

计及源荷不确定性及阶梯型碳交易的虚拟电厂优化调度方法

孙启宸, 王志杨, 曹国强, 杨志, 胡祥谢, 黎舜瑶

贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年12月7日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月6日

摘要

在风光等清洁能源渗透率及能源低碳化需求不断提高的背景下, 如何精确模拟新能源出力不确定性及引导负荷侧柔性资源参与需求响应显得尤为重要。针对上述问题, 本文提出一种计及源荷不确定性及阶梯型碳交易的虚拟电厂优化调度模型。首先, 源侧基于Frank-Copula函数建立风光出力联合概率分布模型, 采样约简得风光出力典型场景。其次, 在多能耦合虚拟电厂中引入碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)设备, 降低碳排放, 荷侧建立考虑柔性用户用能满意度的需求响应模型, 以提升风光消纳。同时, 引入阶梯型碳交易机制, 建立源荷协同优化及低碳性改造的VPP日前优化调度模型。然后, 采用梯形隶属度函数将多目标优化问题模糊化为单目标优化问题, 调用CPLEX求解器求解。最后, 通过算例分析验证本文方法的有效性。

关键词

虚拟电厂, 源荷不确定性, Frank-Copula函数, 碳捕集与封存, 用户满意度; 阶梯型碳交易, 优化调度

Optimal Scheduling of Virtual Power Plants Accounting for Source Load Uncertainty and Stepped Carbon Trading

Qichen Sun, Zhiyang Wang, Guoqiang Cao, Zhi Yang, Xiangxie Hu, Shunyu Li

School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Dec. 7th, 2024; accepted: Dec. 30th, 2024; published: Jan. 6th, 2025

Abstract

In the context of increasing penetration of clean energy sources such as wind and solar power and

文章引用: 孙启宸, 王志杨, 曹国强, 杨志, 胡祥谢, 黎舜瑶. 计及源荷不确定性及阶梯型碳交易的虚拟电厂优化调度方法[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 50-64. DOI: 10.12677/mos.2025.141006

the demand for decarbonization of energy sources, it is particularly important to accurately simulate the uncertainty of new energy output and guide the load-side flexible resources to participate in demand response. To address the above issues, this paper proposes an optimal scheduling model for virtual power plants that takes into account the source-load uncertainty and stepwise carbon trading. First, the source side establishes a joint probability distribution model of wind and solar power based on the Frank-Copula function, and samples the typical scenarios of wind and solar power. Second, carbon capture and storage (CCS) equipment is introduced into the multi-energy coupled virtual power plant to reduce carbon emissions, and a demand response model is established on the load side that takes into account the energy satisfaction of the flexible users to enhance wind and solar power consumption. At the same time, a stepwise carbon trading mechanism is introduced to establish a VPP day-ahead optimal scheduling model for source-load cooperative optimization and low-carbon transformation. Then, the multi-objective optimization problem is blurred into a single-objective optimization problem by using the trapezoidal affiliation function, and the CPLEX solver is invoked to solve the problem. Finally, the effectiveness of the method in this paper is verified by case analysis.

Keywords

Virtual Power Plant, Source Load Uncertainty, Frank-Copula Function, Carbon Capture and Storage, Customer Satisfaction, Laddered Carbon Trading, Optimized Scheduling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三北地区因其丰富的风光资源成为中国新能源发展的先行区。然而，随着风光等新能源并网比例的不断增加，现有以热电联产机组(combined heat and power, CHP)为主的能源结构调节能力逐渐不足，无法有效处理新能源大规模并网所带来的波动性[1][2]，导致新能源利用率不高，尤其是弃风、弃光现象十分严重。为提高新能源利用率，目前许多研究侧重于引入诸如储能设备、电转气、燃气轮机等分布式能源[3][4]，以增加系统调节的灵活性，从而促进风光的可靠消纳。然而，随着分布式电源应用的普及，系统规模日益复杂化，这导致了调度目标增多和优化速度减缓等问题逐渐凸显出来[5]。

虚拟电厂作为一种基于先进信息通信技术的能源管理系统，能够聚合、协调各类分布式能源资源，有效应对新能源大规模并网所带来的复杂性及低碳化调度问题[6][7]。文献[8]定义组合电热储能、电动汽车、替代型负荷、空调集群为广义储能系统，根据其响应特性分别参与 VPP 日前、日中、实时阶段调度优化，以优化 VPP 运行成本，提升供能稳定性，该文未考虑需求响应资源的挖掘。文献[9]考虑源侧多种能源与负荷需求响应的协调配合，综合 VPP 经济性、环保性建立 VPP 多目标优化调度模型，利用法线边界交叉法将多目标优化问题转化为单目标后，运用自适应免疫遗传算法优化求解，说明源荷协同调度在可再生能源消纳、运行成本优化、减少环境污染方面的优势，该文未考虑用户满意度对需求响应的影响。且上述文献均未考虑风光出力不确定性对调度结果的影响。

目前多数文献采用场景生成与削减法缓解风光不确定性对 VPP 调度结果的影响，文献[10]建立风光出力概率模型，采用场景生成与削减法生成典型出力场景，在 VPP 经济调度模型中引入碳交易及超额惩罚因子，以降低系统碳排放，优化求解得各场景下 VPP 调度结果，该文未考虑风光出力相关性，风光出力场景精度不佳。文献[11]基于核密度估计及 Copula 理论生成风光出力场景，建立多能互补微网优化配

置模型并调用智能算法求解，降低系统运行成本的同时优化了能源利用率，但该文未充分挖掘系统的低碳潜力。

采用碳交易机制将碳配额作为商品购售能够有效激励 VPP 各主体降低碳排放，并以此获得额外收入。文献[12]采用碳排放流衡量各电能产销者间供/用能特性，引导系统中储能及需求响应等灵活性资源实现高效利用，进而通过碳交易实现上层配电网与下层产消者的低碳经济运行，但未考虑碳排放的梯级效应。文献[13]构建风光出力不确定集，建立考虑碳交易的电-热综合能源系统鲁棒优化调度模型，碳交易机制既减少系统的碳排放，又有效克服鲁棒调度方案的保守性。文献[14]根据各类发电机组碳排放特性构建碳交易费用模型，实现碳排放额度的再分配，构建考虑不同发电机组碳权交易的日前经济调度模型。然而，上文均未考虑碳排放阶梯效应，不利于充分挖掘系统低碳潜力。

