

考虑P2G碳源管理的电碳耦合虚拟电厂优化研究

王文静

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年6月15日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月20日

摘要

本文针对虚拟电厂管理中电转气系统用碳来源的优化问题,以最大化虚拟电厂整体经济收益为优化目标,构建了考虑不同碳源比例的优化模型。通过对比各个方案的求解结果,并构建关键指标以对比不同碳源比例下碳排放量 and 经济收益的变化情况,为虚拟电厂系统的碳源管理和碳排放量管理提供参考,实现了虚拟电厂在最大化经济收益的情况下响应碳减排目标。

关键词

虚拟电厂, 碳交易, P2G, 用碳管理

Optimal Research on Electricity-Carbon Coupled Virtual Power Plants Considering P2G Carbon Source Management

Wenjing Wang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: June 15, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 20, 2026

Abstract

This paper addresses the optimization of carbon sources for power-to-gas systems in virtual power plant management. Taking the maximum overall economic benefit of virtual power plants as the optimization objective, an optimization model considering different proportions of carbon sources is established. By comparing the calculation results of various schemes, key indicators are formulated to analyze the variations in carbon emissions and economic benefits under different carbon source

ratios. The findings provide references for carbon source and carbon emission management of virtual power plant systems, enabling virtual power plants to meet carbon emission reduction targets while maximizing economic benefits.

Keywords

Virtual Power Plant, Carbon Trading, Power to Gas (P2G), Carbon Source Management

Copyright © 2026 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

随着“双碳”目标的提出，意味着中国各行业将面临前所未有的挑战和变革，其中电力行业首当其冲。电力行业作为能源生产和消费的主要领域之一，且在能源结构中占据重要地位，电力市场的碳排放量占全国总排放量的较大比例，也因此面临着巨大的减排压力，需要在技术、管理和政策等多方面进行创新和突破[1]。

在此背景下，作为新型电力系统重要组成部分的虚拟电厂，其重要性日益凸显。虚拟电厂通过整合分布式能源资源，实现能源的高效利用和灵活调度，为电力系统的稳定运行提供有力支持，而要实现低碳甚至零碳运行，虚拟电厂需要在运行过程中充分考虑碳排放问题。

碳交易市场的建立为电力行业减排提供了市场化的手段，也为虚拟电厂的低碳转型带来新的机遇和挑战[2]。碳交易机制通过为碳排放设定价格，激励企业减少碳排放，推动整个行业的低碳发展。电力企业可通过碳交易调节碳排放，使得碳交易成本成为虚拟电厂需考虑的重要成本因素，与传统的燃料成本、设备维护成本等并列，虚拟电厂需要在满足电力供应需求的同时，合理规划碳排放配额，优化碳交易策略，以降低碳交易成本，提高经济效益[3]。

在政策和市场层面进行积极改进和引导的情况下，虚拟电厂自身也应该充分考虑技术层面的创新和改进。作为虚拟电厂优化的一个重要组成部分，电转气系统(Power to Gas, P2G)是实现电能与化学能相互转换的关键技术[4]。主要包含电解水制氢(Power to Hydrogen, P2H)和电解水制甲烷(Power to Methane, P2M)两种技术路径。核心步骤，P2H是将电网中过剩的可再生电力通过电解水制取成为氢气；P2M是再通过氢气与二氧化碳反应结合，生成甲烷气体。相比之下，甲烷比氢气更易储存、稳定性更高，可直接注入天然气管网或就近利用，因此本文中的 P2G 系统是指 P2M 技术，聚焦电转气过程中甲烷化路径下的虚拟电厂系统的优化问题。

然而在 P2G 消耗二氧化碳制取甲烷这一过程中，目前论文学术研究中二氧化碳来源主要有两种，一是采用自身碳捕集系统捕集到火力发电、燃气发电等非清洁能源发电机组产生的二氧化碳，即自身捕集碳[5]。二是采用外购碳，通过市场交易获取工业用二氧化碳，但如何选择二氧化碳来源以及如何配置不同来源的二氧化碳比例仍是需要探讨的问题。

