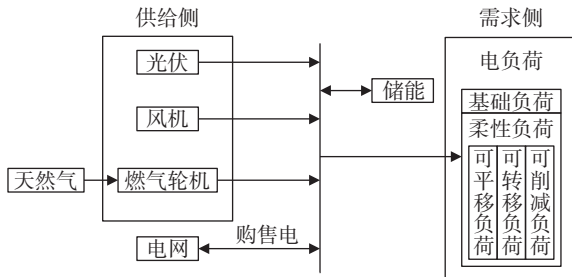


图 1 虚拟电厂运行架构

Fig.1 Architecture of virtual power plant operation

在需求侧合理调度柔性电负荷可减小负荷的峰谷差,平滑电负荷曲线,调用需求侧运行灵活

性,达到降低运行成本和碳排放的目的^[15]。根据参与柔性调节的能力和特性,可将柔性负荷分为 3 类:可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷,相应柔性负荷建模如下^[16]。

1.1 可平移负荷建模

可平移负荷对利用时间连续性要求较高,可根据计划进行供能时间的变更,其调度需占据多个连续的时间段,期间不能中断,且要求负荷整体平移,例如洗衣机、电烤炉等负荷。为了保证负荷平移的合理性,设置调度周期内可平移时段区间为 $[t_{sh-}, t_{sh+}]$,可平移负荷持续时间为 t_D ,则可平移开始时段集合 S_{sh} 为

$$S_{sh} = [t_{sh-}, t_{sh+} - t_D + 1] \quad (1)$$

VPP 需支付的可平移负荷补偿成本 F_{sh} 为

$$F_{sh,t} = F^{sh} \Delta P_t^{sh} \quad (2)$$

式中: F^{sh} 为可平移负荷补偿成本系数; ΔP_t^{sh} 为 t 时段平移的负荷功率。

1.2 可转移负荷建模

可转移负荷是指在调度周期内总耗电量保持不变,但可以在部分时段灵活调节的柔性负荷,比如,分时电价可以引导部分可转移负荷从高电价时段转移到低电价时段。与可平移负荷一样,可转移负荷在调度周期内也存在可转移时段,区间设置为 $[t_{tr-}, t_{tr+}]$ 。为防止负荷转移到多个时段导致设备出现频繁启停的问题,需对可转移负荷的最小连续运行时间进行约束,同时其转移功率也需设置一定的约束条件。

$$\sum_{t=\tau}^{\tau+T_{min}^{tr}-1} z_t^{tr} \geq T_{min}^{tr} \quad (3)$$

$$z_t^{tr} P_{t,min}^{tr} \leq \Delta P_t^{tr} \leq z_t^{tr} P_{t,max}^{tr} \quad (4)$$

式中: T_{min}^{tr} 为可转移负荷的最小连续运行时间; z_t^{tr} 为 t 时段可转移负荷转移状态的 0~1 变量,1 表示发生转移,0 表示不发生转移; ΔP_t^{tr} 表示 t 时段转移的负荷功率; $P_{t,min}^{tr}$, $P_{t,max}^{tr}$ 分别为 t 时段可转移负荷的最小、最大值。

VPP 需支付的可转移负荷补偿成本 F_{tr} 为

$$F_{tr,t} = F^{tr} \Delta P_t^{tr} \quad (5)$$

式中, F^{tr} 为可转移负荷补偿成本系数。

1.3 可削减负荷建模

可削减负荷是指对降低功率、减少时间或中断运行具有一定承受能力的柔性负荷,与可平

移、转移负荷在调度期间不改变用户用电量的情况不同, 可削减负荷依照调度减少了用户的用电量。为引导用户在负荷高峰时段削减部分不必要的负荷, 保证负荷削减的合理进行, 削减时长、削减次数以及削减量有如下约束:

$$T_{\min}^c \leq \sum_{t=\tau}^{\tau+T_c-1} z_t^c \leq T_{\max}^c \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T z_t^c \leq N_{\max} \quad (7)$$

$$z_t^c P_{t,\min}^c \leq \Delta P_t^c \leq z_t^c P_{t,\max}^c \quad (8)$$

式中: T_c 为削减时长; $T_{\min}^c$, $T_{\max}^c$ 分别为负荷连续削减时长的最小、最大值; z_t^c 为表示 t 时段可削减负荷转移状态的 $0 \sim 1$ 变量, 1 表示发生削减, 0 表示不发生削减; $N_{\max}$ 为最大削减次数; ΔP_t^c 表示 t 时段削减的负荷功率; $P_{t,\min}^c$, $P_{t,\max}^c$ 分别为可削减负荷的最小、最大值。

