

文章编号: 1006-2467(2023)12-1571-12

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.185

# 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

彭思佳, 邢海军, 成明洋

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 含碳捕集系统的虚拟电厂(VPP)为提升能源效率、实现“双碳”目标提供了一种新路径,同时灵活协调 VPP 系统内多重不确定性是实现系统低碳运行的关键前提. 提出一种在多重不确定性环境下考虑阶梯型碳交易的 VPP 低碳经济调度模型. 对碳捕集系统和需求响应进行建模,并在优化调度模型中引入碳交易机制,构建阶梯型碳交易成本模型,对系统碳排放量进行制约. 对 VPP 内多种不确定因素进行建模,包括风力发电、光伏、负荷、电动汽车,建立考虑机会约束的 VPP 低碳经济调度模型. 运用可调鲁棒优化处理电动汽车的不确定性,并基于序列运算理论,将含机会约束的不确定模型转化为混合整数线性规划模型. 采用数字优化技术 CPLEX 求解,在实际 VPP 算例中验证了所提模型的有效性.

**关键词:** 虚拟电厂; 碳捕集; 机会约束规划; 阶梯型碳交易; 低碳经济调度; 可调鲁棒优化

**中图分类号:** TM 732

**文献标志码:** A

## Low Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plants Considering Ladder-Type Carbon Trading in Multiple Uncertainties

PENG Sijia, XING Haijun, CHENG Mingyang

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

**Abstract:** Virtual power plant (VPP) with a carbon capture system provides a new path to improve energy efficiency and achieve the target of carbon peaking and carbon neutrality. At the same time, flexible coordination of multiple uncertainties in the VPP system is a key premise to realize low-carbon operation of the system. A low-carbon economic dispatch model of VPP considering ladder-type carbon trading in multiple uncertainties is proposed. The carbon capture system and demand response are modeled, and a carbon trading mechanism is introduced into the optimal dispatch model to build a ladder-type carbon trading cost model to restrict system carbon emissions. A variety of uncertain factors in VPP is modeled, including wind power generation, photovoltaic, load and electric vehicle, and a low carbon economic dispatch model of VPP is established considering opportunity constraints. The uncertainty of electric vehicles is dealt with by using adjustable robust optimization. Based on the sequence operation theory, the uncertain model with opportunity constraints is transformed into a mixed integer linear programming model. The decision optimization technology CPLEX solution is used to verify the effectiveness of the proposed model in an actual VPP example.

**Key words:** virtual power plant (VPP); carbon capture; opportunity constrained programming; stepped

收稿日期: 2022-05-27 修回日期: 2022-06-21 录用日期: 2022-06-30

作者简介: 彭思佳(1998-), 硕士生, 从事综合能源、虚拟电厂优化调度研究.

通信作者: 邢海军, 讲师; E-mail: xinghj@shiep.edu.cn.

carbon trading; low carbon economic dispatch; tunable Robust optimization

近年来,能源危机和环境污染威胁着现代社会的可持续发展.分布式电源(Distributed Generator, DG)的高效利用和电动汽车(Electric Vehicle, EV)的快速发展为解决这两个问题提供了机会<sup>[1]</sup>.虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)作为分布式能源的载体,通过能量管理系统优化调度各类分布式能源,提高新能源消纳及供电可靠性.伴随“双碳”目标的提出,电力行业面临巨大的碳减排压力.同时 VPP 内的分布式电源、负荷和电动汽车都具有一定的不确定性,灵活协调 VPP 系统内多重不确定性是实现 VPP 低碳运行的关键前提.因此,在多重不确定环境下,如何实现 VPP 低碳、经济、高效的运行是一个具有挑战性的问题.

目前,考虑不确定性的 VPP 优化调度已有较多研究.文献[2]中考虑可再生能源的不确定性,提出了含风力发电(简称风电)、光伏、电动汽车和常规发电厂的 VPP 随机调度模型.文献[3-4]中考虑了风电和电动汽车的不确定性,构建了 VPP 随机优化调度模型;文献[5]中基于风电、电动汽车和电力市场价格的不确定性影响,构建了 VPP 参与电力市场的随机优化模型;文献[6]中涵盖了调度输入、电力生产和负荷需求的不确定性,建立了包含电动汽车和需求响应的 VPP 多阶段随机框架.上述文献对不确定性的来源考虑较为单一,同时考虑风电、光伏、负荷和电动汽车的不确定性较少.

此外,关于 VPP 参与碳交易的低碳经济调度研究也有了一些进展.文献[7-8]中构建了包含需求响应、燃气轮机、风电和光伏的 VPP 参与碳交易,提出 VPP 的最优调度模型.文献[9]中研究了包括风电、电动汽车、燃气轮机的 VPP,提出参与碳电一体化市场投标的 VPP 联合投标策略模型.文献[10]中将可再生能源能参与到碳交易中,建立了碳交易机制下计及用电行为的 VPP 经济调度模型.但在上述文献中,VPP 参与碳交易时往往只考虑单一价格的碳交易,未考虑到阶梯型碳交易对碳排放量有更好的制约效果.

将碳捕集系统与 VPP 相结合能起到碳减排的作用.文献[11]中将捕集系统正在处理的 CO<sub>2</sub> 量细化为再生塔正在处理的 CO<sub>2</sub> 量和吸收塔正在处理的 CO<sub>2</sub> 量,可以更好地完成碳减排目标.文献[12-13]中将碳捕集系统纳入 VPP 中,提升了可再生能源的消纳量,减少了碳排放量.在上述文献中,碳捕集

系统往往和燃煤机组结合,未涉及燃气轮机在燃烧过程中的碳排放.

综上,不确定性在 VPP 的优化调度研究中一直广受关注,并且在“双碳”背景下,如何实现碳减排也是重点研究方向.在以往文献中,不确定性来源考虑较为单一,且阶梯型碳交易和碳捕集系统更有利于碳减排.由此提出一种考虑多重不确定性和阶梯型碳交易的 VPP 低碳经济调度模型,并加入碳捕集系统进一步控制碳排放量.针对 VPP 内风电、光伏、负荷的不确定性,采用机会约束规划法,使系统内的备用容量满足一定置信水平;采用可调鲁棒优化法处理电动汽车充放电的随机性.重点讨论是否考虑需求响应、是否加装碳捕集系统以及不同的碳交易机制、最优置信水平的选取、不同的鲁棒系数对 VPP 调度的影响,在实际 VPP 算例中验证所提模型的有效性.

# 1 含碳捕集系统的 VPP 模型

含碳捕集系统的 VPP 结构如图 1 所示,包括风电、光伏、碳捕集系统、燃气轮机(Gas Turbine, GT)、储能系统(Energy Storage System, ESS)以及电动汽车.

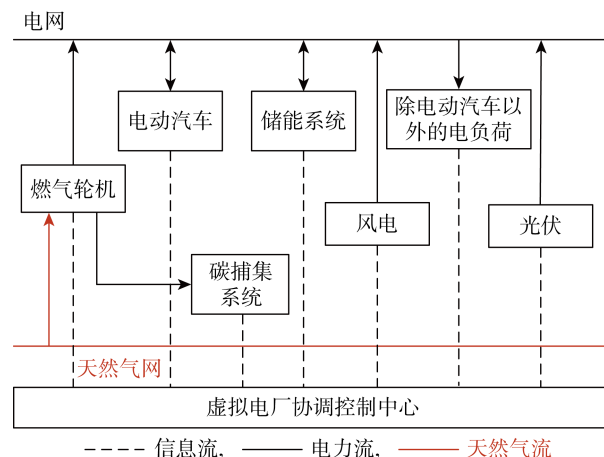


图 1 含碳捕集系统的虚拟电厂结构  
Fig. 1 Structure of VPP with a carbon capture system

## 1.1 碳捕集系统原理

碳捕集的捕集流程<sup>[12]</sup>为:发电系统的烟气首先被捕捉,然后到达 CO<sub>2</sub> 可再生塔,最后通过 CO<sub>2</sub> 压缩机进行封存处理.本文主要考虑碳捕集的过程,未考虑碳封存的过程.