为解决上述问题，本文首先在源侧采用 Frank-Copula 函数衡量风光出力间相关性，建立风光联合概率分布模型，逆采样后约简场景得风光出力典型场景。然后，在 VPP 中引入 CCS、电转气(power to gas, P2G)设备，结合荷侧计及用户用能满意度的需求响应模型，同时考虑阶梯型碳交易机制建立 VPP 日前多场景优化调度模型，并采用梯形隶属度函数对目标模糊化后调用 CPLEX 求解器解得 VPP 日前调度结果。最后，通过算例分析验证所提模型的合理性和优越性。

2. 多能耦合虚拟电厂调度运行机理

本文选取同区域风电场、光伏电站、CHP 机组、P2G 设备、CCS 设备、燃气轮机、柔性负荷聚合为 VPP，其调度运行机理如图 1 所示。

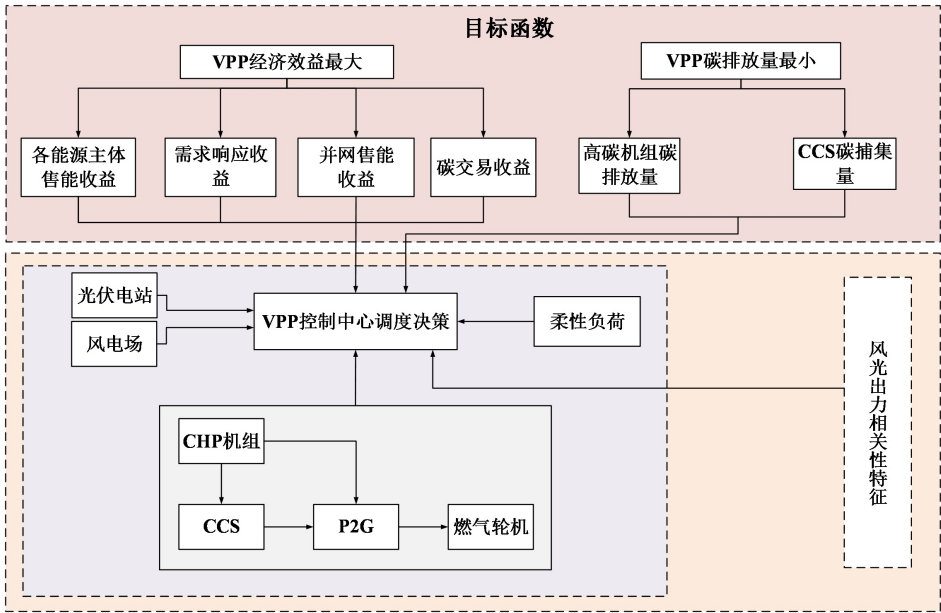


Figure 1. Mechanisms of scheduling and operation of a multi-energy coupled virtual power plant
图 1. 多能耦合 VPP 调度运行机理

其中，CHP 机组出力易调节，但由于 CHP 机组“以热定电”导致 CHP 机组电出力受系统热负荷限制，无法实时调整以提升系统风光消纳。因此，采用 CCS 设备实时捕集 CHP 机组产生的 CO₂，并引入 P2G 装置利用捕集所得 CO₂ 制取甲烷，供给燃气轮机产热、产电，实现能源的循环利用，上述设备运行所需电能均来自于 CHP 机组，拓宽 CHP 机组运行域，大幅提升 CHP 机组的电热调节能力，CHP 在场景

h 下 t 时段电出力 $P_{c,t}^h$ 的划分如式(1)所示。

$$P_{c,t}^h = P_{c1,t}^h + P_{c2,t}^h + P_{c3,t}^h \quad (1)$$

式中, $P_{c1,t}^h$ 表示向电网售电功率; $P_{c2,t}^h$ 表示 P2G 消耗电功率; $P_{c3,t}^h$ 表示 CCS 消耗电功率。

P2G 产气功率与消耗电功率的关系如式(2)所示; P2G 运行所需 CO₂ 量 $E_{cc,t}^h$ 如式(3)所示。

$$P_{g,t}^h = \mu P_{c2,t}^h \quad (2)$$

$$E_{cc,t}^h = \nu P_{c2,t}^h \quad (3)$$

式(2)、(3)中, μ 表示 P2G 的电气转换效率; ν 表示 CO₂ 量换算系数。

本文采用燃烧后 CCS, 在 CO₂ 即时捕集的过程中消耗电能。场景 h 下 t 时段 CCS 电耗与 CO₂ 捕集量的关系式如式(4)所示。

$$P_{c3,t}^h = \theta E_{cc,t}^h \quad (4)$$

式中, θ 表示 CCS 能耗转换系数。

而柔性负荷通过多种因素引导用户转移、削减负荷, 协同可控机组及源侧风光资源参与调度, 以提升调度运行低碳性, 提升 VPP 经济效益。

2.1. 考虑相关性的风光场景生成

在同一区域内, 风电和光伏发电出力呈显著的相关性关系, 但由于风光发电机组结构不同、出力特性存在差异, 导致其在时间和空间尺度上的相关性较为复杂。与其他相关性模型相比, Copula 函数在风光出力特征统计方面具有较为卓越的性能, 能够精确描述风光出力间的相关关系[15]。因此, 本文采用 Copula 理论结合风光出力的边缘分布函数构成计及相关特性的风光联合分布函数, 实现风光不确定性的精确建模。但不同类型的 Copula 函数具有不同的尾部特征, 只有选取合适类型的 Copula 函数实现风光出力非线性特征的精确捕捉[16]。Frank-Copula 函数对于非对称性风光出力数据及尾部建模具有较强的灵活性, 能够精确捕捉极端情况下风光出力相关性; 此外, 自由度参数作为 Frank-Copula 函数的一个关键参数, 能够自由调整以适应时序变化的风光相关性特征。综上所述, 本文采用 Frank-Copula 函数衡量风光出力间相关性。

