

# 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

孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 蒙锦辉

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西省 南昌市 330013)

## Optimization Scheduling of Virtual Power Plant With Carbon Capture and Waste Incineration Considering Power-to-gas Coordination

SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, MENG Jinhui

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, China)

**ABSTRACT:** In order to promote multi-energy complementation and low carbonization, an optimal scheduling model of virtual power plant (VPP) with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination is proposed. By introducing the collaborative utilization framework with a carbon capture plant-power to gas (P2G)-gas unit system, the CO<sub>2</sub> in the carbon capture can be used as the raw material of P2G, which produces natural gas to be supplied to the gas unit. In addition, the power consumption of the carbon capture and the flue gas treatment can be transferred through joint dispatching to smooth the fluctuation of renewable energy output, so that the wind power and photovoltaic can be indirectly dispatchable and flexibly utilized. In view of the high dimensional nonlinearity of the proposed optimization model and the difficulty in solving it, a new anti-cotangent compound differential evolution algorithm is designed to solve the model. The simulation results show that the proposed model and method can provide peak load shifting capacity and improve renewable energy consumption, effectively reducing the cost and carbon emission of VPP.

**KEY WORDS:** power-to-gas; carbon capture; waste incineration; optimization scheduling; compound differential evolution algorithm

**摘要:** 为了促进多能源互补及能源低碳化, 提出了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模型。通过

引入碳捕集电厂-电转气-燃气机组协同利用框架, 碳捕集的CO<sub>2</sub>可作为电转气原料, 生成的天然气则供应给燃气机组; 并通过联合调度将碳捕集能耗和烟气处理能耗进行负荷转移以平抑可再生能源波动, 使得风电/光伏实现间接可调度而被灵活利用。鉴于所建优化模型具有高维非线性特点, 求解难度大, 设计一种新型的反余切复合微分进化算法对模型进行求解。仿真结果表明, 所提出的模型和方法具备削峰填谷效用并能提升可再生能源消纳, 可有效降低虚拟电厂成本和碳排放量。

**关键词:** 电转气; 碳捕集; 垃圾焚烧; 优化调度; 复合微分进化算法

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1720

## 0 引言

随着化石能源使用引发的温室效应与能源枯竭问题的日益突出, 发展高比例可再生清洁能源网络已成为全球共识<sup>[1]</sup>。我国2019年弃风弃光电量分别达169亿和46亿kW·h, 电负荷的峰谷差由于风电并网被间接增大<sup>[2]</sup>, 针对此问题《电力发展“十三五”规划》指出, 多能互补是提高可再生能源消纳能力的重要手段<sup>[3]</sup>。目前, 如何提高可再生能源利用率以及增强相互间的耦合已经引起广泛研究。依托先进信息通信技术的虚拟电厂(virtual power plant, VPP)为多能源互联的综合能源网络灵活协调调度和管理提供了新思路<sup>[4]</sup>。VPP可聚合多种类型的分布式能源, 实现系统内部单元间协调调度以获得更好的经济和环保效益。作为未来重要的能源利用方案, VPP需面对高渗透率新能源并网的威胁, 亟需探求如何使得VPP运行经济低碳的同时, 兼顾平抑负荷波动并提升新能源消纳能力的途径。

电转气(power-to-gas, P2G)技术提供了一种新的能源转换和负荷时空平移的方式, 通过将难以消

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51867008); 江西省自然科学基金项目(20192ACBL20007, 20202BAB204024); 江西省主要学科学术和技术带头人项目(20204BCJL22038); 江西省教育厅科技项目(GJJ1903013); 江西省研究生创新基金项目(YC2019-S239)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51867008); Jiangxi Natural Science Foundation (20192ACBL20007, 20202BAB204024); Jiangxi Academic and Technical Leader Project (20204BCJL22038); Jiangxi Education Science Research Foundation (GJJ1903013); Jiangxi Innovate Foundation of Graduate (YC2019-S239).

纳的风电光伏转换成容易存储的天然气,实现可再生清洁能源消纳以及电力负荷削峰填谷。目前对P2G的研究主要在耦合电-气能源网络,提高风光消纳能力和系统运行灵活性等方面。文献[4]通过构建含P2G单元的VPP电气热协调优化调度模型,算例表明P2G可提升系统调度灵活性以及经济性。文献[5-6]介绍了P2G的工作原理以及性能,并在经济维度进行评估。文献[7]提出含P2G的热电耦合区域综合能源优化调度模型,提升经济性和能源利用率。然而,现有文献对P2G原料CO<sub>2</sub>的来源及成本等问题的研究相对较少。而碳捕集电厂(carbon capture power plant, CCPP)可作为优良的供应新途径为其提供CO<sub>2</sub>原料,其由燃煤火电厂经过碳捕集技术改造而成,可显著降低碳排放水平,通过控制碳捕集能耗,可作为可时移、可调节负荷功率,使得碳捕集电厂具有运行灵活、出力调整快速的特质,相较于传统火电厂调节能力更强,在降低碳排放的同时,可灵活配合VPP中各单元协调优化和再生新能源的出力变化。文献[8-9]构建了电转气-碳捕集电厂(P2G-carbon capture power plant, P2G-CCPP)系统框架,利用碳捕集电厂捕集的CO<sub>2</sub>给予P2G装置作为电转气原料。文献[10]以碳捕集电厂和梯级水电作为可控发电单元,降低了碳排放,但未对捕集后的碳封存进行研究。目前对于P2G-CCPP的研究主要集中在电气互联系统,极少涉及电、气、热能源系统,未实现电、气、热多能源间协调优化调度。

另一方面,垃圾焚烧电厂近年来在国家政策引导下快速发展,其在发电方面有着减量化、无害化和资源化的特点,具有巨大潜力,但焚烧产生的烟气需净化处理后方可排放,烟气处理系统能耗大约占总发电量的1/4,加装储气装置后可解耦发电环节与烟气处理环节两者关系,从而可将烟气处理负荷进行时段转移,作为主动可控负荷参与协调调度,拥有类似可控负荷在时段和数量上的调度灵活性。在面对大规模可再生能源并网需要其他调峰配合电源的形势下,相较于其他传统的发电单元,具有节能潜力大和可调控空间广的优势<sup>[11-12]</sup>。现有文献对VPP的研究主要以产生大量碳排放的化石燃料机组作为可控发电单元,极少涉及以碳捕集电厂和垃圾焚烧电厂等环境友好型可控发电单元的综合调度形式,且目前研究极少涉及P2G运行成本对虚拟电厂优化调度的影响。