碳捕集系统的捕集能耗<sup>[14]</sup>  $P_c$  分为基本能耗  $P_{c1}$

和运行能耗  $P_o$ :

$$P_c = P_f + P_o \quad (1)$$

$$P_o = e_G \lambda_{GE} \eta_c P^{GT} \quad (2)$$

式中:  $e_G$  为正在处理  $\text{CO}_2$  的排放强度;  $\lambda_{GE}$  为处理单位  $\text{CO}_2$  所需的运行能耗, 可视为常数;  $\eta_c$  为碳捕集率;  $P^{GT}$  为燃气轮机的总出力。

## 1.2 碳交易机制

**1.2.1 碳排放配额** 碳交易也叫碳排放权交易, 出现于《京都议定书》发布后, 它将碳排放权看作一种能够自由交易的商品<sup>[15]</sup>。

政府部门通过免费分配的方式, 将碳配额分配给碳交易市场内需要减排的企业。企业如果成功减排, 则可以出售多余的碳配额; 相反则要在碳交易市场上购买碳配额。

目前碳排放配额的分配方法有 3 种: 基准线法、历史法和拍卖法。基准线法是根据企业的排放情况, 免费分配一定量的初始碳排放配额, 且碳排放配额量与系统发电量成正比<sup>[15]</sup>。因此本文采用基准线法确定 VPP 的碳排放配额量:

$$E_T = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_{GT}} \lambda_T P_{n,t}^{GT} + \lambda_U P_t^{\text{grid}} \quad (3)$$

式中:  $N_{GT}$  为燃气轮机的总数量;  $\lambda_T$  和  $\lambda_U$  分别为燃气轮机和电网的碳配额系数;  $P_{n,t}^{GT}$  为第  $n$  台燃气轮机在  $t$  时刻的发电功率;  $P_t^{\text{grid}}$  为  $t$  时刻 VPP 与电网交互功率;  $T=24$ 。

**1.2.2 阶梯型碳交易成本** 根据碳交易价格可以将碳交易分成单一价格型、阶梯价格型(简称阶梯型)和出清碳价型, 目前大部分研究<sup>[7-10, 14-16]</sup>采用单一价格型碳交易。

阶梯型碳交易将碳排放量分为多个区间, 碳排放量越多, 则单位碳排放价格越高。根据文献<sup>[17]</sup>中的结果, 在保证一定经济性条件下, 阶梯型碳交易可以更好地抑制系统碳排放量, 对碳减排更有利。

阶梯型碳交易成本可表示为

$$E_{\text{CO}_2} = \begin{cases} \lambda_c (E_C - E_T), & E_C \leq E_T + p \\ \lambda_c (E_C - E_T - p)\delta + \lambda_c (E_C - E_T), & E_T + p < E_C \leq E_T + 2p \\ \lambda_c (E_C - E_T - 2p)\delta + \lambda_c (E_C - E_T), & E_T + 2p < E_C \leq E_T + 3p \\ \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\lambda_c$  为碳交易基价;  $p$  为碳排放区间长度;  $\delta$  为碳交易价格的增幅;  $E_C$  为实际碳排放量, 且

$$E_C = E_G + E_U - E_P \quad (5)$$

$$E_G = \sum_{n=1}^{N_{GT}} Q_G P_n^{GT} \quad (6)$$

$$E_U = \psi_{\text{CO}_2} P^{\text{grid}} \quad (7)$$

$$E_P = \sum_{n=1}^{N_{GT}} e_G \eta_c P_n^{GT} \quad (8)$$

式中:  $E_G$ 、 $E_U$  分别为燃气轮机和电网交互产生的碳排放量;  $E_P$  为碳捕集系统捕集的碳排放量;  $Q_G$  为燃气轮机的单位电量碳排放强度;  $\psi_{\text{CO}_2}$  为电网的单位功率碳排放系数。

## 1.3 需求响应

电力负荷分为固定负荷和柔性负荷, 柔性负荷又分为可转移负荷和可中断负荷两类。

**1.3.1 可转移负荷** 可转移负荷的总耗电量不变, 时间可以灵活改变, 其约束条件表示为

$$P_t^{\text{TSL}, \min} \leq P_t^{\text{TSL}} \leq P_t^{\text{TSL}, \max} \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T P_t^{\text{TSL}} = 0 \quad (10)$$

式中:  $P_t^{\text{TSL}}$  为  $t$  时刻转移负荷量;  $P_t^{\text{TSL}, \min}$  和  $P_t^{\text{TSL}, \max}$  分别为  $t$  时刻最小和最大可转移负荷量。

**1.3.2 可中断负荷** 可中断负荷在供电不足或电价高的期间中断, 可以缓解供电压力, 相关约束如下:

$$0 \leq P_t^{\text{EIL}} \leq P_t^{\text{EIL}, \max} \quad (11)$$

式中:  $P_t^{\text{EIL}}$  为  $t$  时刻中断负荷量;  $P_t^{\text{EIL}, \max}$  为  $t$  时刻最大可中断负荷量。

## 2 VPP 内不确定性因素建模

VPP 内的不确定性包括风电、光伏的随机性和波动性, 以及负荷的波动性、电动汽车充放电的随机性。

### 2.1 风电出力的概率模型

根据研究<sup>[18]</sup>显示, 可以利用韦布尔分布概率密度函数模拟风速:

$$P(v) = \frac{k}{C} \left( \frac{v}{C} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{C} \right)^k \right] \quad (12)$$

式中:  $v$  为风速;  $k$  为形状参数;  $C$  为速度参数。

风电的输出功率与风速之间的函数关系可以用以下分段函数表示:

$$P^{\text{WP}} = \begin{cases} 0, & v_t < v_{ci}, v_t > v_{co} \\ \frac{v_t - v_{ci}}{v_R - v_{ci}} P_R, & v_{ci} < v_t < v_R \\ P_R, & v_R \leq v_t \leq v_{co} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $v_{ci}$  为切入风速;  $v_{co}$  为切出风速;  $v_R$  为额定风速;  $P_R$  为额定功率。

根据式(12)和(13), 推导出风电出力概率密度

函数为

$$f_o(P^{\text{WP}}) = \begin{cases} \frac{khv_{\text{ci}}}{CP_{\text{R}}} \frac{\rho}{CP_{\text{R}}} \exp\left[-\left(\frac{\rho}{CP_{\text{R}}}\right)^k\right], & P^{\text{WP}} \in [0, P_{\text{R}}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $h = v_{\text{R}} - v_{\text{ci}} - 1$ ;  $\rho = (P_{\text{R}} + hP^{\text{WP}})v_{\text{ci}}$ .

## 2.2 光伏出力的概率模型

大量统计研究结果<sup>[18]</sup>表明,  $\beta$  分布可用来模拟短时间内太阳辐照强度的概率:

$$P(r) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{b-1} \quad (15)$$

式中:  $r$  为实际的光照强度;  $r_{\text{max}}$  为最大光照强度;  $a$ 、 $b$  分别为  $\beta$  分布的位置参数和形状参数.

光伏的输出功率与太阳辐照强度的关系为

$$P^{\text{PV}} = \xi A \eta \quad (16)$$

式中:  $A$  为光伏板的面积;  $\eta$  为能量转换系数;  $\xi$  为太阳辐照强度.