2. 文献综述

目前，已有研究在考虑碳交易和 P2G 的虚拟电厂成本优化领域取得了一定成果，诸多研究通过引入碳捕集设备，联合 P2G 装置实现虚拟电厂的内部循环，也有部分研究考虑 P2G 设备的甲烷产出，为虚拟电厂的经济收益带来帮助，通过各种手段，为虚拟电厂实现成本优化与碳减排的双重目标作出了贡献。

(1) 碳捕集联合 P2G, 消纳捕集碳[6]。薛太林等人提出了在碳交易机制下 P2G 和碳捕集耦合的热电联产虚拟电厂低碳优化调度。构建了含新能源、P2G、碳捕集装置的虚拟电厂模型, 引入碳交易、燃气掺氢机制, 建立以净收益最大化为目标的优化模型。通过设置普通虚拟电厂、含碳交易虚拟电厂、P2G 耦合碳捕集的虚拟电厂三类场景对比验证。验证结果表明 P2G 消纳夜间富余风电, 在碳捕集作用下形成内部碳循环, 碳排放减少, 总收益有所提升, 兼顾低碳性、经济性与冬季供热保障, 为高比例新能源下虚拟电厂低碳调度提供技术参考。但由于全部依赖捕集碳以形成内部碳循环, 限制了 P2G 设备的高效运行, 且碳来源单一, 不利于 P2G 系统的稳定运行。

(2) 考虑外购碳的补充作用, 维持 P2G 运行[7]。石梦舒等人关注绿氢背景下电转气综合效益, 细化电解水制氢与甲烷化两阶段运行, 构建了含可再生能源、燃气轮机、碳捕集及 P2G 的综合能源系统。考虑混合模式碳源设定, 优先捕集燃气轮机排放的 CO_2 供给 P2G 甲烷化, 捕集量不足时从市场外购工业 CO_2 补足, 并单独核算外购碳成本。研究对比电转氢气与电转甲烷的经济、能源及环境效益。结果表明, 高可再生能源占比下电转氢气更优, 中高占比时电转氢气因碳捕集 + 外购碳协同减排、经济性更佳。且外购碳可灵活匹配氢产能, 提升 P2G 运行弹性, 为 P2G 碳源市场化应用提供参考。但文中外购碳仅作为被动补充项, 缺乏对按照一定比例主动参与 P2G 用碳过程的分析。

(3) 结合成本与碳排放量的双目标优化[8]。李逸超等人针对双碳背景下虚拟电厂碳排放偏高、新能源消纳困难等问题, 开展计及碳捕集与多能流的虚拟电厂多目标优化调度研究。文章引入阶梯型碳交易机制, 以系统运行成本最小、碳排放量最低为双目标搭建调度模型, 综合考虑火电、碳捕集、电转气、储能及冷热电负荷等单元运行约束。采用多目标樽海鞘群算法求解, 获取帕累托最优解集。通过设置多组对比场景仿真验证, 结果表明碳捕集与电转气协同运行可有效消纳风光富余出力、降低碳排放与系统运行成本。该研究为含碳捕集、电转气的多能流虚拟电厂低碳经济调度提供了可行参考。但文中未考虑 P2G 设备的用碳来源对整体碳排放量和成本的影响。

总体而言, 目前关于考虑 P2G 的虚拟电厂成本优化的论文中, 主要考虑自身碳捕集设备与 P2G 设备的结合, 在维持 P2G 运行的情况下实现内部碳循环。在此基础上部分文章考虑到了维持 P2G 稳定运行的问题, 通过引入外购碳实现系统的流畅运行, 利用外购碳弥补自身捕集碳不足对 P2G 运行产生的限制。但未考虑外购碳的主动参与, 即主动考虑对 P2G 所需二氧化碳的两种来源在不同比例关系下对虚拟电厂系统的影响。

3. 改进 P2G 系统用碳来源的模型构建

根据目前对虚拟电厂中 P2G 系统的相关研究, P2G 的用碳来源普遍来自虚拟电厂自身碳捕集所得碳, 然而, 碳捕集设备捕集量不足时, 会影响 P2G 设备的运行。部分研究考虑在此基础上引入外购碳, 可以维持 P2G 设备的运行, 同时可以充分运用碳捕集设备捕集碳, 但缺乏探讨在产生 P2G 系统的用碳需求时, 主动采用自身捕集碳和外购碳两种碳混合的情况下, 两种不同碳的比例变化对系统的经济收益和碳排放量影响。