综上所述,本文在现有研究的基础上,建立了碳交易市场下的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模型,对所建VPP模型进

行深入研究,主要包括:在VPP中引入碳捕集-P2G-燃气机组协同运行框架,利用P2G实现碳捕集量再利用,从而降低捕集后的碳封存成本和P2G原料成本,充分挖掘协同运行潜能以实现更优的运行效益;在VPP内碳捕集、垃圾焚烧和风-光联合调度运行,利用不同电源的能量资源在能量/功率上的时空互补性,由此充分挖掘各单元间的互补潜能;以碳捕集电厂和垃圾焚烧电厂为可控单元,优化能源结构。依据上述方法为基础,以净成本最小建立优化调度模型。鉴于该模型具有高维非线性的特点,求解运算难度大,常规智能优化算法存在进化后期多样性大幅降低、易早熟等问题。本文通过将反余切函数特性与复合微分进化(compound differential evolution, CDE)算法相结合,提出新型的反余切复合微分进化(arcot compound differential evolution, ACDE)算法对模型进行求解,算例验证了所提策略和模型的可行性和优越性。

## 1 计及P2G协同的含碳捕集和垃圾焚烧VPP结构和基本原理

本文所提出的VPP系统构成如图1所示,其中包含有可灵活调控发电单元(火电机组和垃圾焚烧电厂)、不可调控发电单元(风电和光伏)、P2G装置、碳捕集系统、垃圾焚烧电厂的储气装置、电储能和热储能。电负荷由可中断负荷(interruptible load, IL)和固定负荷组成,切断IL时需按中断等级给予用户补偿费用<sup>[13]</sup>。燃气机组由热电联产(combined heat and power, CHP)机组和燃气锅炉组成,热负荷由两者协调提供。

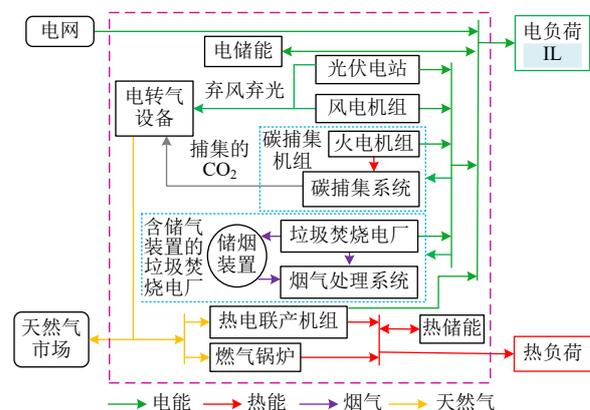


图1 VPP系统构成

Fig. 1 Composition diagram of VPP system

除CHP机组外,各发电机组都可以向碳捕集系统和烟气处理系统提供能耗,通过加装储气装置,使得烟气处理与发电关系解耦,利用不同能量资源在能量/功率上的时空互补性,调度优化上更为灵活地配合可再生能源的出力变化和平抑净负荷

波动。各单元的协同运行调度指令依靠能量管理系统采集数据信息后预测出的能量市场电价、可再生能源出力和电热负荷来制定<sup>[13]</sup>。

## 2 计及 P2G 协同的含碳捕集和垃圾焚烧 VPP 调度模型

### 2.1 CCPP-P2G-燃气机组子系统

现有 VPP 文献涉及碳捕集电厂-P2G 系统框架的较少，且未有涉及参与燃气供热的综合调度。因此，本文将碳捕集电厂、P2G 和燃气机组聚合为碳捕集-电转气-燃气机组供热(CCPP-P2G-燃气机组)系统，将 CCPP 捕集的 CO<sub>2</sub> 作为优质原料提供给 P2G 装置，利用 P2G 消纳弃风弃光生成天然气提供给燃气机组，P2G 生成天然气量和燃气机组天然气需求量的差值参与到天然气市场。CCPP-P2G-燃气供热系统不仅可减少捕集 CO<sub>2</sub> 后的封存成本，还可将弃风弃光转化成天然气储存于天然气网络，减少 CHP 机组和燃气锅炉的购气成本，具有削峰填谷效应，实现了负荷的时空转移。框架如图 2 所示。

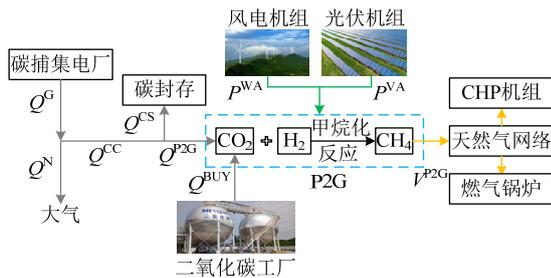


图 2 CCPP-P2G-燃气供热系统框架

Fig. 2 CCPP-P2G-gas heating system framework

图中： $Q^G$  为碳捕集电厂产生的 CO<sub>2</sub> 量； $Q^N$  为碳捕集电厂净 CO<sub>2</sub> 排放量； $Q^{CC}$  为碳捕集电厂捕集的 CO<sub>2</sub> 量； $Q^{CS}$  为封存的 CO<sub>2</sub> 量； $Q^{P2G}$  为捕集到的 CO<sub>2</sub> 中给 P2G 设备利用的量； $Q^{BUY}$  为捕集 CO<sub>2</sub> 量不够 P2G 设备使用时从外界购买的 CO<sub>2</sub> 量； $P^{WA}$ 、 $P^{VA}$  分别为弃风和弃光功率。其中 CO<sub>2</sub> 单位为 t； $V^{P2G}$  为 P2G 设备生成的天然气量，单位为 m<sup>3</sup>。