由式(16)可知, 光伏输出功率与太阳辐照强度呈线性关系, 从而认为光伏输出功率服从  $\beta$  分布. 因此, 光伏输出功率的概率密度函数可以表示为

$$f_p(P^{\text{PV}}) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{P^{\text{PV}}}{P^{\text{PV,max}}}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{P^{\text{PV}}}{P^{\text{PV,max}}}\right)^{b-1} \quad (17)$$

## 2.3 负荷的概率模型

负荷功率波动可近似认为服从正态分布, 因此负荷功率概率密度函数<sup>[18]</sup>为

$$f_L(P^{\text{L}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{L}}} \exp\left[-(P^{\text{L}} - \mu_{\text{L}})^2 / 2\sigma_{\text{L}}^2\right] \quad (18)$$

式中:  $P^{\text{L}}$  为负荷有功功率;  $\mu_{\text{L}}$  和  $\sigma_{\text{L}}$  是负荷功率概率密度函数的期望值和方差.

## 3 考虑阶梯型碳交易成本的 VPP 低碳经济调度模型

### 3.1 目标函数

VPP 低碳经济调度以总收益  $F$  最大为目标函数, 包括 VPP 与电网的交互成本(收益)  $F_{\text{C}}$ 、需求响应的补偿成本  $F_{\text{DR}}$ 、燃气轮机的运行成本  $F_{\text{W}}$ 、碳交易成本  $E_{\text{CO}_2}$ 、碳捕集系统的运行成本  $F_{\text{T}}$ , 以及系统备用容量的成本  $F_{\text{RE}}$ , 出售捕集的  $\text{CO}_2$  产生的收益  $F_{\text{CO}_2}$ , 具体如下:

$$\max F = F_{\text{C}} - F_{\text{DR}} - F_{\text{W}} - E_{\text{CO}_2} - F_{\text{T}} - F_{\text{RE}} + F_{\text{CO}_2} \quad (19)$$

(1) VPP 与电网的交互成本(收益).

$$F_{\text{C}} = \sum_{t=1}^T (\omega_{\text{sell},t} P_t^{\text{grid,sell}} - \omega_{\text{buy},t} P_t^{\text{grid,buy}}) \quad (20)$$

式中:  $P_t^{\text{grid,buy}}$  和  $P_t^{\text{grid,sell}}$  分别为  $t$  时刻的购电量和售

电量;  $\omega_{\text{buy},t}$  和  $\omega_{\text{sell},t}$  分别为  $t$  时刻的购电价格和售电价格.

(2) 需求响应的补偿成本.

$$F_{\text{DR}} = \sum_{t=1}^T \omega_{\text{el},t} P_t^{\text{EIL}} + \omega_{\text{tl},t} P_t^{\text{TSL}} \quad (21)$$

式中:  $\omega_{\text{el},t}$  和  $\omega_{\text{tl},t}$  分别为  $t$  时刻中断负荷以及转移负荷的补偿价格.

(3) 燃气轮机的运行成本.

$$F_{\text{W}} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{n=1}^{N_{\text{GT}}} \omega_{\text{on}} S_{n,t} + U_{n,t} (\zeta + \psi P_{n,t}^{\text{GT}}) \right] \quad (22)$$

式中:  $S_{n,t}$  和  $U_{n,t}$  分别为机组状态变量和开机变量;  $\omega_{\text{on}}$  为燃气轮机的开机成本;  $P_{n,t}^{\text{GT}}$  为  $t$  时刻第  $n$  台燃气轮机的输出功率;  $\zeta$  和  $\psi$  为燃气轮机的耗量系数.

(4) 碳捕集系统运行成本.

$$F_{\text{T}} = \omega_{\text{T}} P_{\text{o}} \quad (23)$$

式中:  $\omega_{\text{T}}$  为碳捕集设备运行成本系数.

(5) 系统备用的成本.

$$F_{\text{RE}} = \sum_{t=1}^T (\omega_{\text{re,GT}} R_{n,t}^{\text{GT}} + \omega_{\text{re,ESS}} R_t^{\text{ESS}} + \omega_{\text{re,EV}} R_t^{\text{EV}}) \quad (24)$$

式中:  $R_{n,t}^{\text{GT}}$ 、 $R_t^{\text{ESS}}$ 、 $R_t^{\text{EV}}$  分别为燃气轮机、ESS、电动汽车提供的备用容量;  $\omega_{\text{re,GT}}$ 、 $\omega_{\text{re,ESS}}$ 、 $\omega_{\text{re,EV}}$  分别为燃气轮机、ESS、电动汽车的备用价格.

(6) 出售捕集的碳排放产生的收益.

$$F_{\text{CO}_2} = \omega_{\text{p}} E_{\text{p}} \quad (25)$$

式中:  $\omega_{\text{p}}$  为出售  $\text{CO}_2$  的价格.

### 3.2 约束条件

(1) 系统供需平衡约束:

$$P_t^{\text{grid}} + E(P_t^{\text{PV}}) + E(P_t^{\text{WP}}) + P_t^{\text{GT}} + P_{\text{DC},t}^{\text{EV}} + P_{\text{DC},t}^{\text{ESS}} = P_{\text{CH},t}^{\text{ESS}} + P_t^{\text{TSL}} + P_t^{\text{CL}} - P_t^{\text{EIL}} + P_{\text{CH},t}^{\text{EV}} + E(P_t^{\text{L}}) \quad (26)$$

式中:  $E(P_t^{\text{PV}})$ 、 $E(P_t^{\text{WP}})$ 、 $E(P_t^{\text{L}})$  分别为光伏、风电出力、负荷功率的期望值;  $P_{\text{CH},t}^{\text{EV}}$  和  $P_{\text{DC},t}^{\text{EV}}$  为  $t$  时刻电动汽车的充放电功率;  $P_{\text{CH},t}^{\text{ESS}}$  和  $P_{\text{DC},t}^{\text{ESS}}$  为  $t$  时刻 ESS 的充放电功率;  $P_t^{\text{CL}}$  为  $t$  时刻碳捕集功率.

$$P_t^{\text{grid}} \leq P_t^{\text{grid,max}} \quad (27)$$

式中:  $P_t^{\text{grid,max}}$  为电网提供的最大功率.

(2) 燃气轮机运行约束:

$$P_n^{\text{GT,min}} \leq P_{n,t}^{\text{GT}} + R_{n,t}^{\text{GT}} \leq P_n^{\text{GT,max}} \quad (28)$$

式中:  $P_n^{\text{GT,min}}$  和  $P_n^{\text{GT,max}}$  分别为第  $n$  台燃气轮机的最小输出功率和最大输出功率.

(3) ESS 运行约束:

$$C_t^{\text{ESS}} = C_{t-1}^{\text{ESS}} + \left( \eta_{\text{CH}}^{\text{ESS}} P_{\text{CH},t}^{\text{ESS}} - \frac{P_{\text{DC},t}^{\text{ESS}}}{\eta_{\text{DC}}^{\text{ESS}}} \right) \Delta t \quad (29)$$

$$C^{\text{ESS,min}} \leq C^{\text{ESS}} \leq C^{\text{ESS,max}} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq P_{CH,t}^{ESS} \leq P_{CH}^{ESS,max} \\ 0 &\leq P_{DC,t}^{ESS} \leq P_{DC}^{ESS,max} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$C_0^{ESS} = C_{end}^{ESS} \quad (32)$$

式中:  $C^{ESS}$  为 ESS 的电池容量;  $\eta_{CH}^{ESS}$  和  $\eta_{DC}^{ESS}$  为 ESS 的充放电效率;  $C_0^{ESS}$  和  $C_{end}^{ESS}$  分别为 ESS 的初始电池容量和调度结束时的电池容量. 式(29)~(31)是 ESS 的电池容量和充放电约束, 式(32)用来确保 ESS 每个循环都能有相同的初始状态.

ESS 提供的备用容量满足如下约束:

$$R_t^{ESS} \leq \min \left\{ \frac{\eta_{CH}^{ESS} (C_t^{ESS} - C_{min}^{ESS})}{\Delta t}, P_{DC}^{ESS,max} - P_{DC,t}^{ESS} \right\} \quad (33)$$

(4) EV 运行约束:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq P_{DC,t}^{EV} \leq P_{DC}^{EV,max} \\ 0 &\leq P_{CH,t}^{EV} \leq P_{CH}^{EV,max} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

式中:  $P_{CH}^{EV,max}$  和  $P_{DC}^{EV,max}$  分别为每辆电动汽车的最大充电和放电功率.