本文以我国“双碳”目标为主要关注点, 所研究问题重点考虑虚拟电厂的经济收益, 考虑虚拟电厂在减少系统碳排放量和不降低系统净收益两个主要目标下, 对系统的 P2G 用碳来源进行分析[9]。即提出在考虑碳交易的虚拟电厂优化问题中, 对用于处理多余电力 P2G 系统的用碳来源进行分析改进, 考虑使用系统捕集碳的基础上, 加入不同比例外购碳, 实现 P2G 用碳的混合来源, 在此基础上研究不同碳源比例对虚拟电厂系统的经济收益和二氧化碳净排放量的影响。

3.1. 模型构建

本文所设虚拟电厂包含三个发电组分: 含碳捕集设备的火力发电机组、风力发电机组、光伏发电机

组, 其他部分包括 P2G 电转甲烷设备, 考虑化学电池储能方式, 并考虑阶梯式碳交易形式衡量碳排放量变化对系统经济收益的影响[10], 实现对碳排放量的控制。本文结合实际虚拟电厂系统的利益需求, 以经济收益最大化为最高优先级, 在利益最大化的基础上考虑相应的碳排放量, 相比考虑碳排放量和经济收益的双目标优化, 会存在为满足两个目标而牺牲一定利益的情况而言, 以单一经济收益为目标满足了虚拟电厂自身的利益最大化需求, 同时在单目标的情况下也引入了碳交易项实现对碳排放量的控制, 因此本文构建单目标函数如下:

$$\max F = (R_{CO_2} + R_{CH_4} + R_{LOAD} - C_G - C_{PV} - C_W - C_{ES} - C_{P2G} - C_{CCS} - C_{CO_2}) \quad (1)$$

其中:

(1) 火力发电成本 C_G :

$$C_G = \sum_{t=1}^T [aP_G^2(t) + bP_G(t) + c] \quad \forall t \in T \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 、代表含碳捕集的火力发电厂的成本系数; $P_G(t)$ 为 t 时段的火力发电输出功率; 其中 $T=24$ 。

(2) 风力发电成本 C_W :

$$C_W = \alpha_W \sum_{t=1}^T P_W(t) \quad \forall t \in T \quad (3)$$

式中, α_W 代表风力发电成本系数, $P_W(t)$ 代表 t 时段的风力发电输出功率。

(3) 光伏发电成本 C_{PV} :

$$C_{PV} = \alpha_{PV} \sum_{t=1}^T P_{PV}(t) \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中, α_{PV} 代表光伏发电成本系数, $P_{PV}(t)$ 代表 t 时段光伏发电的输出功率。

(4) 储能充放电成本 C_{ES} :

$$C_{ES} = \alpha_{ES} \cdot \sum_{t=1}^T |P_{ES}(t)| \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中, α_{ES} 代表储能装置的成本系数, $P_{ES}(t)$ 代表 t 时段储能装置的充放电功率。

(5) P2G 运行成本 C_{P2G} :

$$C_{P2G} = \alpha_{P2G} \sum_{t=1}^T P_{P2G}(t) \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中, α_{P2G} 代表 P2G 装置的运行成本系数, $P_{P2G}(t)$ 代表 t 时段 P2G 装置的运行功率。

(6) 碳储存成本 C_{CCS} :

$$C_{CCS} = \alpha_{CCS} \sum_{t=1}^T Q_{CCS}(t) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中, α_{CCS} 为储存单位 CO_2 的固定价格, $Q_{CCS}(t)$ 代表 t 时段储存的二氧化碳量。

(7) 购买二氧化碳成本 C_{CO_2} :

$$C_{CO_2} = \alpha_{buy} \sum_{t=1}^T E_{buy}(t) \quad \forall t \in T \quad (8)$$