#### 2.1.1 CCPP-P2G 系统能耗及 CCPP 出力

碳捕集总能耗由碳捕集系统的再生塔和压缩机消耗的再生热能和压缩电能组成，其中再生热能从碳捕集电厂锅炉中抽取一定量的蒸汽来获取<sup>[1]</sup>。CCPP-P2G 系统中的 CCPP 和 P2G 的设备能耗由参与联合调度运行的机组提供，CCPP-P2G 系统能耗及 CCPP 出力表达式<sup>[8]</sup>如下

$$P_t^{C-P} = P_t^{P2G} + P_t^{CC} \quad (1)$$

$$P_t^{P2G} = P_t^{WA} + P_t^{VA} \quad (2)$$

$$P_t^{CC} = P^A + P_t^{OP} \quad (3)$$

$$P_t^{GN} = P_t^G - P_t^{GC} - P_t^{Ga} \quad (4)$$

式中： $P_t^{C-P}$  为  $t$  时段 CCPP-P2G 系统总能耗； $P_t^{P2G}$  为  $t$  时段 P2G 设备能耗(该功率由弃风弃光提供从而实现消纳弃风弃光)； $P_t^{WA}$ 、 $P_t^{VA}$  分别为  $t$  时段弃风和弃光功率； $P_t^{CC}$ 、 $P_t^{OP}$ 、 $P_t^{GN}$ 、 $P_t^G$ 、 $P_t^{GC}$ 、 $P_t^{Ga}$  分别为  $t$  时段碳捕集能耗、碳捕集运行能耗、碳捕集电厂净出力、碳捕集电厂等效出力、碳捕集电厂提供的碳捕集能耗和烟气处理能耗； $P^A$  为 CCPP-P2G 系统能耗(因占比较少视为定值)，MW。

#### 2.1.2 CCPP-P2G 系统碳利用率及天然气生成量

碳捕集电厂捕集的 CO<sub>2</sub> 总量  $Q^{CC}$  中， $Q^{P2G}$  部分作为 P2G 设备的原材料， $Q^N$  部分直接排入大气。 $t$  时段 CCPP-P2G 系统捕集的 CO<sub>2</sub> 量表达式如下

$$Q_t^{CC} = \frac{P_t^{OP}}{w^C} \quad (5)$$

式中  $w^C$  为碳捕集电厂处理单位 CO<sub>2</sub> 的运行能耗，MW·h/t。

P2G 设备在  $t$  时段消耗的 CO<sub>2</sub> 总量  $Q_t^{P2G, sum}$  表达式<sup>[14]</sup>如下

$$Q_t^{P2G, sum} = \alpha^{CO_2} \eta^{P2G} P_t^{P2G} \quad (6)$$

式中： $\alpha^{CO_2}$  为生成单位功率天然气时需要 CO<sub>2</sub> 的量，t/(MW·h)； $\eta^{P2G}$  为 P2G 设备电转气的转换效率。 $t$  时段 P2G 生成天然气的体积  $V_t^{P2G}$  表达式<sup>[8]</sup>如下

$$V_t^{P2G} = \frac{3.6 \eta^{P2G} P_t^{P2G}}{H^g} \quad (7)$$

式中  $H^g$  为天然气的热值，取 39MJ/m<sup>3</sup>。

### 2.2 垃圾焚烧电厂烟气处理模型

在垃圾焚烧电厂的烟气处理系统中，反应塔通过处理经由排烟管道和储气装置进入的烟气，使得烟气中的污染气体去除后方可排放。引入储气装置可通过调节烟气进入反应塔和储气装置的烟气分流比实现烟气处理与发电之间的解耦，且由于烟气处理能耗较大，使得加装储气装置后的烟气处理能耗可视为可时移、可调节负荷功率。通过控制烟气处理时段，灵活配合 VPP 中各单元进行协调优化，使得 VPP 整体调度变得更为灵活，其结构如图 3 所示。烟气处理系统能耗<sup>[11-12]</sup>为

$$P_t^a = w^a (\alpha_t^1 + \alpha_t^3) \quad (8)$$

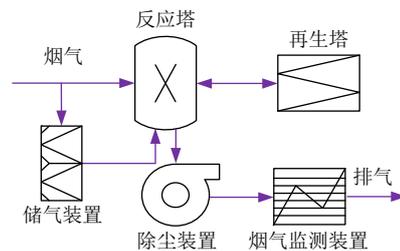


图 3 烟气处理系统结构

Fig. 3 Flue gas treatment system structure

式中： $w^\alpha$ 为烟气处理系统的单位处理能耗系数； $P_t^\alpha$ 为  $t$  时刻烟气处理能耗； $\alpha_t^1$ 为  $t$  时刻进行烟气处理的烟气量中由垃圾焚烧电厂运行产生的烟气提供的部分； $\alpha_t^3$ 为  $t$  时刻进行烟气处理时储气装置提供的烟气量。

### 2.3 碳捕集-垃圾焚烧-风电-光伏联合运行策略

本文将碳捕集电厂与含储气装置的垃圾焚烧电厂和风电/光伏联合运行，一部分风电和光伏功率当作捕集能耗供给碳捕集系统；另一部分功率当作烟气处理能耗供给烟气处理系统；其余部分的功率输入电网中。碳捕集电厂发电和垃圾焚烧发电的功率一部分当作碳捕集能耗提供给碳捕集系统；另一部分功率当作烟气处理能耗提供给烟气处理系统；其余部分的功率输向电网中。表达式如下

$$P_t^{GC} + P_t^{WC} + P_t^{VC} + P_t^{WIC} = P_t^{CC} \quad (9)$$

$$P_t^{OP} = w^C Q_t^{CC} \quad (10)$$

$$P_t^{Va} + P_t^{Wa} + P_t^{Ga} + P_t^{Wia} = P_t^\alpha \quad (11)$$

$$P_t^{WN} + P_t^{WC} + P_t^{Wa} = P_t^W \quad (12)$$

$$P_t^{VN} + P_t^{VC} + P_t^{Va} = P_t^V \quad (13)$$

$$P_t^{WIN} + P_t^{WIC} + P_t^{Wia} = P_t^{WI} \quad (14)$$

$$Q_t^N = e^g P_t^G - Q_t^{CC} \quad (15)$$

式中： $P_t^{WC}$ 、 $P_t^{VC}$ 、 $P_t^{WIC}$  分别为  $t$  时段风电、光伏机组和垃圾焚烧电厂提供的碳捕集能耗； $P_t^{Va}$ 、 $P_t^{Wa}$ 、 $P_t^{Ga}$ 、 $P_t^{Wia}$  分别为  $t$  时段光伏、风电、碳捕集电厂和垃圾焚烧电厂提供的烟气处理能耗； $P_t^{WN}$ 、 $P_t^{VN}$ 、 $P_t^{WIN}$  分别为  $t$  时段风电、光伏和垃圾焚烧电厂发电上网功率； $P_t^W$ 、 $P_t^V$ 、 $P_t^{WI}$  分别为  $t$  时段风电、光伏预测出力和垃圾焚烧发电出力； $Q_t^N$  为  $t$  时段碳捕集电厂的  $CO_2$  净排放量，t/h； $e^g$  为内碳捕集电厂单位等效发电出力产生的  $CO_2$  的量，t/(MW·h)。