VPP 需支付的可削减负荷补偿成本 F_c 为

$$F_{c,t} = F^c \Delta P_t^c \quad (9)$$

式中, F^c 为可削减负荷补偿成本系数。

2 改进型阶梯式碳交易机制模型

碳交易也叫碳排放权交易, 是将碳排放权在市场中买卖的一种交易机制。为有效限制 VPP 的碳排放量, 本文引入改进阶梯式碳交易机制, 包括碳排放权配额、实际碳排放量与碳交易机制 3 个部分^[17]。

2.1 碳排放权配额建模

对于机组碳排放配额的计算常有历史法和基准线法两种方法。本文采用基准线法计算碳排放

机组的配额, 模型如下:

$$E^* = \sum_{t=1}^T \left(\varepsilon_1 \sum_{i=1}^{N_G} P_{GT,i}^t + \varepsilon_2 P_{b,t} \right) \quad (10)$$

式中: E^* 为运行周期内总的碳排放配额, 即碳排放的目标值; ε_1 为系统燃气轮机的碳排放配额系数; ε_2 为 VPP 购买电力对应的碳排放配额系数; $P_{b,t}$ 为 VPP 在电力市场中购买的电力。

2.2 实际碳排放量建模

假设 VPP 向电力市场购买的电力均为火电机生产, 则 VPP 中碳排放来源主要为燃气轮机和外购电力, 可得 VPP 一个运行周期内的实际碳排放量为

$$E = \sum_{t=1}^T \left(\mu_b P_{b,t} + \sum_{i=1}^{N_G} \mu_i P_{GT,i}^t \right) \quad (11)$$

式中: E 为运行周期内总的实际碳排放量; μ_b 为 VPP 购买电力对应的碳排放系数; μ_i 为第 i 台燃气轮机的碳排放系数。

2.3 改进阶梯式碳交易成本建模

VPP 在碳交易市场中的碳交易额是由 VPP 在运行周期内的实际碳排放量与碳排放权配额的差值决定的, 即

$$E_{CO_2} = E - E^* \quad (12)$$

式中, E_{CO_2} 为碳交易额度。

为控制系统的碳排放量, 传统阶梯式碳交易机制根据碳排放量划分了多个碳交易额度区间, 每个区间内碳交易成本固定。改进阶梯式碳交易机制则在每个碳交易额度区间进行优化, 不固定每个区间内的碳交易基价, 碳交易成本随着碳交易额度的增长呈线性增加趋势^[18], 从而限制碳排放。改进阶梯式碳交易成本模型如式(13)所示。

$$F_C = \begin{cases} \eta E_{CO_2} & 0 < E_{CO_2} \leq d \\ \eta d + (1 + \alpha) \eta (E_{CO_2} - d) & d < E_{CO_2} \leq 2d \\ (2 + \alpha) \eta d + (1 + 2\alpha) \eta (E_{CO_2} - 2d) & 2d < E_{CO_2} \leq 3d \\ (3 + 3\alpha) \eta d + (1 + 3\alpha) \eta (E_{CO_2} - 3d) & 3d < E_{CO_2} \leq 4d \\ (4 + 6\alpha) \eta d + (1 + 4\alpha) \eta (E_{CO_2} - 4d) & 4d < E_{CO_2} \leq 5d \end{cases} \quad (13)$$

式中: F_C 为系统碳交易成本; d 为碳交易额度区间; α 为碳价增长率; η 为碳交易基价。

传统阶梯式碳交易机制和改进阶梯式碳交易机制二者的对比如图 2 所示, 其中 F_1 , F_2 , F_3 分别为每个碳排放区间的碳交易成本, 横坐标为碳

交易额度, 纵坐标为碳交易成本。传统阶梯式碳交易在每个额度区间内碳交易成本固定, 但在上升一个额度区间时, 碳交易成本会发生阶跃式增长, 无法有效调动排放主体的减排积极性; 而改进阶梯式碳交易在每个额度区间内的碳交易成本

呈现连续递增趋势，机制规则设置更加合理，且随着额度的增长，碳交易成本增加的越多，能更好地限制碳排放。

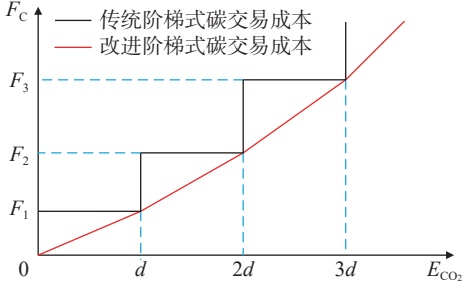


图2 两种阶梯式碳交易机制对比图

Fig.2 Comparison of the two stepped carbon trading mechanism

随着我国碳交易市场的逐步发展，为了应对每日碳交易价格变动，改进阶梯式碳交易机制会使碳交易更加精准、合理，带来更大的经济效益。

3 VPP 低碳经济优化运行模型与求解

3.1 目标函数

以一个运行周期内 VPP 的净运行成本最小为目标，构建了考虑改进阶梯式碳交易及需求响应的 VPP 低碳经济优化运行模型。VPP 净运行成本由综合运行成本减去售电收益得到，综合运行成本包括：向电网购电的成本、燃气轮机运行成本、新能源发电运行成本、电储能系统运行成本、柔性负荷需求响应调度成本以及碳交易成本，售电收益主要为 VPP 向电网售出电力所获得的收益。所建目标函数如下：

$$\min F = \sum_{t=1}^T (F_{b,t} + F_{GT,t} + F_{RE,t} + F_{ES,t} + F_{DR,t} + F_{C,t} - F_{s,t}) \quad (14)$$