单一参数的二元 Frank-Copula 函数的分布函数如式(5)所示。

$$C(\alpha_t, \beta_t; \chi_t) = -\frac{1}{\chi_t} \ln \left(1 + \frac{(e^{-\chi_t \alpha_t} - 1)(e^{-\beta_t \alpha_t} - 1)}{e^{-\chi_t} - 1} \right) \quad (5)$$

式中, α_t 、 β_t 、 χ_t 均为自由度参数。

本文场景生成流程如下。

1) 根据风光出力历史数据(采样间隔为 1 h)运用高斯核密度估计建立风光出力的概率密度函数如式(6)所示。

$$\begin{cases} f_{s,t}(y_t) = \frac{1}{ns} \sum_{d=1}^n K\left(\frac{y_t - Y_{d,t}}{s}\right) \\ f_{s,t}(z_t) = \frac{1}{ns} \sum_{d=1}^n K\left(\frac{z_t - Z_{d,t}}{s}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中, s 表示窗宽; $Y_{d,t}$ 表示第 d 日 t 时段风电出力; $Z_{d,t}$ 表示第 d 日 t 时段光伏出力; $K(\cdot)$ 表示高斯核

函数。

2) 将二元 Frank-Copula 函数与风光边缘分布函数得风光出力联合概率分布函数如式(7)所示

$$f(y_t, z_t) = \frac{-\lambda_t (e^{-\lambda_t} - 1) e^{-\lambda_t (\alpha_t + \beta_t)} f(y_t) f(z_t)}{\left[(e^{-\lambda_t} - 1) + (e^{-\lambda_t \alpha_t} - 1) (e^{-\lambda_t \beta_t} - 1) \right]^2} \quad (7)$$

3) 分别对各时段联合概率分布函数进行多次连续蒙特卡洛逆采样得日风光出力场景, 本文连续 1000 次。

4) 为在不影响场景生成结果的同时, 提升运算效率, 采用 Calinski-Harabasz 指数获得最优聚类数后结合 K-means 聚类约简得风光出力典型场景。

2.2. 目标函数

本文以 24 h 一个调度周期内所有场景下 VPP 经济效益最大化期望、碳排放量最小化期望为目标函数, 构建 VPP 低碳经济调度模型。目标函数如式(8)所示:

$$\begin{cases} F_1 = \max \sum_{h=1}^H \tau_h \sum_{t=1}^T \left(C_{sell,t}^h - C_{cpc,t}^h - C_{ctr,t}^h \right) \\ F_2 = \min \sum_{h=1}^H \tau_h \sum_{t=1}^T \left(E_{cc,t}^h \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, F_1 为所有场景下 VPP 一个调度周期内收益的期望最大化目标, F_2 为所有场景下 VPP 一个调度周期内碳排放量的期望最小化目标, τ_h 表示场景 h 发生的概率; (8)式中其余项如下:

2.2.1. $C_{sell,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段 VPP 售能收益

$$\begin{aligned} C_{sell,t}^h = & a(t) \left(P_{w,t}^h + P_{s,t}^h + P_{c1,t}^h + P_{mt,t}^h - P_{cw,t}^h - P_{cs,t}^h \right) \\ & + b(t) \left(H_{c,t}^h + H_{mt,t}^h \right) + c(t) \left(P_{g,t}^h + P_{gs,t}^h - P_{mts,t}^h \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $a(t)$ 、 $b(t)$ 、 $c(t)$ 分别表示 t 时段 VPP 售电、售热、售气价格; 在场景 h 下 t 时段, $P_{w,t}^h$ 、 $P_{s,t}^h$ 表示风电、光伏实际出力, $P_{mt,t}^h$ 表示燃气轮机出力, $P_{cw,t}^h$ 、 $P_{cs,t}^h$ 表示弃风、弃光功率, $H_{c,t}^h$ 表示 CHP 售热功率, $H_{mt,t}^h$ 表示燃气轮机售热功率, $P_{gs,t}^h$ 表示气源出力, $P_{mts,t}^h$ 表示燃气轮机耗气功率。

2.2.2. $C_{cpc,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段含 P2G、CCS 的 CHP 机组运行成本

$$\begin{aligned} C_{ops,t}^h = & a_1 \left(P_{c1,t}^h + P_{c2,t}^h + P_{c3,t}^h + C_{w1} H_{c,t}^h \right) \\ & + b_1 \left(P_{c1,t}^h + P_{c2,t}^h + P_{c3,t}^h + C_{w1} H_{c,t}^h \right)^2 + c_1 P_{c2,t}^h + d_1 P_{c3,t}^h + e_1 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 均为 CHP 机组运行成本系数; C_{w1} 表示 CHP 最小出力对应热电转换系数。

2.2.3. $C_{ctr,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段碳交易成本

$$\begin{cases} E_{0,t}^h = d \left(P_{c,t}^h + P_{mt,t}^h + P_{w,t}^h + P_{s,t}^h \right) \\ C_{ctr,t}^h = e \left(E_{c,t}^h - E_{0,t}^h \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中, d 表示单位功率的碳排放配额系数; e 表示碳交易价格; 在场景 h 下 t 时段, $E_{c,t}^h$ 表示 VPP 碳排放量, $E_{0,t}^h$ 表示 VPP 碳排放配额, 具体表达式见本文 2.5 节。

2.2.4. $C_{mt,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段燃气轮机运行成本

$$\begin{cases} P_{mt,t}^h = \gamma_{mt} P_{mts,t}^h \\ H_{mt,t}^h = \gamma_r \gamma_h \frac{P_{mt,t}^h (1 - \gamma_{mt} - \gamma_l)}{\gamma_{mt}} \\ C_{mt,t}^h = \eta_m P_{mt,t}^h \end{cases} \quad (12)$$