### 2.4 其他聚合单元模型

2.4.1 CHP 机组和燃气锅炉模型表达式<sup>[4]</sup>如下

$$\begin{cases} P_t^{PH} = P_t^{CHP} + H_t^{CHP} \\ P_t^{CHP} = V_t^{CHP} H^g \eta^{CHP,e} \\ H_t^{CHP} = V_t^{CHP} H^g \eta^{CHP,h} \end{cases} \quad (16)$$

$$H_t^{GB} = V_t^{GB} H^g \eta^{GB} \quad (17)$$

式中： $P_t^{PH}$ 、 $P_t^{CHP}$ 、 $H_t^{CHP}$  分别为  $t$  时段 CHP 机组输出总功率、电和热功率； $V_t^{CHP}$ 、 $V_t^{GB}$  分别为  $t$  时段 CHP 机组、燃气锅炉消耗的天然气的量； $\eta^{CHP,e}$ 、 $\eta^{CHP,h}$ 、 $\eta^{GB}$  分别为 CHP 机组电、热效率和燃气锅炉效率； $H_t^{GB}$  为  $t$  时段燃气锅炉输出热功率。

2.4.2 储能装置模型

考虑了电、热储能装置自身功率损耗的储电、

储热功率表达式<sup>[6,13]</sup>如下

$$S_t^{ES} = S_{t-1}^{ES}(1 - \sigma^{ES}) + \eta^{ESC} P_t^{ESC} - \frac{P_t^{ESD}}{\eta^{ESD}} \quad (18)$$

$$S_t^{TS} = S_{t-1}^{TS}(1 - \sigma^{TS}) + \eta^{TSC} H_t^{TSC} - \frac{H_t^{TSD}}{\eta^{TSD}} \quad (19)$$

式中： $S_t^{ES}$ 、 $S_t^{TS}$  分别为电储能和热储能在  $t$  时段末的蓄电量和储热量，MW； $\sigma^{ES}$ 、 $\sigma^{TS}$  分别为电、热储能自身电、热能损耗率； $P_t^{ESC}$ 、 $P_t^{ESD}$  分别为电储能装置在  $t$  时段的充、放电功率； $H_t^{TSC}$ 、 $H_t^{TSD}$  分别为储热装置在  $t$  时段的充、放热功率； $\eta^{ESC}$ 、 $\eta^{ESD}$ 、 $\eta^{TSC}$ 、 $\eta^{TSD}$  分别为电、热储能的充、放效率。

### 2.5 优化目标

为体现 VPP 的经济性，以 VPP 运行净成本最小化(净利润最大化)作为优化目标，决策变量包括碳捕集电厂等效出力、垃圾焚烧电厂等效出力、CHP 机组出力、燃气锅炉出力、碳捕集能耗、烟气处理能耗(两种能耗包含由碳捕集电厂、垃圾焚烧发电厂、风电和光伏分别提供的能耗功率)、电储能充放电功率、热储能充放热功率、中断负荷量和能量市场购电量，其目标函数为

$$F = \min \sum_{t=1}^T (C_t^F - I_t^C + C_t^{WI} + C_t^H + C_t^{PG} + C_t^{CS} + C_t^W + C_t^L + C_t^M) \quad (20)$$

式中：目标函数含 9 部分，分别为碳捕集电厂燃料成本  $C_t^F$ 、碳交易市场收益  $I_t^C$ 、垃圾焚烧电厂成本  $C_t^{WI}$ 、CHP 机组和燃气锅炉成本  $C_t^H$ 、P2G 成本  $C_t^{PG}$ 、碳封存成本  $C_t^{CS}$ 、系统运行维护成本  $C_t^W$ 、中断负荷成本  $C_t^L$  和能量市场购电成本  $C_t^M$ ， $T$  为调度总时长。每部分具体表达式如下。

1) 考虑阀点效应的碳捕集电厂燃料费用<sup>[10]</sup>为

$$C_t^F = a^f + b^f P_t^G + c^f (P_t^G)^2 + |d^f \sin[e^f (P_t^{G,\min} - P_t^G)]| \quad (21)$$

式中： $a^f$ 、 $b^f$ 、 $c^f$ 、 $d^f$ 、 $e^f$  为燃料成本系数； $P_{\min}^G$  为碳捕集电厂的出力下限。

2) 碳捕集电厂可通过出售未达到碳排放配额的排放额度取得收益。反之，当  $CO_2$  净排放量超过碳排放配额时，需支付碳交易费用用于购买排放配额。碳交易收益表达如下

$$I_t^C = k^C (Q_t^Q - Q_t^N) \quad (22)$$

$$Q_t^Q = \gamma^C P_t^{GN} \quad (23)$$

式中： $k^C$  为碳交易价格，\$/t； $Q_t^Q$  为  $t$  时段碳捕集电厂的碳排放配额； $\gamma^C$  为单位电量的碳排放基准额度，t/(MW·h)。

3) 垃圾焚烧电厂运行无燃料成本，只需负担

碳排惩罚产生的费用，运行成本函数表达式如下

$$C_t^{WI} = P_t^{WI} k_t^C (e^\alpha - \gamma^C) \quad (24)$$

式中  $e^\alpha$  为垃圾焚烧电厂单位出力烟气排放强度， $t/(MW \cdot h)$ 。

4) CHP 机组和燃气锅炉主要成本为天然气的燃料成本。其成本表达式如下

$$C_t^H = k^{CH_4} V_t^{BUY} \quad (25)$$

$$V_t^{BUY} = V_t^{CHP} + V_t^{GB} - V_t^{P2G} \quad (26)$$

式中： $k^{CH_4}$  为天然气市场单位天然气固定价格， $\$/m^3$ ； $V_t^{BUY}$  为天然气购买量， $m^3$ 。

5) P2G 成本主要为原料成本和运行成本，表达式<sup>[14]</sup>如下

$$C_t^{PG} = k^{CO_2} Q_t^{BUY} + k^{P2G} P_t^{P2G} \quad (27)$$

$$Q_t^{BUY} = Q_t^{P2G, sum} - Q_t^{P2G} \quad (28)$$

式中： $k^{CO_2}$  为购买  $CO_2$  的固定价格， $\$/t$ ； $k^{P2G}$  为 P2G 运行成本系数， $\$(MW \cdot h)$ 。