式中：\$F\$ 为 VPP 的净运行成本；\$T\$ 为 VPP 的运行周期；\$F_{b,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段的购能成本；\$F_{GT,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段中燃气轮机的运行成本；\$F_{RE,t}\$ 为 VPP 中新能源发电在 \$t\$ 时段的运行成本；\$F_{ES,t}\$ 为 VPP 中电储能系统在 \$t\$ 时段充放电过程中的运行成本；\$F_{DR,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段的激励型需求响应调度成本；\$F_{C,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段的碳交易成本；\$F_{s,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段向电网售出电力的收益。

3.1.1 VPP 购能成本模型

VPP 的购能成本包括向电力市场购电的成本

以及向能源市场购买天然气以供燃气轮机正常运行的购气成本，其模型为

$$F_{b,t} = \pi_{b,t} P_{b,t} + \pi_{f,t} \frac{P_{GT,t}}{H_f} \quad (15)$$

式中：\$\pi_{b,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段向电力市场购电的价格；\$P_{b,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段在电力市场中的购电功率；\$\pi_{f,t}\$ 为 VPP 在 \$t\$ 时段购买天然气的价格；\$P_{GT,t}\$ 为 \$t\$ 时段燃气轮机的运行出力；\$H_f\$ 为天然气热值，取 \$9.88 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3\$。

3.1.2 燃气轮机运行成本模型

燃气轮机运行成本模型为

$$F_{GT,t} = \lambda_{GT} P_{GT,t} \quad (16)$$

式中，\$\lambda_{GT}\$ 为燃气轮机的单位发电成本系数。

3.1.3 新能源运行成本模型

新能源发电运行成本主要包括光伏和风电的运行成本，由于光伏和风电机组的发电不存在燃料成本，无论是光伏电站还是风电场大都属于独立的发电集团所有，则电网与发电集团之间将制定合同协议形成一定的成本价格，模型如下：

$$F_{RE,t} = F_{PV,t} + F_{W,t} \quad (17)$$

$$F_{PV,t} = \lambda_{PV} P_{PV,t} \quad (18)$$

$$F_{W,t} = \lambda_W P_{W,t} \quad (19)$$

式中：\$\lambda_{PV}\$ 和 \$\lambda_W\$ 分别表示光伏和风电机组的单位发电成本系数；\$P_{PV,t}\$ 和 \$P_{W,t}\$ 分别表示光伏和风电机组在 \$t\$ 时段的实际出力。

3.1.4 电储能系统运行成本模型

电储能系统在充放电过程中，储能系统在 \$t+1\$ 时段的荷电状态要与 \$t\$ 时段的荷电状态以及在 \$[t, t+1]\$ 时段内电储能系统的充放电量有关。电储能系统的荷电状态公式为

$$SOC^{t+1} = SOC^t + P_{ES,t+1}^{\text{ch}} \eta_{ES}^{\text{ch}} \Delta t - P_{ES,t+1}^{\text{dis}} \Delta t / \eta_{ES}^{\text{dis}} \quad (20)$$

式中：\$SOC^{t+1}\$ 为第 \$t+1\$ 时刻电储能系统的荷电状态；\$SOC^t\$ 为第 \$t\$ 时刻电储能系统的荷电状态；\$P_{ES,t+1}^{\text{ch}}\$，\$P_{ES,t+1}^{\text{dis}}\$ 分别为第 \$t+1\$ 时刻电储能系统的充电功率和放电功率；\$\eta_{ES}^{\text{ch}}\$，\$\eta_{ES}^{\text{dis}}\$ 分别为电储能系统的充电效率和放电效率。

电储能系统在充放电过程中的运行成本模型如下：

$$F_{ES,t} = \lambda_{ES} (P_{ES,t}^{\text{ch}} + P_{ES,t}^{\text{dis}}) \quad (21)$$