式中, α_{buy} 为购买单位 CO_2 的固定价格, $E_{buy}(t)$ 代表 t 时段需要购买的二氧化碳量。

(8) 售电收入 R_{LOAD} :

$$R_{LOAD} = \sum_{t=1}^T P_{LOAD}(t) \cdot D_{LOAD}(t) \quad \forall t \in T \quad (9)$$

式中, $D_{LOAD}(t)$ 代表售电价格。

(9) 碳交易收入 R_{CO_2} :

$$R_{CO_2} = \begin{cases} \lambda \cdot (1+2\alpha) \cdot (E_{VPP} + 2d) - \lambda \cdot (2+\alpha) \cdot d & -3d \leq E_{VPP} \leq -2d \\ \lambda \cdot (1+\alpha) \cdot (E_{VPP} + d) - \lambda \cdot d & -2d \leq E_{VPP} \leq -d \\ \lambda \cdot E_{VPP} & -d \leq E_{VPP} \leq d \\ \lambda \cdot (1+\alpha) \cdot (E_{VPP} - d) + \lambda \cdot d & d \leq E_{VPP} \leq 2d \\ \lambda \cdot (1+2\alpha) \cdot (E_{VPP} - 2d) + \lambda \cdot (2+\alpha) \cdot d & 2d \leq E_{VPP} \leq 3d \end{cases} \quad (10)$$

式中, d 代表阶梯式碳交易的阶梯长度, λ 代表基础碳交易价格, α 代表价格上涨系数, E_{VPP} 代表虚拟电厂日内可以用于碳交易的额度[11]。

(10) 甲烷售卖收入 R_{CH_4} :

$$R_{CH_4} = M_{CH_4} \cdot D_{CH_4} \quad (11)$$

$$M_{CH_4} = \theta_{P2G} \cdot \sum_{t=1}^T P_{P2G}(t) \quad \forall t \in T \quad (12)$$

式中, D_{CH_4} 代表甲烷售卖价格, θ_{P2G} 代表单位 P2G 运行生产的甲烷。

3.2. 约束条件

(1) 电力系统功率平衡:

$$P_{LOAD}(t) + P_{CCS}(t) + P_{P2G}(t) = P_{PV}(t) + P_W(t) + P_G(t) + P_{ES}(t) \quad \forall t \in T \quad (13)$$

(2) 火力运行功率约束:

$$P_G(\min) \leq P_G(t) \leq P_G(\max) \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$|P_G(t) - P_G(t-1)| \leq R_G \quad \forall t \in T \quad (15)$$

式中, $P_G(\max)$ 和 $P_G(\min)$ 代表火力发电出力的上下限, R_G 代表火力爬坡效率。

(3) 储能装置充放电约束:

$$0 \leq P_{ESc}(t) \leq P_{ES}(\max) \cdot Y_{ESc}(t) \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$0 \leq P_{ESd}(t) \leq P_{ES}(\max) \cdot Y_{ESd}(t) \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$Y_{ESc}(t) + Y_{ESd}(t) \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$Y_{ESc}(t), Y_{ESd}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$P_{ESd}(t) - P_{ESc}(t) = P_{ES}(t) \quad \forall t \in T \quad (20)$$

式中, $P_{ESc}(t)$ 表示储能装置充电功率, $P_{ESd}(t)$ 表示储能装置放电功率, $P_{ES}(\max)$ 表示储能装置充放电的最大功率, $Y_{ESc}(t)$ 、 $Y_{ESd}(t)$ 表示储能充放电约束, 禁止同一时段同时充放电。

(4) P2G 设备的功率约束:

$$P_{P2G}(\min) \leq P_{P2G}(t) \leq P_{P2G}(\max) \quad \forall t \in T \quad (21)$$

$$|P_{P2G}(t) - P_{P2G}(t-1)| \leq R_{P2G} \quad \forall t \in T \quad (22)$$

式中, $P_{P2G}(\max)$ 和 $P_{P2G}(\min)$ 代表 P2G 设备的运行功率上下限, R_{P2G} 代表 P2G 设备的爬坡效率。

(5) 碳捕集运行耗电 P_{CCS} :

$$P_{CCS}(t) = P_B + P_R(t) \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$P_R(t) = \omega_C \cdot E_{CCS}(t) \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$E_{CCS}(t) = \beta_G \cdot E_G(t) \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$E_G(t) = \gamma_G \cdot P_G(t) \quad \forall t \in T \quad (26)$$