6) 现有文献对碳捕集技术的研究大多集中在捕集阶段，对捕集后的研究极少涉及，捕集  $CO_2$  后经过一系列途径封存，从而达到减排  $CO_2$  的目的，但封存技术不仅需承担高昂的长距离运输成本，还需面对封存泄露导致爆炸和危害环境等风险。本文在 VPP 中构建 CCGP-P2G-燃气机组供热系统，将捕集到的  $CO_2$  作为 P2G 的原料，实现回收利用从而减少  $CO_2$  封存量，随着 P2G 技术不断进步，未来将可实现更大程度的  $CO_2$  回收利用和减少碳封存<sup>[8]</sup>。碳封存成本表达式如下

$$C_t^{CS} = k^{CS} Q_t^{CS} \quad (29)$$

$$Q_t^{CS} = Q_t^{CC} - Q_t^{P2G} \quad (30)$$

式中  $k^{CS}$  为封存单位  $CO_2$  的固定价格， $\$/t$ 。

7) 风电和光伏日常运行时的运行维护费用<sup>[15]</sup>

$$C_t^W = \lambda_1 P_t^W + \lambda_2 P_t^V \quad (31)$$

式中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为风电和光伏的单位维护成本， $\$(MW \cdot h)$ 。

8) 切断可中断负荷需按中断等级提供补偿费用给用户。中断负荷补偿费用表示<sup>[13]</sup>如下

$$C_{i,t}^L = \sum_k (\lambda_k^{CUT} P_{k,t}^{CUT}) \quad (32)$$

式中： $K$  为中断等级数； $\lambda_k^{CUT}$  为第  $k$  级补偿价格， $\$/MW$ ； $P_{k,t}^{CUT}$  为  $t$  时段第  $k$  级中断负荷功率， $MW$ 。

9) 当电出力不足时，VPP 可从电网购买以满足电力负荷需求。电力市场购电成本表达式如下

$$C_t^M = k_t^{EM} P_t^{EM} \quad (33)$$

式中： $k_t^{EM}$  为  $t$  时段电网购电电价， $\$(MW \cdot h)$ ； $P_t^{EM}$  为  $t$  时段在电网的购电量， $MW \cdot h$ 。

## 2.6 约束条件

1) 电功率和热功率平衡约束

$$P_t^{GN} + P_t^{WIN} + P_t^{CHP} + P_t^{WN} + P_t^{VN} + P_t^{ESD} +$$

$$P_t^{EM} = P_t^{EL} - P_t^{CUT} + P_t^{ESC} \quad (34)$$

$$H_t^{CHP} + H_t^{GB} + H_t^{TSD} = H_t^{HL} + H_t^{TSC} \quad (35)$$

式中： $P_t^{EL}$ 、 $H_t^{HL}$  分别为  $t$  时段的电、热负荷， $MW$ ； $P_t^{CUT}$  为  $t$  时段各级中断负荷功率之和。

2) 碳捕集电厂约束

$$P^{G, min} \leq P_t^G \leq P^{G, max} \quad (36)$$

$$\lambda_t^{CC} = \frac{Q_t^{CC}}{e^g P_t^G}, \quad 0 \leq \lambda_t^{CC} \leq 1 \quad (37)$$

$$P^A \leq P_t^{GC} + P_t^{WC} + P_t^{VC} + P_t^{WIC} \leq P_t^{C, max} \quad (38)$$

$$P_t^{C, max} = w^C e^g P_t^G \quad (39)$$

$$|P_{t+1}^G - P_t^G| \leq \Delta P^G \quad (40)$$

$$|P_t^{GC} + P_t^{WC} + P_t^{VC} + P_t^{WIC} - P_{t-1}^{GC} - P_{t-1}^{WC} - P_{t-1}^{VC} - P_{t-1}^{WIC}| \leq \Delta P^C \quad (41)$$

式中： $P^{G, max}$  为等效出力上限； $P_t^{C, max}$  为  $t$  时段碳捕集系统运行能耗上限； $\lambda_t^{CC}$  为  $t$  时段碳捕集系统的烟气分流比； $\Delta P^G$  为碳捕集电厂出力爬坡速率约束； $\Delta P^C$  为碳捕集电厂碳捕集能耗爬坡速率约束。

3) CHP 机组电热出力及爬坡约束

$$P^{CHP, min} \leq P_t^{CHP} \leq P^{CHP, max} \quad (42)$$

$$H^{CHP, min} \leq H_t^{CHP} \leq H^{CHP, max} \quad (43)$$

$$|P_{t+1}^{PH} - P_t^{PH}| \leq \Delta P^{PH} \quad (44)$$

式中： $P^{CHP, max}$ 、 $P^{CHP, min}$ 、 $H^{CHP, max}$ 、 $H^{CHP, min}$  分别为 CHP 机组电出力上、下限和热出力上、下限； $\Delta P^{PH}$  为 CHP 机组出力爬坡速率约束。

4) 燃气锅炉热出力及爬坡约束

$$H^{GB, min} \leq H_t^{GB} \leq H^{GB, max} \quad (45)$$

$$|H_{t+1}^{GB} - H_t^{GB}| \leq \Delta H^{GB} \quad (46)$$

式中： $H^{GB, max}$ 、 $H^{GB, min}$  分别为燃气锅炉出力上、下限； $\Delta H^{GB}$  为燃气锅炉出力爬坡速率约束。