式中，\$\lambda_{ES}\$ 为电储能系统的单位运行成本。

3.1.5 需求响应成本模型

柔性负荷需求响应成本包括: 可平移负荷、可转移负荷以及可削减负荷的运行调度成本, 即

$$F_{DR,t} = F_{sh,t} + F_{tr,t} + F_{c,t} \quad (22)$$

3.1.6 VPP 售电收益模型

VPP 售电收益模型为

$$F_{s,t} = \pi_{s,t} P_{s,t} \quad (23)$$

式中: $\pi_{s,t}$ 为 VPP 在 t 时段向电网售电的价格; $P_{s,t}$ 为 VPP 在 t 时段向电网售电的功率。

3.2 约束条件

为保证 VPP 安全稳定运行, 需满足相关运行约束, 有关约束条件如下:

a. VPP 功率平衡约束

本文不计线路功率损耗, 为了满足 VPP 系统电力供需平衡, 应满足以下条件:

$$P_{GT,t} + P_{b,t} + P_{PV,t} + P_{W,t} + P_{ES,t}^{ch} - P_{ES,t}^{dis} - P_{s,t} = L_t^1 \quad (24)$$

$$L_t^1 = L_t^0 + P_{t,max}^c + \Delta P_t^{sh} + \Delta P_t^{tr} - \Delta P_t^c \quad (25)$$

式中: L_t^1 为需求响应后的需求侧负荷预测值; L_t^0 为除去可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷后的固定基础负荷。

b. 燃气轮机出力约束

$$P_{GT}^{\min} \leq P_{GT,t} \leq P_{GT}^{\max} \quad (26)$$

$$|P_{GT,t} - P_{GT,t-1}| \leq r_g P_{GT}^{\max} \quad (27)$$

式中: $P_{GT}^{\min}$, $P_{GT}^{\max}$ 分别为燃气轮机发电出力的上下限值; r_g 为燃气轮机相邻时段出力爬坡限幅比例。

c. 电力市场购电约束

由于 VPP 向电力市场的购电行为和售电行为存在容量限制, 且不能同时进行, 因此有如下约束:

$$B_{b,t} P_b^{\min} \leq P_{b,t} \leq B_{b,t} P_b^{\max} \quad (28)$$

$$B_{s,t} P_s^{\min} \leq P_{s,t} \leq B_{s,t} P_s^{\max} \quad (29)$$

$$B_{b,t} + B_{s,t} \leq 1 \quad (30)$$

式中: $P_b^{\min}$, $P_b^{\max}$ 分别为 VPP 在市场上购电功率的上下限; $P_s^{\min}$, $P_s^{\max}$ 分别为 VPP 向电网售电功率的上下限; $B_{b,t}$, $B_{s,t}$ 均为 0~1 变量, 分别表示 VPP 向电力市场购、售电状态参数。

d. 新能源出力约束

$$0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{\text{pre}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{W,t} \leq P_{W,t}^{\text{pre}} \quad (32)$$

式中, $P_{PV,t}^{\text{pre}}$ 和 $P_{W,t}^{\text{pre}}$ 分别为光伏出力和风电出力的预测值。

e. 电储能运行约束

电储能系统的荷电状态不是无限制的, 为了储能系统的安全平稳运行, 同时也从经济角度出发, 储能系统内存储的能量需要满足一定的约束条件, 以保证整个系统安全可靠的运行。

$$SOC^{\min} \leq SOC^t \leq SOC^{\max} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{ES,t}^{ch} \leq U_s(t) P_{ES,ch}^{\max} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{ES,t}^{dis} \leq (1 - U_s(t)) P_{ES,dis}^{\max} \quad (35)$$

$$SOC^{t=0} = SOC^{t=T_N} \quad (36)$$

式中: $SOC^{\max}$, $SOC^{\min}$ 分别为电储能系统 SOC 的上、下限; 式(34)和式(35)分别为电储能系统的充、放电功率的约束条件; $P_{ES,ch}^{\max}$, $P_{ES,dis}^{\max}$ 分别为电储能系统充放电功率的上限值; U_s 为 0~1 变量, 表示储能的充放电状态, 取值为 1 时表示充电, 取值为 0 时表示放电; 式(36)为满足电储能下一日运行, 电储能日运行末时段的 SOC 需等于首时段的 SOC 。

3.3 模型求解

本文所求解问题为混合整数线性规划问题, 因此, 基于 Matlab 平台编写模型程序, 采用 Yalmip 工具箱调用 Cplex 求解器求解。

4 算例分析

4.1 基础数据

以一天 24 h 为一个调度周期, 1 h 为单位调度时段。VPP 内部的电负荷与风光出力预测值如图 3 所示, 各设备参数如表 1 所示, 购售电采用分时电价, 如表 2 所示, 天然气价格不受时间变化影响, 取 2.12 元/m³。碳交易部分中, 碳交易基价为 0.25 元/kg, 碳交易区间为 2 000 kg, 碳价增长率为 0.25, 煤电(外购电力)和燃气轮机的碳排放系数分别为 0.98 kg/(kW·h) 和 0.61 kg/(kW·h), 碳配额系数分别为 0.5 kg/(kW·h) 和 0.37 kg/(kW·h)。柔性电负荷部分中, 可平移电负荷 1 和可平移电负荷 2 的持续时间分别为 2 h 和 3 h, 可平移时段区间分别为 5:00—21:00 和 7:00—23:00, 补偿成本系数均为 0.2 元/(kW·h); 可转移电负荷的最小、最大值分别为 0, 173.6 kW, 最小连续运行时间为 2 h, 可转移时段为 4:00—21:00, 补偿成本系数为