式中, γ_{mt} 表示转换系数; γ_r 表示热损失系数; γ_h 表示制热系数; γ_l 表示烟气余热回收率; η_m 表示燃气轮机运行成本系数。

2.2.5. $C_{cw,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段弃风惩罚成本

$$C_{cw,t}^h = \eta_{cw} P_{cw,t}^h \quad (13)$$

式中, η_{cw} 表示弃风惩罚成本系数。

2.2.6. $C_{cs,t}^h$ 为场景 h 下 t 时段弃光惩罚成本

$$C_{cs,t}^h = \eta_{cs} P_{cs,t}^h \quad (14)$$

式中, η_{cs} 表示弃光惩罚成本系数。

2.3. 约束条件

2.3.1. 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{w,t}^h + P_{s,t}^h + P_{c1,t}^h + P_{mt,t}^h = P_{load,t}^h \\ H_{c,t}^h + H_{mt,t}^h = H_{load,t}^h \\ P_{g,t}^h + P_{gs,t}^h = P_{mts,t}^h + P_{gload,t}^h \end{cases} \quad (16)$$

式中, 在场景 h 下 t 时段, $P_{load,t}^h$ 、 $H_{load,t}^h$ 、 $P_{gload,t}^h$ 分别表示电、热、气负荷。

2.3.2. 功率上下限约束

$$\begin{cases} P_{j,\min} \leq P_{j,t}^h \leq P_{j,\max} \\ H_{j,\min} \leq H_{j,t}^h \leq H_{j,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中, 在场景 h 下 t 时段, $P_{j,t}^h$ 、 $H_{j,t}^h$ 表示第 j 种机组电、热功率, $P_{j,\min}$ 、 $P_{j,\max}$ 表示第 j 种机组电功率下限、上限, $H_{j,\min}$ 、 $H_{j,\max}$ 表示第 j 种机组热功率下限、上限。

2.3.3. 爬坡约束

$$u_{j,\min} \leq P_{j,t}^h - P_{j,t-1}^h \leq u_{j,\max} \quad (18)$$

式中, $u_{j,\min}$ 、 $u_{j,\max}$ 表示第 j 种机组爬坡功率最小值、最大值; 在场景 h 下 t 、 $t-1$ 时段, $P_{j,t}^h$ 、 $P_{j,t-1}^h$ 表示第 j 种机组功率。

2.3.4. 含 P2G、CCS 的 CHP 售电功率约束

$$\begin{aligned} \max & \left\{ P_{c1,\min} - C_{w1} H_{c,t}^h, C_w^* \right. \\ & \left. (H_{c,t}^h - H_{c0}) - P_{c2,\max} - P_{c3,\max} \right\} \\ & \leq P_{c1,t}^h \leq P_{c1,\max} - C_{w2} H_{c,t}^h - P_{c2,\min} - P_{c3,\min} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $P_{c1,\min}$ 、 $P_{c1,\max}$ 表示 CHP 机组最小、最大售电功率; $P_{c2,\min}$ 、 $P_{c2,\max}$ 表示 P2G 消耗电功率最小、最

大值； $P_{c3,min}$ 、 $P_{c3,max}$ 表示 CCS 耗电功率最小、最大值； H_{c0} 表示 CHP 机组产热功率最小值； C_w 表示 CHP 机组热电转换系数； C_w 表示最大出力对应的热电转换系数。

2.4. 负荷需求响应不确定性模型

相较于激励型需求响应，价格型需求响应机制赋予用户更大的灵活性、自主性，用户侧柔性负荷可以根据实时供能价格，自主决策用能时间及用能方式[17]。因此，本文分别针对电、气、热负荷，建立用户需求响应及用能满意度模型，以调整调度周期内 VPP 各类负荷出力，提升系统能效。

2.4.1. 电、气负荷需求响应与满意度模型

本文电、气负荷均基于电价型需求响应，以电负荷为例，电量 - 电价弹性关系模型如式(20)所示。

$$\begin{cases} r_{e,ii}^h = \frac{\Delta P_{load,i}^h}{P_{load,i}^h} \left(\frac{\Delta p_{e,i}^h}{p_{e,i}^h} \right)^{-1} \\ r_{e,ij}^h = \frac{\Delta P_{load,i}^h}{P_{load,i}^h} \left(\frac{\Delta p_{e,j}^h}{p_{e,j}^h} \right)^{-1} \\ \Delta P_{load,i}^h = \sum_{j=1}^{24} r_{e,ij}^h \times \frac{\Delta p_{e,j}^h}{p_{e,j}^h} \times P_{load,i}^h \end{cases} \quad (20)$$

式中，在场景 h 下， $r_{e,ii}^h$ 表示电价自弹性系数， $r_{e,ij}^h$ 表示电价交叉弹性系数， $\Delta p_{e,i}^h$ 、 $p_{e,i}^h$ 表示 i 时段电价变化量、电价， $\Delta p_{e,j}^h$ 、 $p_{e,j}^h$ 表示 j 时段电价变化量、电价， $\Delta P_{load,i}^h$ 、 $P_{load,i}^h$ 表示 i 时段负荷变化量、负荷需求量。

各时段供能价格的不同易导致不同用户主体转移用能类型、削减用能需求及转移用能时段，从而响应用户满意度。本文从用户用能方式满意度、用能费用满意度两个层面建立用户满意度模型。

在供能价格固定的情况下，用户根据用能需求、用能习惯制定用能计划，供能价格调整后用户用能计划随之改变，造成用户用能方式满意度降低。由此以电负荷为例，建立用户用能方式满意度模型如式(21)所示。

$$W_e^h = 1 - \sum_{i=1}^{24} \left| P_{load1,i}^h - P_{load,i}^h \right| / \sum_{i=1}^{24} P_{load,i}^h \quad (21)$$

式中， W_e^h 表示场景 h 下用户用电方式满意度； $P_{load1,i}^h$ 表示场景 h 下 i 时段供能价格调整后用户用电量。

实时供能价格调整后用户并不会完全随之调整用能量，若用户未根据实时供能价格进行响应，则其用能成本提高，用户对于用能费用的满意度降低。由此以电负荷为例，建立用户用电费用满意度模型如式(22)所示。

$$M_e^h = 1 - \sum_{i=1}^{24} \left(p_{e1,i}^h P_{load1,i}^h - p_{e,i}^h P_{load,i}^h \right) / \sum_{i=1}^{24} p_{e,i}^h P_{load,i}^h \quad (22)$$