EV 的备用不能超过其可用容量:

$$R_t^{EV} \leq P_{DC,t}^{EV,max} - P_{DC,t}^{EV} \quad (35)$$

$$C_t^{EV} = C_{t-1}^{EV} + \left( \eta_{CH}^{EV} P_{CH,t}^{EV} - \frac{P_{DC,t}^{EV}}{\eta_{DC}^{EV}} \right) \Delta t \quad (36)$$

$$C^{EV,min} \leq C^{EV} \leq C^{EV,max} \quad (37)$$

式中:  $C_t^{EV}$  为每辆电动汽车在  $t$  时刻的电池容量;  $\eta_{CH}^{EV}$  和  $\eta_{DC}^{EV}$  为电动汽车的充、放电效率.

(5) 备用容量约束. VPP 内配置备用的主要目的在于应对风电、光伏出力的随机性和负荷功率的波动, 保证调度过程中能对外稳定输出. 因此, 可以使系统的备用满足一定置信水平  $\alpha$ , 以平衡运行中可靠性和经济性的要求. 设置 3 种备用: 燃气轮机备用  $R_t^{GT}$ 、ESS 备用  $R_t^{ESS}$ 、电动汽车备用  $R_t^{EV}$ .

$$\begin{aligned} &P_{rob} [(R_t^{GT} + R_t^{ESS} + R_t^{EV}) + P_t^{gird} + \\ &E(P_t^{PV}) + E(P_t^{WP}) + P_t^{GT} + P_{DC,t}^{EV} + \\ &P_{DC,t}^{ESS} \geq P_{CH,t}^{ESS} + P_t^{TSL} + P_t^{CL} - \\ &P_t^{EIL} + P_{CH,t}^{EV} + E(P_t^L)] \geq \alpha \end{aligned} \quad (38)$$

式中:  $P_{rob}$  为以概率形式表示的系统的备用.

### 3.3 系统的风险成本

上述备用容量约束为概率形式, 因而会造成一定的失负荷风险:

$$\begin{aligned} P_{risk} &= E(P_t^L) + P_{CH,t}^{ESS} + P_t^{TSL} + P_t^{CL} - \\ &P_t^{EIL} + P_{CH,t}^{EV} - P_t^{gird} - E(P_t^{PV}) - E(P_t^{WP}) - \\ &P_t^{GT} - P_{DC,t}^{ESS} - (R_t^{ESS} + R_t^{EV} + R_t^{GT}) - P_{DC,t}^{EV} \end{aligned} \quad (39)$$

风险成本为

$$F_{risk} = \sum_{t=1}^T P_{risk} \lambda_t^{pen} \quad (40)$$

$$\lambda_t^{pen} = \pi \omega_{sell,t} \quad (41)$$

式中:  $\lambda_t^{pen}$  为单位罚金;  $\pi$  为风险系数.

将风险成本加入式(19)的目标函数中, 当收益最大时所对应的置信水平即为 VPP 机会约束规划所应选择的最佳置信水平.

### 3.4 模型求解

**3.4.1 序列运算理论** 为了求解风电光伏和负荷的出力, 需要得到不确定性变量的概率分布及其逆函数, 但对逆函数的求解比较困难. 因此需要引入序列运算理论<sup>[19]</sup> 对不确定性变量的概率分布进行离散化.

以风电的概率序列  $a(i_{a,t})$  为例, 概率序列的长度为

$$N_{a,t} = \left\lceil \frac{P_{WP,max}}{q} \right\rceil \quad (42)$$

$a(i_{a,t}) =$

$$\begin{cases} \int_0^{\frac{q}{2}} f_o(P^{WP}) dP^{WP}, & i_{a,t} = 0 \\ \int_{i_{a,t}q - \frac{q}{2}}^{i_{a,t}q + \frac{q}{2}} f_o(P^{WP}) dP^{WP}, & 0 < i_{a,t} < N_{a,t} \\ \int_{i_{a,t}q - \frac{q}{2}}^{i_{a,t}q} f_o(P^{WP}) dP^{WP}, & i_{a,t} = N_{a,t} \end{cases} \quad (43)$$

式中:  $q$  为离散化步长;  $P_{WP,max}$  为最大风电出力.

由于随机变量较多, 所以引入等效负荷, 使其满足下式:

$$P^{EL} = P^L - P^{WP} - P^{PV} \quad (44)$$

类似可以得到光伏概率序列  $b(i_{b,t})$  和负荷概率序列  $c(i_{c,t})$ , 等效负荷概率序列  $e(i_{e,t})$  由  $c(i_{c,t})$  和  $d(i_{d,t})$  卷积得到, 其中风光联合出力  $d(i_{d,t})$  由  $a(i_{a,t})$  和  $b(i_{b,t})$  卷积得到, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} e(i_{e,t}) &= c(i_{c,t}) \oplus d(i_{d,t}) = \\ &\begin{cases} \sum_{i_{c,t} - i_{d,t} = i_{e,t}} c(i_{c,t}) d(i_{d,t}), & 1 \leq i_{e,t} \leq N_{e,t} \\ \sum_{i_{c,t} \leq i_{d,t}} c(i_{c,t}) d(i_{d,t}), & i_{e,t} = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} d(i_{d,t}) &= a(i_{a,t}) \oplus b(i_{b,t}) = \sum_{i_{a,t} + i_{b,t} = i_{d,t}} a(i_{a,t}) b(i_{b,t}), \\ i_{d,t} &= 0, 1, \dots, N_{a,t} + N_{b,t} \end{aligned} \quad (46)$$

风电出力的期望值  $E(P_t^{WP})$ 、光伏出力的期望值  $E(P_t^{PV})$  和负荷功率的期望值  $E(P_t^L)$  可由下列公式求出:

$$E(P_t^{WP}) = \sum_{u_{a,t}=0}^{N_{a,t}} u_{a,t} q a(u_{a,t}) \quad (47)$$

$$E(P_t^{PV}) = \sum_{u_{b,t}=0}^{N_{b,t}} u_{b,t} q b(u_{b,t}) \quad (48)$$

$$E(P_t^L) = \sum_{u_{e,t}=0}^{N_{e,t}} u_{e,t} q_C(u_{e,t}) \tag{49}$$

从而得到等效负荷出力的期望值为

$$E(P_t^{EL}) = E(P_t^L) - E(P_t^{WP}) - E(P_t^{PV}) \tag{50}$$

表 1 为等效负荷出力及其概率序列,共有  $N_{e,t}$  个状态,第  $u_e$  个状态对应的出力为  $u_e q$ ,对应的概率为  $e(u_e)$ .

表 1 等效负荷概率序列

Tab. 1 Equivalent load probability sequence

功率/kW	概率
0	$e(0)$
$q$	$e(1)$
$u_e q$	$e(u_e)$
$N_{e,t} q$	$e(N_{e,t})$

为了将机会约束规划转化成混合整数线性规划,利用线性化方法,引入一个 0-1 变量,令

$$M_t = R_t^{ESS} + R_t^{GT} + R_t^{EV} + P_t^{gird} + P_t^{GT} + P_{DC,t}^{EV} - P_{CH,t}^{ESS} - P_t^{TSL} - P_t^{CL} + P_t^{EIL} - P_{CH,t}^{EV}$$
$$\omega_{u_{e,t}} = \begin{cases} 1, & M_t \geq E(P_t^{EL}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{51}$$

式中:  $\forall t, u_{e,t} = 0, 1, \dots, N_{e,t}$ .