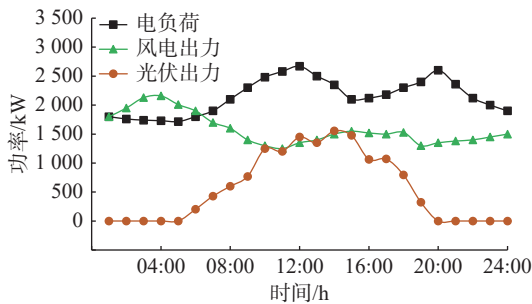


图3 电负荷与风光出力功率预测

Fig.3 Prediction of electric loads and WT,PV output power

0.3 元/(kW·h); 可削减负荷的连续削减时长最小、最大值分别为 2 h 和 5 h, 最大削减次数为 10 次, 补偿成本系数为 0.4。

表 1 虚拟电厂各设备参数

Tab.1 Equipment parameters of virtual power plant

设备类型	设备参数	数值
燃气轮机	额定功率/kW	4 000
	发电功率上限 P_{GT}^{max} /kW	4 000
	发电功率下限 P_{GT}^{min} /kW	0
	相邻时段出力爬坡限幅比例 r_g	0.25
	单位运行成本 $\lambda_{GT}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.50
光伏机组	额定功率/kW	2000
	单位运行成本 $\lambda_{PV}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.62
风电机组	额定功率/kW	2 500
	单位运行成本 $\lambda_W/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.52
储能电池	最大电量/(kW·h)	400
	初始电量/(kW·h)	80
	充放电效率 $\eta_{ES}^{ch}, \eta_{ES}^{dis}$	0.9
	最大充放电功率 $P_{ES, ch}^{max}, P_{ES, dis}^{max}$ /kW	250
电网购售电	单位运行成本 $\lambda_{ES}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.1
	最大购售电功率 P_b^{max}, P_s^{max} /kW	2 000

表 2 购售电分时电价

Tab.2 Time-of-use price of electricity

时段名称	购电价格/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	售电价格/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	时段/h
峰	0.92	0.46	8:00—12:00
			17:00—21:00
平	0.62	0.31	12:00—17:00
			21:00—24:00
谷	0.33	0.16	0:00—8:00

为了对比验证本文所提的考虑改进阶梯式碳交易及需求响应的 VPP 低碳经济运行模型的有效

性, 设置以下 3 种场景进行对比分析。

场景 1: 基于传统阶梯式碳交易机制, 不考虑需求响应;

场景 2: 基于改进阶梯式碳交易机制, 不考虑需求响应;

场景 3: 基于改进阶梯式碳交易机制并考虑需求响应。

上述场景的经济运行结果如表 3 所示。

表 3 3 种场景运行结果

Tab.3 Running results under three scenarios

项目	场景1	场景2	场景3
购能成本/元	3 761.26	3 726.55	3 031.64
各设备运行成本/元	31 426.72	31 478.14	30 384.70
需求响应成本/元	0.00	0.00	1 157.59
碳交易成本/元	1 125.00	1 010.01	832.21
碳排放量/kg	8 269.14	8 157.60	5 828.63
售电收入/元	104.67	104.67	44.65
总运行成本/元	36 208.31	36 110.03	35 361.50

4.2 改进阶梯式碳交易对 VPP 运行影响分析

通过比较场景 1 和 2 分析不同阶梯式碳交易机制下 VPP 运行成本与碳排放量的区别, 在运行成本方面, 考虑改进阶梯式碳交易的场景 2 总运行成本相对较低, 比传统阶梯式碳交易的场景 1 少 98.28 元; 碳排放方面, 场景 2 的碳交易成本相对场景 1 减少了 114.99 元, 碳排放量则减少了 111.54 kg, 可见改进阶梯式碳交易在降低 VPP 运行成本以及减少碳排放方面取得了良好的效果, 能在一定程度上提高系统的经济性和低碳性。

由于改进阶梯式碳交易机制优化了碳交易成本的计算方式, 在同一碳排放水平下, 碳排放成本降低, 但对于碳排放量的变化更加敏感, 碳排放量增加得越多, 碳交易成本上升得越快, 因此, 系统在运行过程中会更加注重高碳排放机组的出力情况, 最大程度上限制其运行出力, 以保证系统整体的经济性。VPP 由于减少了来自电网的高碳排购电量, 增加了系统内部燃气轮机的出力, 导致购能成本大大降低, 既减少了系统的运行成本, 又降低了系统整体的碳排放量。同时, 在新能源出力较大时, 会将富余的电力出售给外部电网以获取部分收益。综上所述, 改进阶梯式碳交易机制比传统阶梯式碳交易机制具有更好的经济性和低碳性, 能够给 VPP 运行带来更大的效