式中， M_e^h 表示场景 h 下用户用电费用满意度； $p_{e1,i}^h$ 表示调整后的电价。

2.4.2. 热负荷需求响应与满意度模型

建筑结构、绝缘材料和热容性等因素导致热能在建筑中的传递通常比电能慢，同时人体对于热感知具有模糊性。因此，温度的短期、小幅度变化不会导致热负荷的大幅改变，本文综合考虑建筑室内温度、供暖功率、环境温度之间的关系，建立热负荷需求响应模型如式(23)所示。

$$\begin{cases} T_{in,t+1} = T_{in,t} e^{-\Delta t/\xi} + (R \times Q_t + T_{out,t})(1 - e^{-\Delta t/\xi}) \\ \xi = R \times C_a \end{cases} \quad (23)$$

式中, $T_{in,t}$ 、 $T_{out,t}$ 表示 t 时段室内、室外温度; R 表示建筑物等效热阻; Q_t 表示 t 时段建筑热功率; C_a 为建筑物室内热容。

根据人体舒适度温度区间, 建筑室温需满足以下约束:

$$T_{\min} \leq T_{in,t} \leq T_{\max} \quad (24)$$

式中, $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 表示舒适度范围内室内温度最小值、最大值。

人体对于温度变化并没有很高的敏感度, 因此, 在一定范围内调整热负荷并不会显著改变用户对周围温度的感知。本文使用预测平均感受评分(predicted mean vote, PMV)来量化用户对热负荷调整的满意度。各 PMV 值对应用户感受如表 1 所示。

Table 1. User perceptions corresponding to each PMV value
表 1. 各 PMV 值所对应的用户感受

PMV 值	用户感受
$PMV \leq -3$	冷
$-3 < PMV \leq -1$	微冷
$-1 < PMV < 1$	舒适
$1 \leq PMV < 3$	微热
$3 \leq PMV$	热

PMV 指标与室内温度的计算公式如式(25)所示。

$$\begin{cases} PMV = \begin{cases} 0.4065(26 - T), T < 26 \\ 0.3895(T - 26), T \geq 26 \end{cases} \\ N_h = 1 - |PMV| \end{cases} \quad (25)$$

式中, N_h 表示用户热满意度。

2.4.3. 负荷需求响应后新增目标函数、约束条件

电、热、气供应价格调整后, 部分用户选择在特定时段削减负荷从而提升其用能满意度。因此, 本文各类负荷的削减量, 在 2.2 节优化目标 F_1 中引入削减补偿成本 $C_{oc,t}^h$ 。

$$C_{oc,t}^h = \sigma_e P_{ec,t}^h + \sigma_g P_{gc,t}^h + \sigma_h P_{hc,t}^h \quad (26)$$

式中, σ_e 、 σ_g 、 σ_h 表示电、气、热削减负荷补偿系数; 在场景 h 下 t 时段, $P_{ec,t}^h$ 、 $P_{gc,t}^h$ 、 $P_{hc,t}^h$ 表示电、气、热削减负荷量。

需求响应建立在满足最低满意度的基础上。因此, 本文在 2.3 节约束条件的基础上新增用户满意度约束 U_k 满足式(27)。

$$U_k \geq U_{\min,k} \quad (27)$$

式中, U_k 表示第 k 类负荷满意度; $U_{\min,k}$ 表示第 k 类负荷满意度最小值。

2.5. 阶梯型碳交易模型

有关部门通过发电企业实际发电情况配置碳排放配额, 旨在通过市场机制激励企业减少碳排放, 使

碳排放较少的企业能够出售其未使用的配额以获取经济收益，而碳排放较多的企业则需要购买额外的配额来满足其排放需求[18]。采用阶梯型碳交易能够实现各企业碳排放价格的梯级划分，促进高碳企业减少碳排放[19]。

2.5.1. 各机组碳排放配额模型

本文根据发电机组特性分别构建碳配额模型如式(28)所示。

$$E_{0,t}^h = \alpha_1 (P_{w,t}^h + P_{s,t}^h) + \alpha_2 (P_{c,t}^h + H_{c,t}^h) + \alpha_3 P_{mt,t}^h \quad (28)$$

$E_{0,t}^h$ 表示场景 h 下 t 时段碳排放配额； α_1 表示风、光清洁能源单位供能消耗； α_2 、 α_3 分别表示 CHP 机组、燃气轮机单位供能消耗。

2.5.2. 实际碳排放模型

本文 CHP 机组碳排放部分经 CCS 装置燃烧后捕集，再引入 P2G 装置电解水制取氢气，通过 H_2 与 CO_2 化学反应制取 CH_4 等天然气替代品在满足燃气轮机能耗需求的同时，又排放一定量的 CO_2 。实际碳排放如式(29)所示。

$$E_{c,t}^h = a_2 (P_{c,t}^h + C_{w1} H_{c,t}^h) + b_2 (P_{c,t}^h + C_{w1} H_{c,t}^h)^2 + c_2 - \nu P_{c2,t}^h + \omega P_{mt,t}^h \quad (29)$$

式中， ω 表示燃气轮机排放系数。

2.5.3. 阶梯型碳交易模型

阶梯型碳交易机制能够有效降低 VPP 中高碳机组碳排放成本，优化系统资源配置并促进可再生能源的整合利用。本文阶梯型碳交易模型如式(30)所示。

$$e = \begin{cases} \psi E_{c,t}^h, E_{c,t}^h \leq l \\ \psi(1+\zeta)(E_{c,t}^h - l) + \psi l, l \leq E_{c,t}^h \leq 2l \\ \psi(1+2\zeta)(E_{c,t}^h - 2l) + \psi(2+\zeta)l, 2l \leq E_{c,t}^h \leq 3l \\ \psi(1+3\zeta)(E_{c,t}^h - 3l) + \psi(3+3\zeta)l, 3l \leq E_{c,t}^h \leq 4l \\ \psi(1+4\zeta)(E_{c,t}^h - 4l) + \psi(4+6\zeta)l, E_{c,t}^h > 4l \end{cases} \quad (30)$$