式中, $P_{CCS}(t)$ 代表碳捕集设备以电供能所需的能耗, P_B 是固定能耗, $P_R(t)$ 是 t 时段的耗能, $E_{CCS}(t)$ 是当前时段捕集的 CO_2 , $E_G(t)$ 是当前时段火力产生的 CO_2 , β_G 是碳捕集效率, γ_G 代表火力发电单位功率产生的二氧化碳量, ω_C 代表捕获单位二氧化碳的耗能。

(6) 二氧化碳来源:

$$Q_{CCS}(t) = Q_{CCS}(t-1) + E_{CCS}(t) - E_{P2G}(t) \quad \forall t > 1, t \in T \quad (27)$$

$$Q_{CCS}(t) = E_{CCS}(t) - E_{P2G}(t) \quad \forall t = 1 \quad (28)$$

$$E_{P2G}(t) = \beta \cdot P_{P2G}(t) \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$E_{buy}(t) = k \cdot E_{P2G}(t) \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$E_{stor}(t) = (1-k) \cdot E_{P2G}(t) \quad \forall t \in T \quad (31)$$

式中, $Q_{CCS}(t)$ 是 t 时段储存的二氧化碳量, $E_{CCS}(t)$ 是 t 时段捕集到的二氧化碳量, $E_{P2G}(t)$ 是 t 时段 P2G 系统消耗的二氧化碳量, β 是 P2G 单位功率消耗的二氧化碳量, k 指外购碳占比。

4. 数值实验

4.1. 实验设置

本文通过 MATLAB R2018b 软件进行建模和仿真。其中虚拟电厂系统包含 1 个火力发电厂结合碳捕集设备组成的碳捕集电厂、1 个风力发电机组、1 个光伏发电组。以及用于处理过剩能源的电转气系统 P2G, 以及储能装置, 同时, 考虑阶梯式碳排放权的交易, 实现利益最大化。

为了分析电转气系统采用不同比例外购碳与内部捕集碳对虚拟电厂经济收益和碳排放量的影响, 本文设置了 6 个不同的运行场景进行对比, 数据参考文献, 目的希望通过对比分析, 得出虚拟电厂的收益和碳排放变化影响因素, 对日后改善和提升虚拟电厂收益以及减少虚拟电厂碳排放量提供策略[12]。相关设置如下:

方案 1: 考虑 P2G 用碳全部来自碳捕集;

方案 2: 考虑 P2G 用碳 20%来自购买;

方案 3: 考虑 P2G 用碳 40%来自购买;

方案 4: 考虑 P2G 用碳 60%来自购买;

方案 5: 考虑 P2G 用碳 80%来自购买;

方案 6: 考虑 P2G 用碳全部来自购买;

本文售电收入的售电价格采用分时电价，具体电价设置和相应参数设置见表 1 和表 2。

Table 1. Electricity price configuration

表 1. 电价设置

时段	电价(单位: 元/MWh)
22:00~24:00; 0:00~6:00	300
6:00~9:00; 14:00~17:00; 20:00~22:00	400
9:00~14:00; 17:00~20:00	500

Table 2. System parameter configuration

表 2. 系统参数设置

参数	数值
火力发电燃料成本系数 a	0.02
火力发电燃料成本系数 b	6
火力发电燃料成本系数 c	140
碳捕集效率 β_G	0.9
碳捕集固定能耗 P_B (KW·h)	50
单位二氧化碳能耗 ω_C (MW·h/t)	0.269
风力发电成本系数 α_W (元/KW)	0.0296
光伏发电成本系数 α_{PV} (元/KW)	0.0096
电池充放电成本系数 α_{ES} (元/KW)	0.086
P2G 运行成本系数 α_{P2G} (元/KW·h)	0.1
P2G 设备运行功率上限 $P_{P2G}(\max)$ (MW)	40
P2G 设备运行功率下限 $P_{P2G}(\min)$ (MW)	0
P2G 设备产 CH ₄ 效率 θ_{P2G} (kg/MW)	42
火电机组爬坡效率 R_G (MW·h)	30
CH ₄ 售价 D_{CH_4} (元/kg)	4.18