益，更加适应目前的碳交易市场。

为进一步探究改进阶梯式碳交易机制参数对 VPP 系统运行情况的影响，重点讨论并分析碳交易基价和碳交易区间这 2 个参数对系统碳排放量以及总运行成本的影响关系，如图 4 所示。

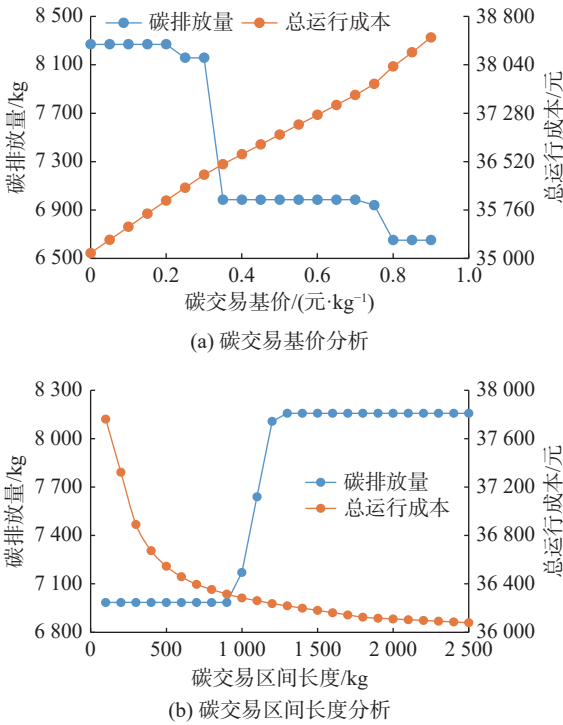


图 4 碳交易机制参数对 VPP 运行影响

Fig.4 Effect of carbon trading mechanism parameters on virtual power plant operation

由图 4(a)可知，随着改进阶梯式碳交易机制中碳交易基价的提高，碳排放量也呈现出阶梯式变化趋势。碳交易基价小于 0.80 元/kg 时，随着碳交易基价的增加，碳交易成本的比重增大，VPP 将通过减少碳排放量以减小碳交易成本，因此碳排放量显著减少且减少幅度较大；当碳交易基价大于 0.80 元/kg 时，随着碳交易基价的增大，系统碳排放量基本保持不变，这是由于系统内部各机组出力分布趋于稳定，碳排放水平也趋于稳定，因此，碳排放量将不随碳交易基价的改变而发生改变，碳交易成本则随着碳交易基价的增加而不断增大。而碳交易成本随着碳交易基价的增加而增大，VPP 系统的运行成本也随之提高。

由图 4(b)图可知，当碳交易区间长度小于 900 kg 时，由于区间较小，进行碳交易时的碳交易价格会相对较大，导致碳交易成本较高，因此可以有效限制碳排放，使得碳排放量较小。当碳交易区间处于 900~1 300 kg 时，区间长度逐渐增

大，VPP 碳交易价格处于高梯度价位的量相对较小，因此碳交易成本较小，而随着碳交易成本的减小，系统碳排放量逐渐增大。当碳交易区间处于 1 300~2 500 kg 时，碳交易价格一直处于第一梯度价位，碳交易成本较低，此时碳交易区间对碳排放量的影响程度较小，因此碳排放量趋于稳定。而碳交易成本随碳交易区间长度的增加而逐渐减小，VPP 系统的运行成本也随之逐渐减小。

由此可见，碳交易基价和碳交易区间长度能够影响系统的碳排放量和运行成本，制定合理的碳交易基价以及碳交易区间长度对于促进 VPP 系统运行的低碳性和经济性的协同效果有着重要作用。