式中， ψ 表示碳交易基础价格； l 表示碳排放区间长度； ζ 表示碳交易价格增长率。

3. 多目标的模糊化分析

隶属度函数模型的建立及求解

针对 VPP 经济效益最大化、碳排放量最小化两优化目标，通常采用加权和法将其加权求和转化为单目标优化问题。然而，根据主观经验难以选择最优权重；此外，由于加权和法通常假设优化目标间存在线性关系，难以适应本文优化目标，易导致优化结果不符合实际。因此，本文根据实际经验分别选取升、降半梯形隶属度函数对两优化目标进行模糊化处理，并采用最大最小满意度指标法定义决策满意度单一优化目标。升降半梯形隶属度函数如图 2 所示。

分析图 2 可知，隶属度函数变化量与决策者满意度呈正比关系。本文两优化目标所对应的隶属度函数如式(31)、(32)所示。

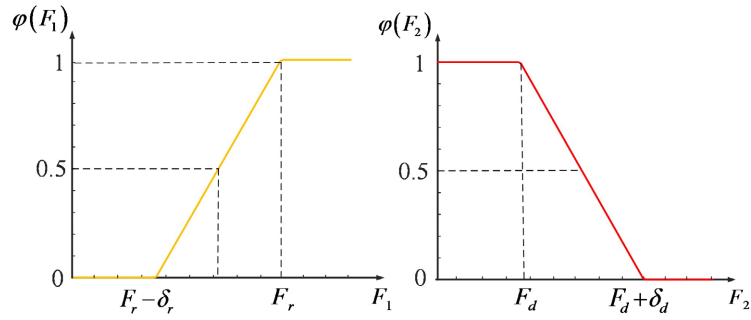


Figure 2. Plot of elevated semi-trapezoidal affiliation function
图 2. 升降半梯形隶属度函数图

$$\varphi(F_1) = \begin{cases} 0, & F_1 \leq F_r - \delta_r \\ \frac{F_1 - F_r + \delta_r}{\delta_r}, & F_r - \delta_r < F_1 \leq F_r \\ 1, & F_1 > F_r \end{cases} \quad (31)$$

$$\varphi(F_2) = \begin{cases} 1, & F_2 \leq F_d \\ \frac{F_d - F_2 + \delta_d}{\delta_d}, & F_d < F_2 \leq F_d + \delta_d \\ 0, & F_2 > F_d + \delta_d \end{cases} \quad (32)$$

式(31)、(32)中, F_r 表示 VPP 收益的最大可能值; δ_r 表示 VPP 调度决策中心允许 VPP 收益减小值; F_d 表示 VPP 碳排放量的最小可能值; δ_d 表示 VPP 调度决策中心允许 VPP 碳排放量增加值。以两目标中隶属度函数较小者作为决策主体, 定义决策满意度指标如式(33)所示。

$$\varphi = \min\{\varphi(F_1), \varphi(F_2)\} \quad (33)$$

将满意度指标最大化作为优化目标, 改进后目标函数及约束条件如式(34)所示。

$$\begin{cases} \max \varphi \\ -F_1 + \delta_r \varphi \leq -F_r + \delta_r \\ F_2 + \delta_d \varphi \leq F_d + \delta_d \\ 0 \leq \varphi \leq 1 \end{cases} \quad (34)$$

将上述改进目标函数及约束条件引入本文 VPP 日前调度模型中, 调用 CPLEX 求解器进行优化求解, 能够兼顾 VPP 调度决策在低碳性、经济性方面的优势, 使调度结果更具参考价值。

4. 算例分析

4.1. 系统构成及算例参数

本文 VPP 日前优化调度周期为一天 24 h, VPP 中供能机组装机容量如下: CHP 机组 3*15 MW、风电机组 40*2 MW、光伏电站 10*3 MW、燃气轮机 3*5 MW。选取我国浙江某地风光场站年实测数据进行场景分析。部分发电机组参数如表 2 所示, 表中数据均参考自文献[20]。售能价格及余机组参数见文献[21], 柔性负荷占总负荷的 $\pm 10\%$ 。本文调度模型经隶属度函数模糊化后在 Matlab 仿真平台调用 CPLEX 求解器求解。

Table 2. Genset parameters
表 2. 发电机组参数

参数	数值	参数	数值
$P_{c,min}(MW)$	20	$P_{c,max}(MW)$	45
$P_{c2,min}(MW)$	0	$P_{c2,max}(MW)$	15
$P_{c3,min}(MW)$	0	$P_{c3,max}(MW)$	15
$H_{c,min}(MW)$	0	$H_{c,min}(MW)$	30
$H_{c0}(MW)$	5	$P_{gs,min}(MW)$	0
$P_{gs,max}(MW)$	30	$P_{mt,min}(MW)$	5
$P_{mt,max}(MW)$	15	μ	0.55
ν	1.02	θ	0.6
$a_1(USD/MW)$	13.29	$b_1(USD/MW^2)$	0.004
$c_1(USD/MW)$	22	$d_1(USD/MW)$	22
$e_1(USD/MW)$	39	$e(USD/MW)$	30

4.2. 计及相关性的风光场景生成结果

采用本文 2.1 节所述场景生成方法生成各风光场景概率及出力情况如图 3 所示。分析图 3 可知，风光出力场景的波动呈差异波动态势，波动趋势一致或相关，说明本文场景生成方法能够有效衡量风光出力时序波动间的相关性。