5) P2G 运行约束

$$0 \leq P_t^{P2G} \leq P^{P2G, max} \quad (47)$$

式中  $P^{P2G, max}$  为 P2G 设备最大运行功率。

6) 电储能和热储能约束

$$0 \leq P_t^{ESC} \leq P^{ESC, max} \mu_t^{ESC} \quad (48)$$

$$0 \leq P_t^{ESD} \leq P^{ESD, max} \mu_t^{ESD} \quad (49)$$

$$0 \leq \mu_t^{ESC} + \mu_t^{ESD} \leq 1 \quad (50)$$

$$S^{ES, min} \leq S_t^{ES} \leq S^{ES, max} \quad (51)$$

$$S_0^{ES} = S_{24}^{ES} \quad (52)$$

式中： $P^{ESC, max}$ 、 $P^{ESD, max}$  分别为充、放电功率最大值；布尔变量  $\mu_t^{ESC}$ 、 $\mu_t^{ESD}$  分别表示  $t$  时段电储能是

否充放电和热储能是否储放热，是则置 1，否则置 0； $S^{ES,max}$ 、 $S^{ES,min}$  分别为储电容量最大、最小值； $S_0^{ES}$ 、 $S_{24}^{ES}$  分别为储能电池在一天的始、末值。热储能约束同电储能约束一致，故此不再赘述。

7) 中断负荷约束

$$0 \leq P_{k,t}^{CUT} \leq R_k^{CUT} P_t^{EL} \quad (53)$$

$$P_t^{CUT} = \sum_k P_{k,t}^{CUT} \quad (54)$$

式中  $R_k^{CUT}$  为第  $k$  级负荷中断系数。

8) 垃圾焚烧电厂约束

$$W^{WI} = \sum_{t=1}^T P_t^{WI} \leq W^{WI,max} \quad (55)$$

$$P^{WI,min} \leq P_t^{WI} \leq P^{WI,max} \quad (56)$$

$$|P_{t+1}^{WI} - P_t^{WI}| \leq \Delta P^{WI} \quad (57)$$

$$0 \leq \lambda_t^{WI} \leq 1 \quad (58)$$

$$P_t^{Va} + P_t^{Wa} + P_t^{Wla} + P_t^{Ga} = P_t^a \quad (59)$$

$$10\% \times V^{WIa,max} \leq V_t^{WIa} \leq 90\% \times V^{WIa,max} \quad (60)$$

$$0 \leq \alpha_t^2 \leq V_L^{WIa,max} \quad (61)$$

$$0 \leq \alpha_t^3 \leq V_L^{WIa,max} \quad (62)$$

式中： $W^{WI}$  为垃圾焚烧电厂日总出力，垃圾焚烧电厂日总出力具有恒定性，因其燃料由政府根据装机容量提供固定量的居民生活垃圾； $W^{WI,max}$  为垃圾焚烧电厂日总出力上限； $P^{WI,max}$ 、 $P^{WI,min}$  分别为每时刻出力最大和最小值； $\Delta P^{WI}$  为爬坡速率约束； $\lambda_t^{WI}$  为烟气分流比，即垃圾焚烧电厂中流入反应塔烟气量与发电侧产生的烟气总量的比值； $V_t^{WIa}$  为  $t$  时刻烟气存储罐储气量； $V^{WIa,max}$  为储气装置最大容量； $\alpha_t^2$  为  $t$  时刻流入储气装置的烟气量； $V_L^{WIa,max}$  为储气装置进出管道的最大流通流量。

### 3 模型求解算法

本文所提出的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模型具有高维非线性特点，采用常规优化算法求解在寻优深度和精度上难满足需求。针对此问题，本文将 CDE 算法与反余切函数特性相结合，提出 ACDE 算法用以求解。

CDE 算法每次循环迭代都将经过排序的种群个体进行优劣分割，对优部群落采用式(63)所示的 DE/rand/1 变异策略，通过采用随机选取的变异基向量使得朝着多个方向进化以增加种群多样性<sup>[16]</sup>；对劣部群落采用式(64)的 DE/best/1 的变异策略以增强进化的方向性。CDE 算法具体原理和流程可参考文献[17]。

$$Y_i^G = X_{D3}^G + F(X_{D1}^G - X_{D2}^G) \quad (63)$$

$$Y_i^G = X_{best}^G + F(X_{D1}^G - X_{D2}^G) \quad (64)$$

式中： $X_{best}^G$  表示第  $G$  代最优个体向量； $X_{D1}^G$ 、 $X_{D2}^G$ 、 $X_{D3}^G$  分别表示第  $G$  代的第  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  个体向量，可随机选取且  $D_1 \neq D_2 \neq D_3$ ； $F$  为变异因子； $Y_i^G$  为变异操作产生的中间个体向量。

综上可知，进化后期优部群落的变异操作中，式(64)的变异差分相量  $X_{D1}^G - X_{D2}^G$  逐渐趋近于 0，从而导致进化仍然容易变异停滞陷入早熟，使得种群多样性大幅下降。为此，本文受反余切函数为单调递减且为凹函数的特性启发，如图 4 所示，构建一种新型的优部群落变异机制，用以改善进化后期种群多样性不足的缺陷，具体过程如下。

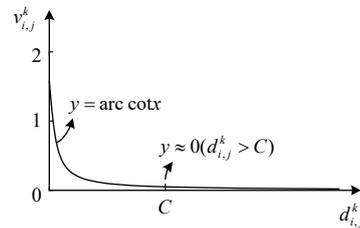


图 4 反余切函数变异机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of inverse cotangent function

1) 设个体向量为  $n$  维，结合反余切函数特性构建如下关系

$$\begin{cases} X_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n], X_j = [x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^n] \\ d_{i,j}^k = |x_i^k - x_j^k|, v_{i,j}^k = \text{arc cot } d_{i,j}^k \\ V_{i,j} = [v_{i,j}^1, v_{i,j}^2, \dots, v_{i,j}^n] \end{cases} \quad (65)$$

2) 结合式(64)和式(65)构建如下基于反余切函数的新型优部群落变异机制

$$Y_i^G = X_{D3}^G + F(X_{D1}^G - X_{D2}^G + V_{D1,D2}^G) \quad (66)$$

当优部种群中  $X_i$  和  $X_j$  的维间距  $d_{i,j}^k$  大于临界值  $C$  时， $v_{i,j}^k$  基本接近于 0，此时与传统的 CDE 算法变异机制一样；当维间距  $d_{i,j}^k < C$  时，变异差分项增大，且维间距越小  $v_{i,j}^k$  的增长速率越快，从而新型的变异差分相量  $X_{D1}^G - X_{D2}^G + V_{D1,D2}^G$  越大，个体变异程度加大，保证了进化后期的种群多样性。该新型变异机制在保留 CDE 算法的同时，还改善了进化后期种群多样性不足的缺陷，使整个进化过程中种群多样性都能较好地保持，在兼顾寻优速度同时，提升算法跳出局部最优的能力，实现持续深度寻优，提高算法性能。ACDE 流程图如图 A1 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