4.2. 模型求解

基于外购 CO₂ 比例分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%的六组仿真结果，以经济效益、碳排放量两个角度为主要对照指标，系统分析外购 CO₂ 比例变化对含碳捕集和 P2G 的电碳耦合虚拟的电厂系统的运行特性的影响，表 3 为运行结果。

Table 3. Operational results of the plan

表 3. 方案运行结果

方案	净利润 F (元)	碳排放量 C (吨)
方案 1	654065.84	540.89
方案 2	650378.70	515.94
方案 3	647232.64	469.25

续表

方案 4	644959.64	454.37
方案 5	642842.97	454.22
方案 6	641124.60	428.78

从经济效益来看,系统净利润随外购 CO₂ 比例提升呈现持续单调下降趋势。在外购 CO₂ 比例为 0% 时,净利润达到最大值 654065.84 元;随着外购比例逐步提高至 100%,净利润下降至 641124.6 元,整体降幅约 12941.24 元。利润下降的主要原因在于,外购 CO₂ 产生了采购成本,使得系统整体收益被持续压缩。从下降幅度观察,0%到 40%区间内净利润下降相对明显,40%至 100%区间降幅逐步减少,说明随着外购二氧化碳比例提升,边际成本影响逐步减弱,系统成本结构趋于稳定。

从碳排放量来看,系统净碳排放随外购 CO₂ 比例升高持续降低,低碳效益显著提升。净排放量由 0% 时的 540.89 吨,逐步下降至 100%方案的 428.78 吨,总减排量达 112.11 吨,减排比例约 20.7%。碳排放下降主要原因是外购 CO₂ 进入 P2G 环节进行资源化利用,减少了系统对碳捕集自用的依赖,间接提升整体碳循环利用率。值得注意的是,60%与 80%方案净排放数值极为接近,分别为 454.37 吨和 454.22 吨,说明在此区间碳排放已进入平台期,继续提高外购比例对减排的贡献降低。

从经济与碳排放的整体关系分析。0%外购方案经济性最优,但碳排放最高,适用于无强制减排约束、以收益最大化为目标的场景;100%外购方案减排效果最好,但净利润最低,适用于有严格碳指标、需深度脱碳的场景。从外购碳比例从 0%到 100%变化的区间内,系统的碳排放量和经济收益均逐步减少,整体朝向以损失整体利益为代价,换取碳排放量减少的方向发展。为判断在这一阶段中,外购碳比例为 20%、40%、60%、80%、100%时具体的减排代价大小,计算指标 r 如下:

$$r = \frac{C - C_1}{F - F_1} \quad (32)$$

式中, C_1 表示方案 1 的系统碳排放量, F_1 表示方案 1 的系统净收益。通过计算其余五种方案在不同外购碳比例下的 r 取值,衡量各个方案的碳减排代价大小。 r 越大,表示牺牲单位经济收益,系统减少的二氧化碳量越大, r 越小,表示牺牲单位经济收益,系统减少的二氧化碳量越小。 r 指标计算结果见表 4。

Table 4. Calculation results of indicator r

表 4. r 指标计算结果

方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
r	-	0.68%	1.05%	0.95%	0.77%	0.87%

根据表 4 中 r 值计算结果,外购 40%的 CO₂ 方案一为最优平衡点,净利润相比 0%方案下降 6833.2 元,碳排放降低 71.64 吨,单位减排成本显著低于其他区间,以较小的经济损失换取了突出的减排收益,实现了经济性与低碳性的高效平衡。

从整体趋势与决策意义来看,外购 CO₂ 比例在 20%和 80%时,减排效率较低,损失利益比较大,为最差选择,因此在实际中不建议采用 20%和 80%的外购比例。在 40%外购碳比例时,减排效率相对高、经济损失相对可控,为最优选择;在和 60%和 100%的外购碳比例时,减排效率属于次高,为次优选择。