4.3 需求响应对 VPP 运行影响分析

对场景 2、场景 3 的电功率平衡情况进行对比，如图 5 所示。

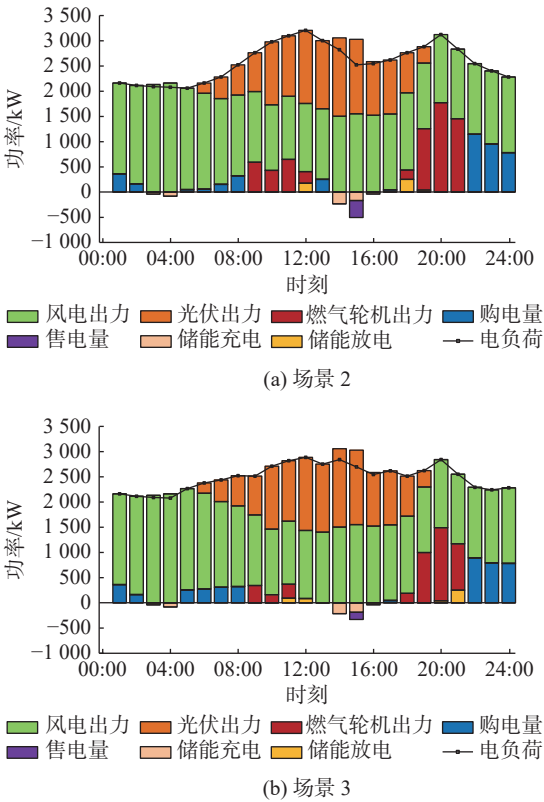


图 5 场景 2、场景 3 电功率平衡对比图

Fig.5 Comparison of electrical power balance in scenario 2 and 3

在 00:00—08:00 时段，电价处于谷时段，所需的电负荷也处于较低水平，此时燃气轮机的单位运行成本要高于购电价格，因此，在电能无法满足需求时，优先采取向电网购电的方式提供电能；当风电出力较大时，此时售电价格较低，出

售多余的电力并不利于收益最大化，因此采用储能将该部分电力存储起来，在购电价格较高时释放这部分电力，从而减少购电成本，保证系统运行的经济性。在 09:00—12:00 时段，电价处于峰时段，购电成本较高，系统采用燃气轮机出力和储能放电的方式提供电能。在 13:00—17:00 时段，售电价格处于平时段，分布式能源充沛，系统会充分利用风光资源，在电力盈余时，将电能存储起来，或将电力出售从而获得收益。在 18:00—24:00 时段，光伏出力逐渐减小直至为 0，仅靠风电出力无法满足负荷需求，系统会通过燃气轮机出力、向电网购电或储能放电来提供相应电能。

为方便分析 VPP 内部需求响应的情况，对需求响应前后柔性电负荷的分布情况进行对比，如图 6 所示。

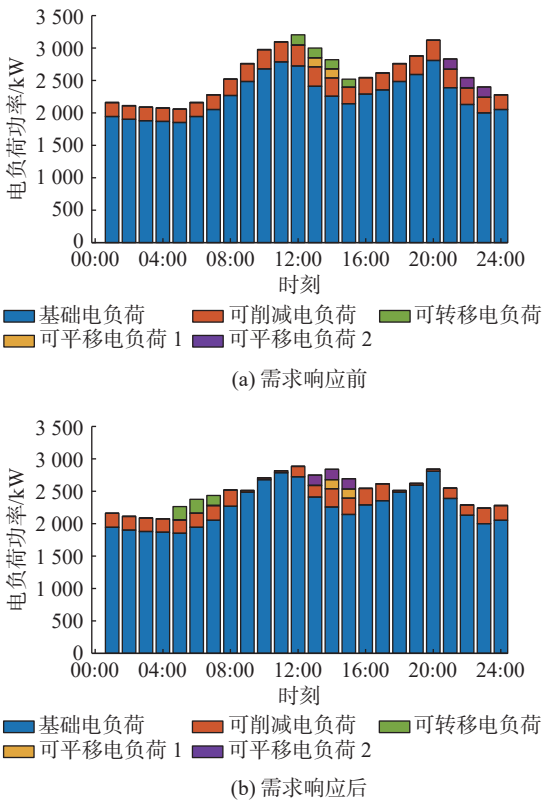


图 6 需求响应前后各柔性电负荷分布情况
Fig.6 Distribution of flexible electrical load before and after demand response

对于柔性负荷的变化，可转移电负荷从 12:00—15:00 时段转移到 05:00—07:00 时段，从负荷较高时段转移到负荷低谷时段，并从原来的 4 个时段拆分成 3 个时段，实现负荷曲线的削峰填谷；可平移电负荷 1 从 13:00—14:00 时段平移到 14:00—15:00

时段，可平移电负荷 2 从 21:00—23:00 时段平移到 13:00—15:00 时段，两种可平移电负荷在平时段内完成需求响应调度；负荷削减主要集中在 09:00—13:00 和 18:00—22:00 时段，多出现在电价峰时段。经过对比分析可以看出，可平移电负荷在平移过程中，其负荷持续时间未发生改变，并且持续时段内的用电功率也与原来一致，而可转移电负荷的用电持续时段和用电功率可在转移过程中自由发生变化。因此，与可平移电负荷相比，可转移电负荷的功率分布更加灵活。

需求响应前后的电负荷曲线变化对比情况如图 7 所示。

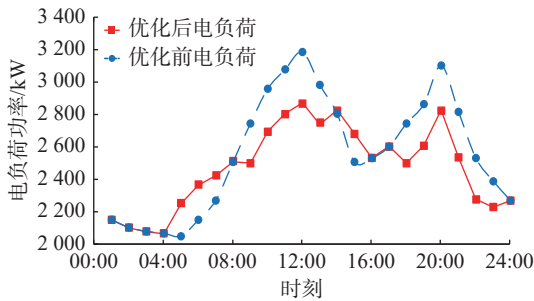


图 7 需求响应前后电负荷曲线变化
Fig.7 Electric load curve changes before and after the demand response