为验证本文所提出模型，文中 VPP 系统中包含 1 台碳捕集电厂、1 台 P2G 设备、1 台 CHP 机组、

1 台燃气锅炉、1 个垃圾焚烧电厂、1 个风力发电厂和 1 个光伏发电厂。各单元参数见附录表 A1。VPP 系统中电、热负荷预测值分别如附录图 A2 和图 11；风电与光伏预测功率如附录图 A3；能量市场购电电价预测值如附录图 A4。

### 4.2 对比方案构建及调度分析

为对比衡量与分析所研究 VPP 中引入碳捕集-P2G-燃气机组协同运行框架、电转气设备、碳捕集电厂与含储气装置的垃圾焚烧电厂和风电-光伏联合运行以及改进的 CDE 算法对 VPP 运行成本的影响，设置 5 种对比方案，如表 1 所示。为检验模型的削峰填谷效应，使用等效负荷的方差表示负荷波动程度，以此来评估模型的效果。等效负荷方差表达式如下

$$S^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t^E - P^{E,mv})^2 \quad (67)$$

$$P_t^E = P_t^{EL} + P_t^{P2G} + P_t^\alpha + P_t^{CC} + P_t^{ESC} - P_t^{ESD} - P_t^{CUT} \quad (68)$$

$$P^{E,mv} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t^E \quad (69)$$

式中： $S^2$  为等效负荷方差； $P_t^E$  为  $t$  时刻电力等效负荷； $P^{E,mv}$  为电力等效负荷的均值。

**表 1 5 种不同的 VPP 构建方案**  
**Table 1 Five different composition of VPP**

方案	CCPP-P2G-燃气机组	电转气设备	联合运行	碳交易市场	采用改进的 CDE 算法
1	×	√	√	√	√
2	×	×	√	√	√
3	√	√	×	√	√
4	√	√	√	√	×
5	√	√	√	√	√

注：方案 1 未实现 CCPP-P2G-燃气机组系统协同利用框架，捕集后的 CO<sub>2</sub> 全部封存；方案 3 中碳捕集电厂与垃圾焚烧电厂和风电-光伏不联合运行，风电和光伏功率全部输入大电网中，不作为碳捕集能耗和烟气处理能耗。

根据所构建的 5 种方案，优化得出各聚合单元的收益和成本结果对比、调度情况结果对比、碳捕集和烟气处理运行结果对比和改进算法优化迭代曲线对比分别如表 2、表 3、表 4 和图 5 所示，综合对比分析可知：

**表 2 收益和成本结果对比**  
**Table 2 Comparison of profit and cost result** 10<sup>2</sup>\$

方案	碳捕集电厂成本	碳交易收益	碳封存成本	垃圾焚烧电厂成本	购气成本	P2G 成本	弃风光成本	购电成本	中断负荷成本	系统维护成本	VPP 净成本
1	2231.51	38.48	89.39	59.25	1307.95	53.85	289.50	383.66	215.66	1084.16	5676.45
2	2237.44	33.72	88.58	59.37	1353.89	0	1832.01	414.12	155.78	1084.16	7191.63
3	2169.09	-174.46	46.35	59.42	1316.07	24.42	806.03	321.92	220.51	1084.16	6222.43
4	2265.00	81.80	100.0	59.41	1306.84	33.33	290.90	354.10	231.93	1084.16	5643.87
5	2263.07	48.52	90.90	59.30	1305.67	34.09	290.30	298.19	248.52	1084.16	5625.68

**表 3 调度情况结果对比**  
**Table 3 Comparison of scheduling results**

方案	碳捕集电厂等效出力/MW	垃圾焚烧电厂出力/MW	能量市场购电量/(MW·h)	中断负荷/MW	碳排量/t	碳捕集量/t	碳封存量/t	P2G 功率/MW	P2G 生成天然气量/m <sup>3</sup>	CHP 机组总出力/MW	燃气锅炉出力/MW	弃风量/MW	等效负荷方差
1	7023.3	1496.2	519.1	280.4	4914.3	1828.1	1828.1	156.5	8670.1	1590.5	1885.2	28.95	25 582.4
2	7035.6	1499.1	561.9	202.5	4942.8	1811.4	1811.4	0	0	1631.9	1868.6	183.2	29 373.9
3	6862.7	1500.5	451.7	286.7	5628.7	962.4	947.9	121.0	6701.7	1590.0	1885.4	80.60	26 602.9
4	7101.6	1500.17	490.4	301.5	4750.6	2066.9	2046.9	166.7	9230.1	1595.8	1883.0	29.09	25 318.9
5	7099.3	1499.7	425.0	323.1	4936.0	1879.3	1858.9	170.4	9439.2	1594.5	1883.5	29.03	24 976.6

**表 4 碳捕集和烟气处理运行结果对比**  
**Table 4 Comparison of carbon capture operation and flue gas treatment results** MW

方案	碳捕集电厂			风电机组			光伏机组			垃圾焚烧电厂			总碳捕集能耗	总烟气处理能耗
	上网功率	捕集能耗	烟气能耗	上网功率	捕集能耗	烟气能耗	上网功率	捕集能耗	烟气能耗	上网功率	捕集能耗	烟气能耗		
1	6721.9	263.7	37.7	3244.9	400.1	459.0	1350.0	6.4	93.6	1168.1	181.6	146.5	851.8	736.9
2	6727.7	293.5	14.4	3262.0	373.1	468.9	1373.2	15.2	61.6	1140.2	165.5	193.5	847.3	738.3
3	6246.8	618.9	0	4104	0	0	1450	0	0	761.5	0	738.9	618.9	738.9
4	6794.4	256.0	51.1	3155.2	570.3	378.5	1318.9	45.4	85.7	1232.4	44.3	223.5	916.0	738.8
5	6817.8	255.4	26.8	3262.7	432.8	408.5	1325.8	2.5	121.7	1143.2	174.9	181.6	865.5	738.6