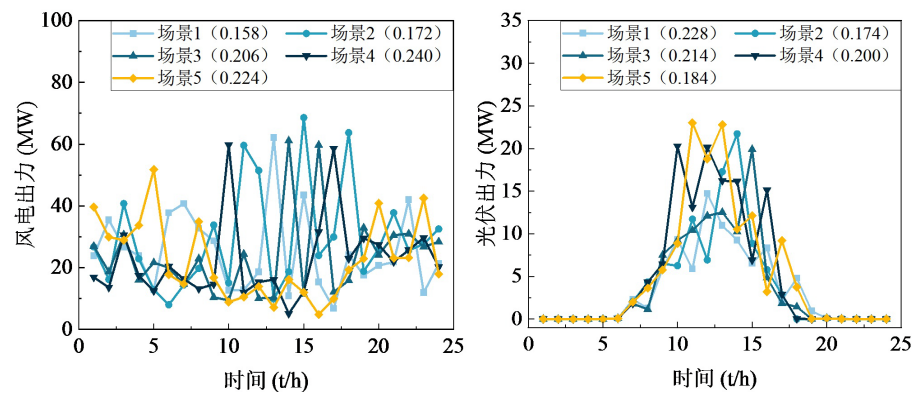


Figure 3. Wind and solar scenario generation results
图 3. 风光场景生成结果

4.3. 需求响应前后 VPP 优化调度结果分析

调整实时供能价格后，各类用户用能满意度也随之改变，导致各类型用户参与需求响应以调整用能需求，需求响应前后负荷分布如图 4 所示。分析图 4 可知，调整实时供能价格能够有效引导峰时段负荷转移至谷时段，同时削减部分时段负荷需求，从而提升 VPP 各机组及设备的调度运行效率；相较于需求响应前负荷，需求响应后电、热、气负荷峰谷差分别下降 15.66%、24.83%、30.67%，在峰谷值附近，需求响应效果明显，有利于供能机组调度运行计划的调整。

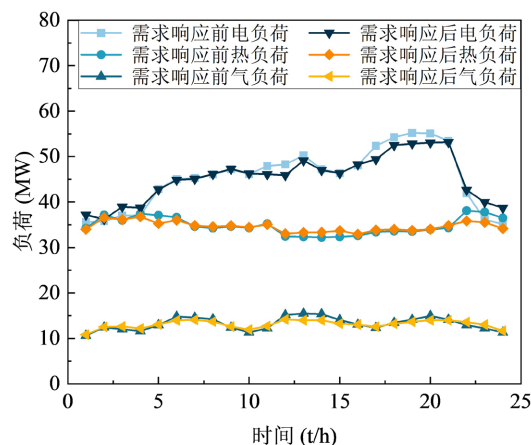


Figure 4. Load distribution before and after demand response

图 4. 需求响应前后负荷分布情况

负荷需求的改变引起发电机组响应调度需求进而调整发电量,同时引起 P2G、CCS 功率变化,需求响应前后 VPP 机组出力结果分别如图 5、图 6 所示,VPP 优化调度结果如表 3 所示。

分析图 5、图 6 可知,在 0~6 h 光伏出力为 0,风电出力较大,各类负荷参与需求响应导致 CHP 机组出力小幅提升,在实现风电全额消纳的同时满足电热负荷需求;7~9 h、13~16 h 光伏出力较大,但风光出力仍无法满足系统电负荷需求,CHP 机组出力有所提高,仅少量负荷参与需求响应,需求响应前后机组出力无较大变化;10~12 h 需求响应导致电负荷大幅下降,弃风弃光量基本不变,CHP 产电多用于 CCS、P2G 设备捕碳,利用捕集的 CO_2 生产甲烷供给燃气轮机,促进能源资源的循环利用;17~21 h 需求响应后电负荷需求降低且波动平滑,CHP 机组优先满足 P2G、CCS 的用能需求,CHP 机组售电量大幅降低,提升系统调度运行的低碳特性;22~24 h 电负荷需求显著提高,有效提升 VPP 风电消纳。综上所述,本文需求响应模型及优化调度策略能够实现源荷间的良好互动,以兼顾 VPP 调度运行过程的低碳经济特性。

分析表 3 可知,参与需求响应虽在用能层面降低用户满意度,但通过补偿策略及用户自身用能结构的调整,在有效提升用户整体满意度的同时,使 VPP 风光消纳率分别提升 1.71%、2.77%,提升清洁能源利用效率;通过负荷时移的方式,提高碳捕集效率,使得一个调度周期内 VPP 碳捕集量提高 2.4 t,碳排放量降低 11.57 t,经济效益提高 4100.63 元,提升 VPP 调度运行的低碳经济效益。

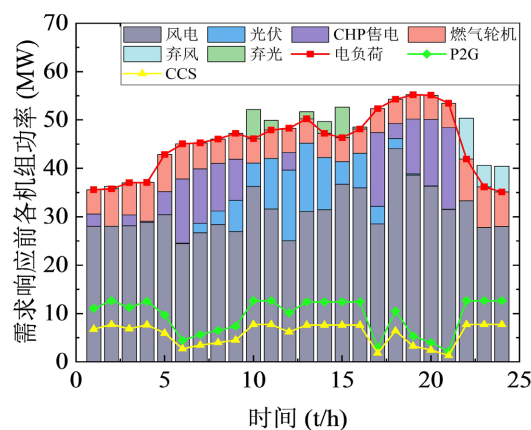


Figure 5. VPP units' output results before demand response

图 5. 需求响应前 VPP 各机组出力结果

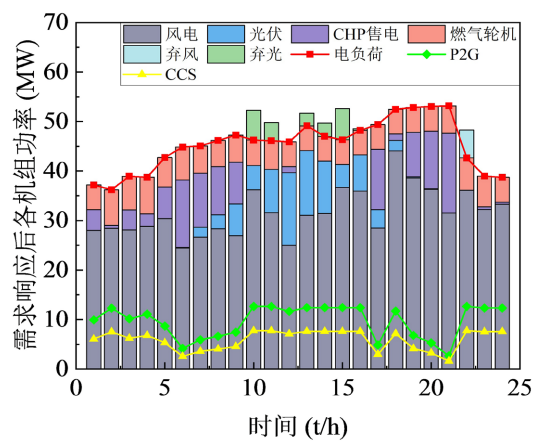


Figure 6. VPP units' output results after demand response
图 6. 需求响应后 VPP 各机组出力结果

Table 3. VPP optimized scheduling results before and after demand response
表 3. 需求响应前后 VPP 优化调度结果