可见负荷曲线峰时段的用电负荷得到削减，谷时段的用电负荷得到填补，需求响应减小了负荷峰谷差，使得负荷曲线更加趋于平缓。柔性负荷参与 VPP 运行起到了削峰填谷的作用，使得场景 3 在场景 2 的基础上进一步减少了 VPP 的总运行成本以及碳排放量。从经济角度分析，柔性负荷的参与虽增加了需求响应的成本，但减小了燃气轮机的出力，大大减小了 VPP 内各设备的运行成本以及碳交易成本；从整体经济效益来看，考虑需求响应降低了 VPP 运行成本，具有良好的经济效益；从低碳角度分析，柔性负荷的参与改变了负荷曲线的变化趋势，使得高碳排的燃气轮机出力大大减少，从而降低了 VPP 内部的碳排放量，具有良好的环境效益。综上，考虑需求响应可有效减少 VPP 的总运行成本和碳排放量，体现出良好的经济性和低碳性。同时，VPP 对其内部的各设备与各柔性负荷进行智能管理，通过调节各设备运行出力以及各柔性负荷分布时段，实现系统整体运行的经济最优化，体现出 VPP 具有良好的智能控制与灵活管理的能力。

5 结 论

针对 VPP 的低碳经济运行，引入一种改进阶梯式碳交易机制，综合考虑可平移、可转移、可削减电负荷的柔性负荷需求响应，以 VPP 日运行成本最小为目标，构建了一种兼顾经济性与低碳性的考虑改进阶梯式碳交易及需求响应的 VPP 优化运行模型，对比分析了 3 种场景的运行情况，并探究了碳交易基价对系统碳排放量的影响，得到以下结论：

- a. 改进阶梯式碳交易机制比传统阶梯式碳交易机制对碳排放量的变化更加敏感，可以降低 VPP 的运行成本和碳排放量，具有良好的经济性和低碳性，更加适合目前的碳交易市场；
- b. 碳交易基价和碳交易区间长度会影响系统的碳排放量和碳交易成本，进而影响总运行成本，制定合理的碳交易基价和碳交易区间长度能够协同低碳性和经济性；
- c. 考虑柔性负荷的需求响应对于电负荷曲线能够起到削峰填谷的作用，平滑了电负荷曲线，缓解了高峰时段的用电紧张态势，改变了 VPP 内部各设备的运行出力，在降低 VPP 运行成本的同时，还能减少碳排放量，给 VPP 带来巨大的经济效益和环境效益，实现经济成本、环境成本的协调统一。同时也体现出 VPP 良好的智能控制与灵活管理能力。

参考文献：

[1] 廖望, 刘东, 巫宇锋, 等. 考虑源荷不确定性及用户响应行为的电力系统低碳经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 905–917.

[2] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望 [J]. 电网技术, 2024, 48(3): 933–948.

[3] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11–24.

[4] 李嘉森, 王进, 杨蒙, 等. 基于随机优化的虚拟电厂热电联合经济优化调度 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 57–65.

[5] YI Z K, XU Y L, ZHOU J G, et al. Bi-level programming

for optimal operation of an active distribution network with multiple virtual power plants[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2855–2869.

[6] BARINGO A, BARINGO L, ARROYO J M. Day-ahead self-scheduling of a virtual power plant in energy and reserve electricity markets under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 1881–1894.

[7] 袁桂丽, 钟飞, 张睿, 等. 考虑碳捕集及需求响应的虚拟电厂热电联合优化调度 [J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4458–4466.

[8] 负保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11–19.

[9] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154–163.

[10] LIU X O. Research on bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity integrated market mechanism[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 137: 107891.

[11] 彭思佳, 邢海军, 成明洋. 多重不确定环境下考虑阶梯型碳交易的虚拟电厂低碳经济调度 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(12): 1571–1582.

[12] 师阳, 李宏伟, 陈继开, 等. 计及激励型需求响应的热电互联虚拟电厂优化调度 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 349–358.

[13] 袁桂丽, 贾新潮, 陈少梁, 等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 105–112.

[14] KONG X Y, LU W Q, WU J Z, et al. Real-time pricing method for VPP demand response based on PER-DDPG algorithm[J]. *Energy*, 2023, 271: 127036.

[15] 王莹, 高岩. 计及需求响应的随机综合能源系统优化配置 [J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(2): 157–165.

[16] 云秋晨, 田立亭, 齐宁, 等. 基于投资组合理论的虚拟电厂资源优化组合方法 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 146–154.

[17] 毕锐, 王孝淦, 袁华凯, 等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 122–132.

[18] 晋旭东, 孙磊, 丁明, 等. 考虑用户响应不确定性的园区综合能源系统分布鲁棒低碳调度 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 10–21.

(编辑：董 伟)