式(51)可以改写成如下所示:

$$\sum_{u_{e,t}=0}^{N_{e,t}} \omega_{u_{e,t}} e(u_{e,t}) \geq \alpha \tag{52}$$

但是式(52)不能和混合整数线性规划兼容,则

将其写成如下形式:

$$(M_t - E(P_t^{EL}))/\tau \leq \partial_{u_{e,t}} \leq 1 + (M_t - E(P_t^{EL}))/\tau, \quad u_{e,t} = 0, 1, \dots, N_{e,t} \tag{53}$$

式中:  $\tau$  为一个很大的正数. 当  $M_t \geq E(P_t^{EL})$  时,式(53)等价于  $\gamma \leq \partial_{u_{e,t}} \leq 1 + \gamma$ ,  $\gamma$  是一个很小的数,由于  $\omega_{u_{e,t}}$  为 0-1 变量,所以只能取 1;反之则取 0.

3.4.2 EV 的可调鲁棒优化模型 调度模型的整体求解流程如图 2 所示. 电动汽车的可调鲁棒优化模型将不确定性参数的波动形成一个不确定性区间,根据不确定性区间的边界在最恶劣情况下求出最优解:

$$P_t^{EV} = P_{DC,t}^{EV} - P_{CH,t}^{EV} \tag{54}$$

$$\tilde{P}_t^{EV} = P_t^{EV} + \lambda_t \eta_t P_t^{EV}, \quad \lambda_t \in [-1, 1] \tag{55}$$

式中:  $\tilde{P}_t^{EV}$  为电动汽车出力的不确定性形式;  $\eta_t$  为误差系数,认为电动汽车出力在  $[(1 - \eta_t)P_t^{EV}, (1 + \eta_t)P_t^{EV}]$  内波动.

为了在电动汽车出力不确定的条件下依然存在最优解,需将式(26)约束改写为

$$P_t^{gird} + E(P_t^{PV}) + E(P_t^{WP}) + P_t^{GT} + P_{DC,t}^{ESS} - P_{CH,t}^{ESS} + \tilde{P}_t^{EV} \geq P_t^{TSL} + P_t^{CL} - P_t^{EIL} + P_{c,t} + E(P_t^L) \tag{56}$$

令

$$W_t = P_t^{gird} + E(P_t^{PV}) + E(P_t^{WP}) + P_t^{GT} + P_{DC,t}^{ESS} - P_{CH,t}^{ESS} - P_t^{TSL} - P_t^{CL} + P_t^{EIL} - P_{c,t} - E(P_t^L) \tag{57}$$

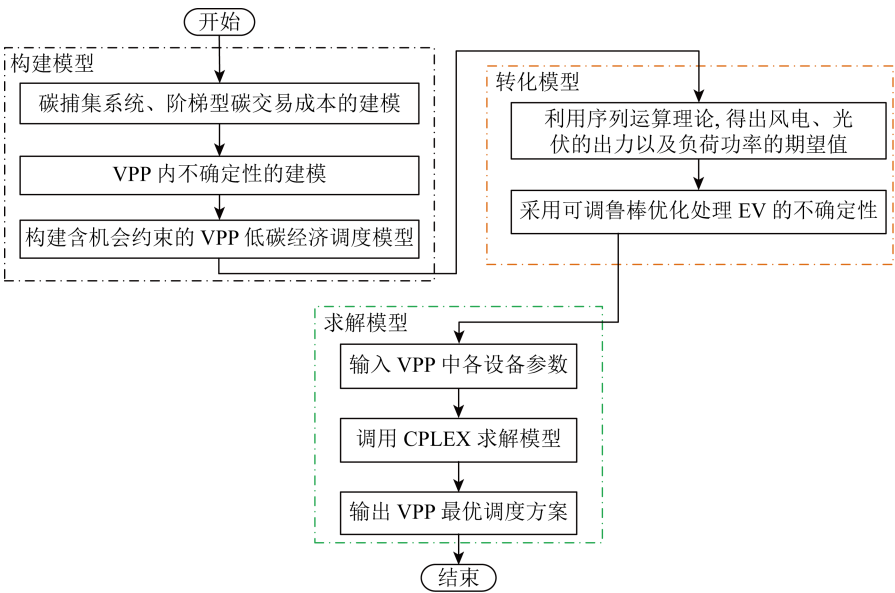


图 2 调度模型的整体求解流程

Fig. 2 Overall solution process of scheduling model

则式(57)可以改写为

$$-\tilde{P}_t^{\text{EV}} \leqslant W_t$$

(58)

将式(55)代入式(58)得:

$$-(P_t^{\text{EV}} + \lambda_i \eta_i P_t^{\text{EV}}) \leqslant W_t$$

(59)

引入辅助变量  $y_t$ , 令  $y_t \geqslant |P_t^{\text{EV}}|$ , 对式(59)的约束条件进行加强, 则:

$$\begin{aligned} -(P_t^{\text{EV}} + \lambda_i \eta_i P_t^{\text{EV}}) &\leqslant -P_t^{\text{EV}} + \eta_i |P_t^{\text{EV}}| \leqslant \\ &-P_t^{\text{EV}} + \eta_i y_t \leqslant W_t \end{aligned}$$

(60)

为了能够调节结果的鲁棒性, 引入鲁棒系数  $\Gamma$ ,  $\Gamma \in [0, 1]$ , 则式(60)转化为

$$-P_t^{\text{EV}} + \Gamma \eta_i P_t^{\text{EV}} \leqslant W_t$$

(61)

4 算例分析

4.1 算例简介

选取的分时电价和燃气轮机参数<sup>[20]</sup>如表 2 和 3 所示. 电动汽车参数参考文献[21], 碳捕集系统参数参考文献[22], 阶梯型碳交易价格参考文献[23], 出售 CO<sub>2</sub> 的价格参考文献[24], 其余参数如下.

(1) 电网参数: VPP 与电网交互的最大功率为 500 kW, 备用价格为 0.04 元/(kW · h), 电网的单位功率碳排放系数为 0.928 kg/(kW · h), 碳排放配额为 0.877 kg/(kW · h).

(2) ESS 参数: 最大充电容量为 200 kW · h, 备用价格为 0.02 元/(kW · h), 充放电功率最大值为 60 kW, 充放电效率为 0.9.

(3) 风力发电机参数:  $v_{\text{ci}} = 3$  m/s,  $v_{\text{R}} = 15$  m/s,  $v_{\text{co}} = 25$  m/s, 额定功率为 500 kW.

(4) 光伏参数: 光伏板面积为 2 400 m<sup>2</sup>, 转化效率为 0.093, 最大功率为 260 kW.

表 2 分时电价

Tab. 2 Time-of-use electricity price

时段	特定时间段	电价/ (元 · kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )
高峰期	8:00—11:00, 18:00—21:00	0.964
中峰期	6:00—7:00, 12:00—17:00	0.575
低峰期	1:00—5:00, 22:00—24:00	0.273

表 3 燃气轮机参数

Tab. 3 Parameters of gas turbine

$\zeta$ /元	$\phi$ /元	$w_{\text{re,GT}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	$w_{\text{on}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$
1.2	0.35	0.04	1.6
<hr/>			
$P_{\text{GT,max}}/\text{kW}$	$\lambda_{\text{T}}/(\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$Q_{\text{G}}/(\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	
500	0.156	0.4	

(5) 可转移负荷、可中断负荷均设为总负荷的 10%, 可转移负荷、可中断负荷的补偿价格<sup>[25]</sup>分别设为 0.08 和 0.3 元/(kW · h).

VPP 内光伏风电出力的预测和电力负荷需求图如图 3 所示.