需求响应	用户满意度	风光消纳率		VPP 碳捕集量/t	VPP 碳排放量/t	VPP 经济收益/元
		风电消纳率/%	光伏消纳率/%			
前	1	97.56	79.06	233.74	927.67	427348.45
后	1.158	99.27	81.83	236.14	916.10	431449.08

4.4. 风光相关性对 VPP 优化调度结果的影响

为验证本文 Frank-Copula 函数衡量风光相关性对于场景生成及 VPP 调度结果的影响，分别设置 2 组优化调度情景进行求解分析：

- 1) 基于本文方法生成风光场景及调度模型；
- 2) 保持风光相对独立生成场景及调度模型。

以上情景 VPP 优化调度结果对比如表 4 所示。分析表 4 可知，基于本文方法生成场景所得的 VPP 调度结果，其风光消纳率、VPP 碳捕集量、碳排放量、经济效益均优于传统方法所得结果，这是因为 Frank-Copula 函数能够精确模拟风光出力间的相关性，降低风光单独出力的波动性影响，从而提升调度运行过程的风光消纳，提升 VPP 的低碳经济特性。

Table 4. VPP optimized scheduling results for each scenario
表 4. 各情景 VPP 优化调度结果

情景	风光消纳率		VPP 碳捕集量/t	VPP 碳排放量/t	VPP 经济收益/元
	风电消纳率/%	光伏消纳率/%			
1	99.27	81.83	236.14	916.10	431449.08
2	84.18	72.32	211.23	983.25	398951.82

5. 结论

本文针对风光出力的不确定性问题及新能源消纳问题，通过 Copula 函数及其相关原理生成场景，实

现风光出力特征的精确模拟, 并通过碳捕集技术及综合需求响应实现源荷双侧资源的低碳、经济优化, 结合本文内容及算例分析得到如下结论:

1) 相较于未考虑风光出力相关性的场景生成方法, 本文基于 Frank-Copula 函数的风光场景生成方法能有效捕捉风光出力的相关性波动特征, 提升场景生成精度, 将生成场景代入参与调度能有效提升风光消纳率, 优化系统低碳经济调度结果。

2) 本文所提计及用户满意度的电、气、热需求响应模型能够通过荷侧需求响应有效调节源侧机组出力, 在提升风光消纳的同时控制高碳机组、碳捕集及电转气设备出力, 降低 VPP 碳排放量, 提升 VPP 经济效益。

3) 本文所提基于梯形隶属度函数的多目标模糊化及最大最小满意度指标法能够解决求解器无法求解多目标问题的缺陷, 所得结果能够有效兼顾经济、低碳两优化目标。

参考文献

- [1] 李家珏, 李平, 王刚, 张潇桐, 张涛, 李垚. 计及弃风消纳的热电联产系统的日前调度模型[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 295-301.
- [2] 周伟, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 61-73.
- [3] 骆钊, 罗蒙顺, 沈鑫, 等. 基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 22-30.
- [4] 赵振宇, 李忻薪. 基于阶梯碳交易的碳捕集电厂-电转气虚拟电厂低碳经济调度[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 769-780.
- [5] Rahimi, M., et al. (2022) Two-Stage Interval Scheduling of Virtual Power Plant in Day-Ahead and Real-Time Markets Considering Compressed Air Energy Storage Wind Turbine. *Journal of Energy Storage*, 45, Article ID: 103599. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103599>
- [6] 王佳惠, 牛玉广, 陈玥, 杜鸣. 电-碳联合市场下虚拟电厂主从博弈优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 235-242.
- [7] 李翔宇, 赵冬梅. 分散架构下多虚拟电厂分布式协同优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1852-1863.
- [8] 王瑞东, 吴杰康, 蔡志宏, 等. 含广义储能虚拟电厂电-气-热三阶段协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1857-1868.
- [9] 袁桂丽, 贾新潮, 陈少梁, 董金凤. 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.
- [10] 税纪钧, 彭道刚, 宋炎侃, 等. 计及风光不确定性含碳排放和碳惩罚的虚拟电厂优化调度策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 305-319. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0840>
- [11] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 朱彬若. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133-141.
- [12] 张妍, 冷媛, 尚楠, 等. 考虑碳排放需求响应及碳交易的电力系统双层优化调度[J/OL]. 电力建设, 2024: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20240126.1802.021.html>, 2024-03-28.
- [13] 李欣, 陈英彰, 李涵文, 等. 考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J/OL]. 电力建设, 2024: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20240103.1347.004.html>, 2024-03-28.
- [14] 魏伟, 等. 考虑碳排放配额和碳交易的新能源电力系统日前优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 130-136.
- [15] 孙鑫, 魏文荣, 李琼林, 等. 计及不确定性的风储联合系统多时间尺度市场参与策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 18-25.
- [16] 刘蓉晖, 王乐凯, 孙改平, 赵增凯, 林顺富. 考虑不确定性的风-光-储合作联盟参与含需求响应的主辅联合市场的竞价交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 96-107.
- [17] 王金浩, 樊瑞, 肖莹, 贺丹, 韩肖清, 李伊竹林. 基于低碳需求响应的新型电力系统中源-网-荷-储协调的优化调度[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1): 46-56.
- [18] 任宇路, 程昱舒, 王书姝, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的负荷侧灵活响应优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023: 1-10. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001379>, 2024-03-28.
- [19] 刘睿捷, 包哲静, 林振智. 考虑双层奖惩型碳交易机制的源网荷分布协同低碳经济调度[J]. 电力系统自动化,

- 2023: 1-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231228.0016.002.html>, 2024-03-28.
- [20] 骆钊, 王菁慧, 王华, 赵伟杰, 杨林燕, 沈鑫. 考虑碳捕集和电转气的综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 127-134.
- [21] 袁桂丽, 钟飞, 张睿, 周彤. 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): 4458-4467.