综合以上分析,外购 CO₂ 比例对系统经济与碳排放具有显著调控作用。在无碳减排需求和约束时,0%外购可实现利润最大化;在兼顾经济与低碳目标时,40%外购为全局最优方案;在强制深度减排场景

下,可选择 100%外购实现最低排放。该结果可为含碳捕集与 P2G 的综合能源系统优化运行、碳资源配置策略制定提供数据支撑与理论参考。

5. 总结

本文研究对包含碳捕集设备和 P2G 组分的电碳耦合虚拟电厂进行优化[13],考虑对 P2G 设备用碳来源进行分析,对两种碳来源:自身捕集碳和外购碳的不同比例组合进行对比,通过六个方案确定各个方案对系统的经济收益和碳排放量的影响,并根据经济收益和碳排放量的变化大小,构建指标确定经济利益损失下实现的碳排放量减少。

结果表明,在虚拟电厂的 P2G 系统用碳比例为 40%采用外购碳,60%采用自身捕集碳的情况下,经济利益损失了 6833.2 元,但碳排放降低了 71.64 吨,此时系统损失单位利益实现的碳排放量最大,此结果为碳减排目标下虚拟电厂的优化提供了参考。

未来的研究可向以下方向拓展:一是考虑掺氢燃气轮机促进对 P2G 中间产物氢气的消纳能力,二是考虑储能方式的多变对系统缓冲能力的影响。

参考文献

- [1] 杨梅,周喜超,陈鑫.“双碳”目标下考虑负荷时空弹性的虚拟电厂三层博弈鲁棒优化[J]. 智慧电力, 2026, 54(3): 100-107.
- [2] 田旭,张祥成,齐鑫,等. 考虑需求侧阶梯碳交易的虚拟电厂两阶段调度优化模型及效益分配策略[J]. 供用电, 2025, 42(8): 88-98.
- [3] Wang, P.C., Ge, Y., Yu, N., Lin, Q.Y., Chen, R.F. and Wang, J. (2023) Low-Carbon Optimal Dispatch of Virtual Power Plant Based on Time-Of-Use Ladder Carbon Emission Rights Exchange Mechanism. *Systems Science & Control Engineering*, **11**. <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2180688>
- [4] 卢志刚,师铨博,何良策,等. 基于碳捕集与封存-电转气-电解熔融盐协同的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3088-3103.
- [5] Wang, T., Jin, Y. and Li, Y. (2025) Optimization Scheduling of Carbon Capture Power Systems Considering Energy Storage Coordination and Dynamic Carbon Constraints. *Processes*, **13**, Article 1758. <https://doi.org/10.3390/pr13061758>
- [6] 薛太林,杨海翔,张海霞,等. 考虑 P2G 及碳捕集的热电联产虚拟电厂低碳优化调度[J]. 山东电力技术, 2024, 51(5): 1-8.
- [7] 石梦舒,宋志成,黄元生. 考虑绿氢制取和碳捕捉的电转气综合效益评价[J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 74-88.
- [8] 李逸超,胥栋,徐刚,等. 计及碳捕集和多能流的虚拟电厂多目标优化调度[J]. 浙江电力, 2023, 42(10): 34-44.
- [9] Yin, S., He, Y., Li, Z., Li, S., Wang, P. and Chen, Z. (2024) A Novel Multi-Timescale Optimal Scheduling Model for a Power-Gas Mutual Transformation Virtual Power Plant with Power-To-Gas Conversion and Comprehensive Demand Response. *Energies*, **17**, Article 3805. <https://doi.org/10.3390/en17153805>
- [10] 张文虎,李东浩,魏云冰. 考虑碳交易市场的电动汽车虚拟电厂优化策略[J]. 全球能源互联网, 2026, 9(1): 160-170.
- [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.
- [12] 黎博文. 计及碳捕集与 P2G 的综合能源系统优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [13] 金旭荣,尹江,杨国华,等. 计及风光不确定性的 CCS-P2G 耦合运行虚拟电厂优化调度[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(5): 1129-1141.