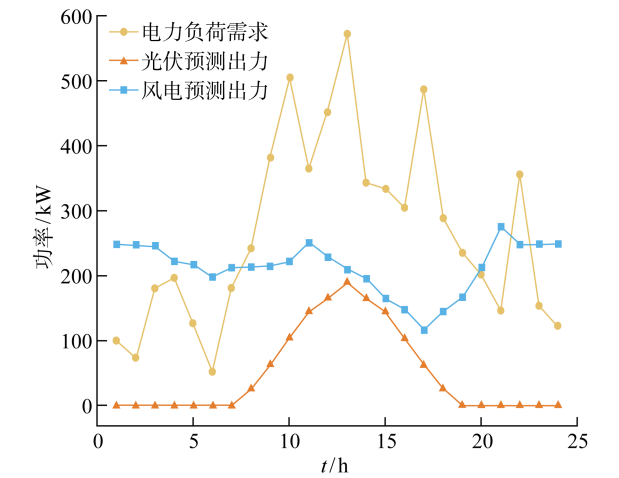


图 3 光伏风电负荷预测出力  
Fig. 3 Forecasting output of photovoltaic, wind power, and load

4.2 优化结果分析

4.2.1 离散化步长的影响分析 离散化步长的大小影响序列的长度, 从而影响调度结果. 图 4 为不同离散化步长对 VPP 收益的影响在相同的置信水平下, 当离散化步长大于 4 kW 且小于 5 kW 时, VPP 的收益差距较小, 这说明离散化步长对 VPP 收益的影响较小, 但是离散化步长越小, VPP 进行优化的时间越长. 因此, 选择 5 kW 作为本文的离散化步长进行研究.

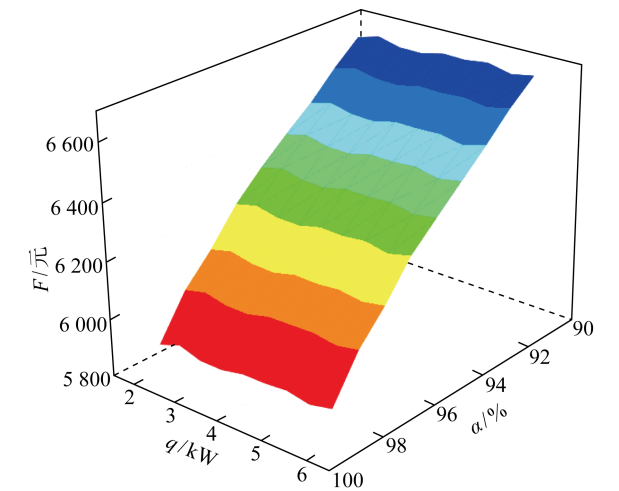


图 4 离散化步长对 VPP 收益的影响  
Fig. 4 Effect of discretization step size on VPP returns



4.2.2 置信水平和风险系数对 VPP 的影响分析

表 4 为不同置信水平和风险系数下 VPP 的收益以及计及风险成本后 VPP 的收益. 当 VPP 收益计及风险成本时, VPP 的收益呈现先增大后减小的趋势; 当 VPP 收益不计及风险成本时, 随着置信水平的不断减小, VPP 的收益不断增大, 这是由于置信水平的减小导致备用容量随之减小, 从而备用成本减少. 由此可见, 置信水平的合理选取使得 VPP 在收益和风险之间达到平衡.

图 5 为不同风险系数下计及风险成本的 VPP

表 4 不同置信水平和风险系数下 VPP 的收益和风险成本  
Tab.4 Benefits and risk costs of VPP at different confidence levels and risk factors

$\pi$	$\alpha/\%$	$F_{risk}/\text{元}$	不计风险成本 的收益/元	计及风险成本 的收益/元
2	99	251.91	5 916.40	5 664.49
	97	316.77	6 160.00	5 843.23
	95	723.68	6 366.31	5 642.64
	93	1 162.82	6 515.82	5 353.01
	91	1 517.52	6 684.76	5 167.25
3	99	629.77	5 916.40	5 286.63
	97	791.92	6 160.00	5 368.08
	95	1 809.2	6 366.31	4 557.12
	93	2 907.05	6 515.82	3 608.78
	91	3 793.8	6 684.76	2 890.97
5	99	1 007.64	5 916.40	4 908.76
	97	1 267.08	6 160.00	4 892.92
	95	2 894.72	6 366.31	3 471.60
	93	4 651.28	6 515.82	1 864.55
	91	6 070.08	6 684.76	614.69

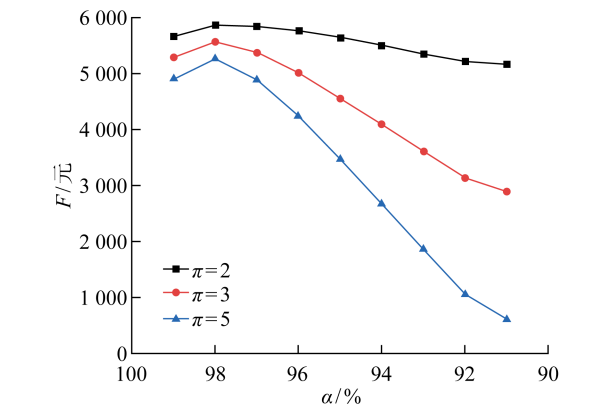


图 5 不同风险系数下计及风险成本的 VPP 收益  
Fig. 5 VPP benefits including risk cost at different risk factors

收益. 可知, 当置信区间为 98%~99% 时, 风险系数为 2、3、5 的 VPP 收益曲线呈上升趋势; 当置信水平为 98% 时, VPP 的收益达到最高点, 之后开始下降, 因此选择置信水平为 98% 作为最佳置信水平. 但是, 该处未考虑鲁棒系数和误差系数的影响, 并且区间的选取也较粗糙, 将在后续研究中更精细地分析.

4.2.3 电动汽车不确定性和需求响应的影响分析

为验证考虑电动汽车不确定性和需求响应的优势, 设置 3 种场景: 场景一考虑电动汽车不确定性、不考虑需求响应的低碳经济调度; 场景二考虑需求响应、不考虑电动汽车不确定性的低碳经济调度; 场景三考虑需求响应和电动汽车不确定性的低碳经济调度.

给定置信水平为 98%, 图 6 为 3 种场景下 VPP 内燃气轮机的出力, 图 7 为 3 种场景下 VPP 的购售电功率, 正值表示向电网售电, 负值表示从电网购电. 8:00—16:00 时, 与场景一相比, 场景三的售电量多, 而燃气轮机功率少, 是由于场景三考虑了需求响应, 中断了部分负荷, 使得 VPP 有更多的电能可

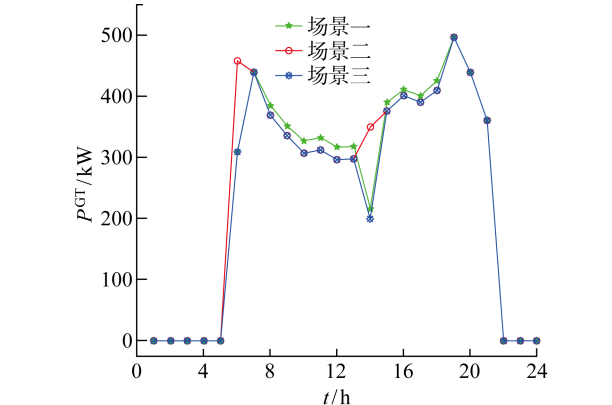


图 6 3 种场景下 VPP 内燃气轮机的出力  
Fig. 6 Output of gas turbine in VPP in three scenarios

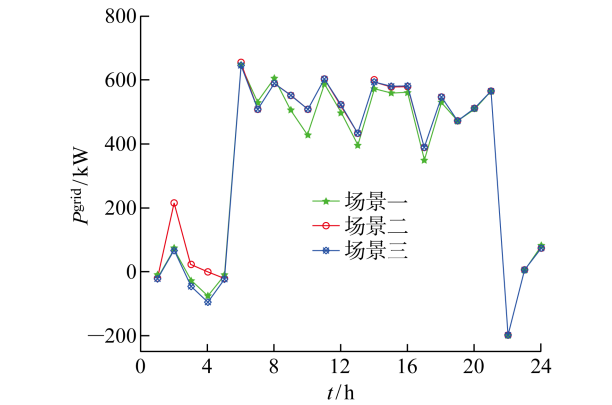


图 7 3 种场景下 VPP 内购售电功率  
Fig. 7 Power purchased and sold in VPP in three scenarios



以出售. 1:00—3:00 时,与场景三相比,场景二的售电量高,是由于场景二的 EV 充电量在此时间段较少,综合考虑需求响应和 EV 不确定性可以提升 VPP 的经济性.

图 8 为 3 种场景下 EV 的充放电情况,正值表示电动汽车放电,负值表示 EV 充电;图 9 为需求响应前后电负荷需求图. 综合图 8 和图 9,可知电动汽车在 1:00—5:00、23:00—24:00 等负荷需求低时进行充电,在 6:00 和 14:00 的高峰时段进行放电,给电网补给出力;并且可转移负荷在 0:00—7:00 的低峰时期移入,在 9:00—11:00 以及 21:00 移出,可中断负荷在 9:00—17:00 中高峰时期中断. 这说明同时考虑需求响应和 EV 不确定性可以辅助电力系统的稳定运行,并且起到削峰填谷的作用,使得负荷曲线的峰谷差减小. 场景二电动汽车不放电,是由于当不考虑 EV 的不确定性时,电动汽车相当于储能,而场景一电动汽车充电量在 1:00—5:00 时比场景二高是由于场景二考虑了需求响应,可转移负荷的移入会消耗一部分电能.

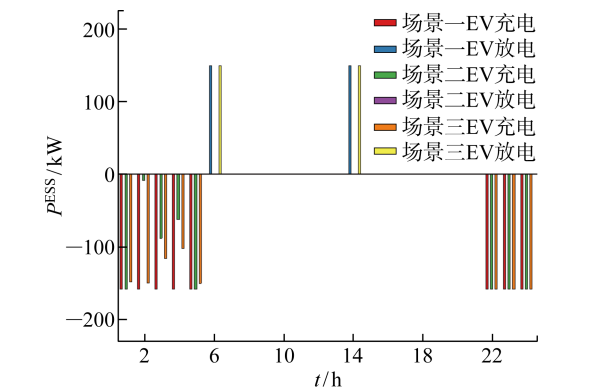


图 8 3 种场景下 EV 的充放电情况

Fig. 8 EV charging and discharging in three scenarios

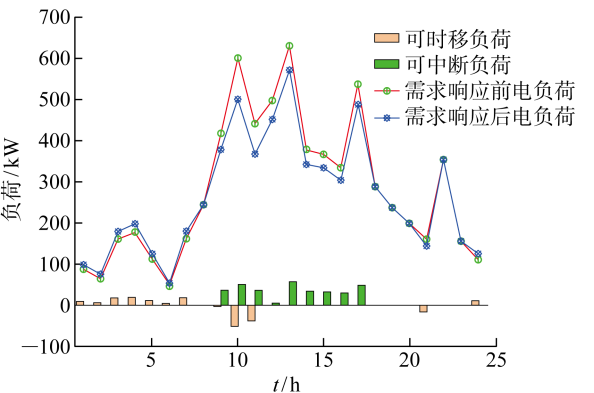


图 9 需求响应前后电负荷需求

Fig. 9 Electric load demand before and after demand response

4.2.4 碳交易机制和碳捕集系统对调度结果的影响 为了说明碳捕集系统以及阶梯型碳交易的优势,给定置信水平为 98%,不考虑鲁棒系数和误差系数的影响. 设置 4 个模式:模式一在阶梯型碳交易机制下,不考虑碳捕集系统;模式二在阶梯型碳交易机制下,考虑碳捕集系统;模式三在单一价格型碳交易机制下,考虑碳捕集系统;模式四在单一价格型碳交易机制下,不考虑碳捕集系统. 4 种模式下的调度结果如表 5 所示.

表 5 4 种模式下的调度结果

Tab. 5 Benefits and risk costs of VPP at different confidence levels and risk factors

模式	碳排放量/kg	碳捕集量/kg	碳交易成本/元	碳捕集运行成本/元	CO <sub>2</sub> 出售收益/元
一	4 831.40	0	2 162.0	0	0
二	520.56	3 533.5	-983.8	989.30	3 180.1
三	599.16	3 521.5	-894.2	986.02	3 169.3
四	4 895.40	0	2 177.0	0	0

由表 5 可知,模式二的碳排放量比模式一少 4 310.84 kg,模式三碳排放量比模式四少 4 296.24 kg;而模式二的碳交易收益比模式一高 3 145.8 元,模式三比模式四高 3 071.2 元. 由此说明,考虑碳捕集系统可以降低 VPP 的碳排放量,加入碳捕集系统后,燃气轮机的碳排放量低于碳配额,因而可以出售碳排放权来获得收益,同时碳捕集捕集的 CO<sub>2</sub> 也可以通过出售的方式来增加 VPP 收益. 此外,模式二的碳排放量比模式三少 78.6 kg,模式一的碳排放量比模式四少 64 kg. 由此可见,相对于单一价格型碳交易,阶梯型碳交易对碳排放量的制约更好,并且能提高 VPP 收益,如果 VPP 规模扩大,差距将更明显.

4.2.5 鲁棒系数以及预测误差系数对优化结果的影响分析 在电动汽车可调鲁棒模型下,鲁棒系数以及预测误差系数对 VPP 的优化调度有一定影响. 给定置信水平为 98%,图 10 为不同鲁棒系数以及预测误差系数下 VPP 的收益,图 11 为不同鲁棒系数以及预测误差系数下电动汽车充放电情况,  $P^{EV}$  为电动汽车充放电功率.

综合图 10 和图 11,鲁棒系数和误差系数的增大使得电动汽车的出力范围变大. 当预测误差系数一定时,随着鲁棒系数的增大,VPP 的收益减少. 但当预测误差系数较小时,鲁棒系数的变化对优化结果的影响并不明显,所得结果较为保守;当鲁棒系数一定时,预测误差系数越大,VPP 收益下降越快,这

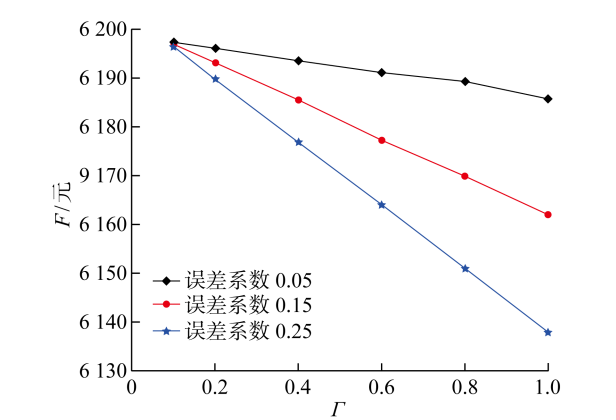


图 10 不同鲁棒系数以及预测误差系数下 VPP 的收益  
Fig. 10 Profit graph of VPP at different robustness coefficients and prediction error coefficients

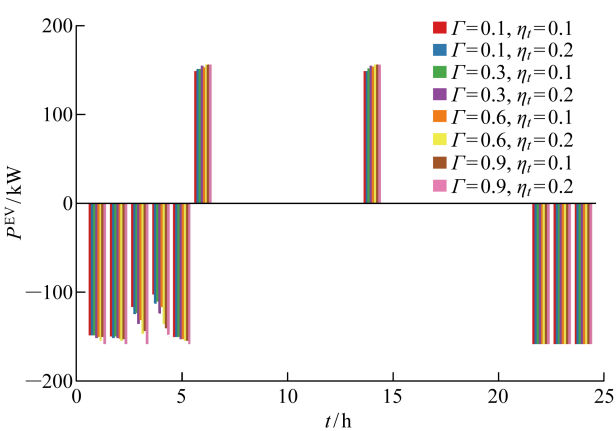


图 11 不同鲁棒系数以及预测误差系数下 EV 充放电情况  
Fig. 11 EV charging and discharging at different robustness coefficients and prediction error coefficients

是由于电动汽车的出力范围增大导致 VPP 的成本增加从而收益降低,但如何在鲁棒性和经济性中获得平衡将在下一步研究中深入探讨。

5 结论

提出一种在多种不确定性环境下考虑阶梯型碳交易的 VPP 低碳经济调度模型,综合考虑 VPP 内多重不确定性,分析研究机会约束最佳置信水平的选取、鲁棒系数和误差系数对 VPP 调度的影响,并在 VPP 内引入碳捕集系统和阶梯型碳交易,发挥其组合优势降低碳排放量、增加收益,实现低碳性和经济性的结合。通过算例分析验证,得到以下结论:

(1) 针对 VPP 内多样化的不确定性,采用机会约束规划处理风、光、负荷的不确定性,并运用可调鲁棒处理电动汽车的不确定性,分析不同置信水平下 VPP 的收益,并将风险成本纳入目标函数中,得出风险-收益最佳的置信水平为 98%,但区间的选

取较粗糙且未考虑鲁棒系数以及误差系数的影响,因而后续研究将进行更精细的分析。

(2) 同时考虑需求响应和电动汽车的不确定性比单独考虑其中之一更显优势,降低了高峰时段的用电压力,更能减少负荷曲线的峰谷差。

(3) 碳捕集系统的加入能够减少 VPP 碳排放量 4 310.84 kg,并且使得 VPP 的碳排放量小于碳配额,可以通过碳交易、出售碳捕集的 CO<sub>2</sub> 获得收益。阶梯型碳交易相比单一价格型碳交易能较好抑制碳排放,若 VPP 规模增大,效果将更明显。由于没有考虑鲁棒系数和误差系数的影响,所以所得结论不够精细,后续将对此问题进行更具体研究。

(4) 鲁棒系数和误差系数的增大使得电动汽车的出力范围变大。当误差系数一定时,随着鲁棒系数的增大,VPP 的收益减少;当鲁棒系数一定时,误差系数越大,VPP 收益下降越快。后续将展开如何在鲁棒性和经济性中获得平衡的深入研究。

参考文献:

[1] ROUZBAHANI H M, KARIMIPOUR H, LEI L. A review on virtual power plant for energy management [J]. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 2021, 47: 101370.

[2] JU L W, LI H H, ZHAO J W, et al. Multi-objective stochastic scheduling optimization model for connecting a virtual power plant to wind-photovoltaic-electric vehicles considering uncertainties and demand response [J]. **Energy Conversion and Management**, 2016, 128: 160-177.

[3] 孙国强, 袁智, 耿天翔, 等. 含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度[J]. **电力系统自动化**, 2017, 41(6): 44-50.

SUN Guoqiang, YUAN Zhi, GENG Tianxiang, et al. Robust stochastic optimal dispatching of virtual power plant containing plug-in electric vehicles [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2017, 41(6): 44-50.

[4] 卢志刚, 王荟敬, 赵号, 等. 含 V2G 的虚拟电厂双层逆鲁棒优化调度策略[J]. **电网技术**, 2017, 41(4): 1245-1252.

LU Zhigang, WANG Huijing, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G [J]. **Power System Technology**, 2017, 41(4): 1245-1252.

[5] ALAHYARI A, EHSAN M, MOUSAVIZADEH M. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: A self-sched-

- uling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties[J]. **Journal of Energy Storage**, 2019, 25: 100812.
- [6] SHEIDAEI F, AHMARINEJAD A. Multi-stage stochastic framework for energy management of virtual power plants considering electric vehicles and demand response programs[J]. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2020, 120: 106047.
- [7] 刘祚宇, 齐峰, 文福拴, 等. 含电动汽车虚拟电厂参与碳交易时的经济与环境调度[J]. **电力建设**, 2017, 38(9): 45-52.
- LIU Zuoyu, QI Feng, WEN Fushuan, *et al.* Economic and environmental dispatching in electric vehicles embedded virtual power plants with participation in carbon trading[J]. **Electric Power Construction**, 2017, 38(9): 45-52.
- [8] LIU Z Y, ZHENG W M, QI F, *et al.* Optimal dispatch of a virtual power plant considering demand response and carbon trading[J]. **Energies**, 2018, 11(6): 1488.
- [9] 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.
- [10] 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.
- ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, *et al.* Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. **Power System Protection and Control**, 2020, 48(24): 154-163.
- [11] 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.
- ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, *et al.* Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(6): 1675-1683.
- [12] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. **电网技术**, 2021, 45(9): 3534-3545.
- SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, *et al.* Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(9): 3534-3545.
- [13] 仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. **电网技术**, 2020, 44(9): 3424-3432.
- ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, *et al.* W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(9): 3424-3432.
- [14] 周任军, 邓子昂, 徐健, 等. 碳捕集燃气热电机组碳循环及其虚拟电厂优化运行[J]. **中国电力**, 2020, 53(9): 166-171.
- ZHOU Renjun, DENG Ziang, XU Jian, *et al.* Optimized operation using carbon recycling for benefit of virtual power plant with carbon capture and gas thermal power[J]. **Electric Power**, 2020, 53(9): 166-171.
- [15] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电一气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. **电力系统自动化**, 2016, 40(15): 9-16.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, *et al.* Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2016, 40(15): 9-16.
- [16] 王琦, 李宁, 顾欣, 等. 考虑碳减排的综合能源服务商合作运行优化策略[J]. **电力系统自动化**, 2022, 46(7): 131-140.
- WANG Qi, LI Ning, GU Xin, *et al.* Optimization strategy for cooperative operation of integrated energy service providers considering carbon emission reduction[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(7): 131-140.
- [17] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(3): 10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, *et al.* Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(3): 10-17.
- [18] LI Y, YANG Z, LI G Q, *et al.* Optimal scheduling of an isolated microgrid with battery storage considering load and renewable generation uncertainties[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2019, 66(2): 1565-1575.
- [19] 夏鹏, 刘文颖, 蔡万通, 等. 基于风电离散化概率序列的机会约束规划优化调度方法[J]. **电工技术学报**, 2018, 33(21): 5069-5079.
- XIA Peng, LIU Wenying, CAI Wantong, *et al.* Optimal scheduling method of chance constrained programming based on discrete wind power probability

- sequences[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2018, 33(21): 5069-5079.
- [20] 蒋向兵, 汤波, 余光正, 等. 面向新能源就地消纳的园区储能与电价协调优化方法[J]. **电力系统自动化**, 2022, 46(5): 51-64.
- JIANG Xiangbing, TANG Bo, YU Guangzheng, *et al.* Coordination and optimization method of park-level energy storage and electricity price for local accommodation of renewable energy[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(5): 51-64.
- [21] LI Y, HAN M, YANG Z, *et al.* Coordinating flexible demand response and renewable uncertainties for scheduling of community integrated energy systems with an electric vehicle charging station: A Bi-level approach[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2021, 12(4): 2321-2331.
- [22] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. **电力自动化设备**, 2018, 38(7): 61-67.
- ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, *et al.* Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2018, 38(7): 61-67.
- [23] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. **高压技术**, 2021, 47(9): 3094-3106.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, *et al.* Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. **High Voltage Engineering**, 2021, 47(9): 3094-3106.
- [24] 林楷东, 陈泽兴, 张勇军, 等. 含 P2G 的电—气互联网络风电消纳与逐次线性低碳经济调度[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(21): 23-33.
- LIN Kaidong, CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, *et al.* Wind power accommodation and successive linear low-carbon economic dispatch of integrated electricity-gas network with power to gas[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(21): 23-33.
- [25] 高山, 邹子卿, 刘宇. 考虑多类型需求响应负荷的热电联供系统协调优化运行[J]. **电力建设**, 2019, 40(10): 9-17.
- GAO Shan, ZOU Ziqing, LIU Yu. Coordination and optimization of combined heat and power system considering multi-type demand-response load[J]. **Electric Power Construction**, 2019, 40(10): 9-17.

(本文编辑:孙伟)