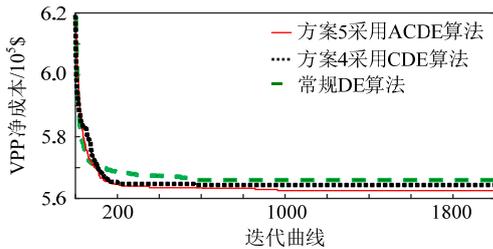


图5 优化迭代曲线

Fig. 5 Optimal iteration curves

1) 方案5相比于方案1, 实现了CCPP-P2G-燃气机组协同运行框架, 共有20.4t捕集到的CO<sub>2</sub>作为原材料提供给P2G设备, 从而节省了购买CO<sub>2</sub>和碳封存的费用, 使得方案5中P2G成本减少1976\$。且方案5的碳捕集量和碳交易收益比方案1分别高51.2t和1004\$, 这是由于方案1中碳捕集电厂排放的CO<sub>2</sub>未被利用直接封存, 且优化中考虑CO<sub>2</sub>的封存成本, 从而制约了碳捕集量。综上因素, 使得方案5中VPP净成本降低了5077\$。由此可知引入CCPP-P2G-燃气机组协同运行框架可促进碳捕集系统捕集CO<sub>2</sub>达成碳减排和实现内部资源的有效利用, 从而降低VPP成本。

2) 方案2相比方案1, 不含有P2G导致风光消纳能力下降从而弃风光成本增加 $1542.51 \times 10^2$ \$。且方案2的购气成本明显高于其他方案, 是由于P2G消纳风光可为燃气机组提供天然气。综上, P2G可实现消纳风光和减少天然气购买成本, VPP成本进一步降低了 $1515.18 \times 10^2$ \$。在削峰填谷效应方面, 方案1的等效负荷方差低于方案2, 说明电转气设备对平抑等效负荷波动有一定的作用。

3) 方案5相比于方案3, 实现了联合运行可灵活调配电力资源, 使得碳排放量和弃风光量分别降低989.7t和51.57MW, 进而增加碳交易收益 $222.96 \times 10^2$ \$和降低弃风成本 $515.73 \times 10^2$ \$。证明联合运行可进一步降低碳捕集系统能耗和烟气处理能耗成本, 从而提升碳捕集量、风电光伏消纳能力和VPP经济性, 最终使得VPP净成本总共降低 $596.75 \times 10^2$ \$。且由于本文提出VPP模型比常规VPP中多包含了碳捕集电厂, 优化了能源结构, 较于常规VPP具有更低的碳排放量。在削峰填谷效应方面, 方案5的等效负荷方差低于方案3, 说明联合运行对平抑等效负荷波动有一定的作用。

4) 方案5采用改进的复合微分进化算法, 方案4采用常规的复合微分进化, 由图5对比可知, 方案4采用CDE算法在600代左右基本收敛, 而方案5采用ACDE算法此时仍然在寻优, 在1000代左右基本收敛。证明了ACDE算法可改善进化后期种

群多样性不足的缺陷, 使得整个进化过程中种群多样性都能较好的保持, 在兼顾寻优速度同时, 提升了算法跳出局部最优的能力, 实现了持续深度寻优, 提高算法性能。由表1可知方案5的成本比方案4降低 $18.19 \times 10^2$ \$, 采用ACDE算法得到的净成本值更为优良。

综上, 实现了CCPP-P2G-燃气机组协同运行框架、引入P2G设备以及碳捕集电厂和含储气装置的垃圾焚烧电厂和风电-光伏联合运行, 可降低VPP净成本和碳排放量, 实现内部资源更为有效地利用和优化能源结构, 并提升VPP的清洁能源消纳能力和平抑负荷的波动。另一方面, 所提出的ACDE算法可实现持续深度寻优, 提高算法性能。

### 4.3 VPP优化调度结果分析

依据优化调度所得结果, 方案5中的碳捕集电厂出力和中断负荷、碳捕集能耗以及CO<sub>2</sub>排放量和处理量分别如图6—8所示。垃圾焚烧电厂出力和能量市场购电量以及烟气处理能耗如图9—10所示。热负荷和各供热单元出力以及储能装置储、放功率和储能量分别如图11—12所示。风光弃电量和各机组承担电负荷功率如图13所示。

1—7时段中, 此时段风电出力较大而负荷需求较小, 由图6可知, 方案5的碳捕集电厂出力不随负荷变化保持在最低出力功率附近就已经能满足负荷需求, 综合图7—8和图10可知, 风电出力大部分提供给碳捕集能耗和烟气处理能耗, 两种能耗较大, 使得此时段各区域CO<sub>2</sub>排放量接近于零。且

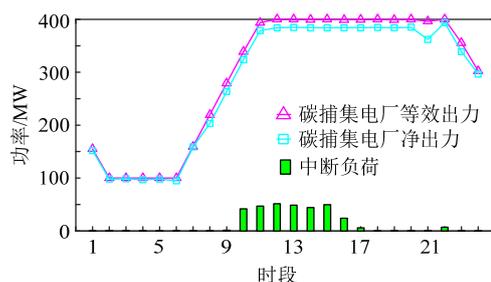


图6 碳捕集电厂出力和中断负荷

Fig. 6 Carbon capture power plant output and interruption load

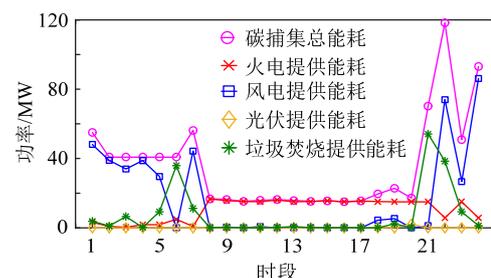


图7 碳捕集能耗

Fig. 7 Carbon capture energy consumption

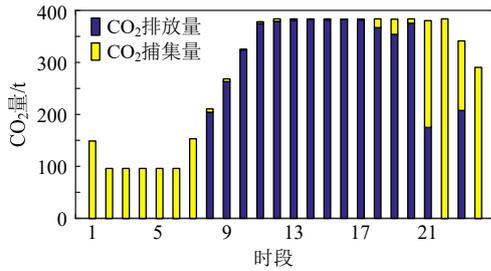


图 8 CO<sub>2</sub> 排放量和处理量

Fig. 8 Emission of CO<sub>2</sub> and handling capacity

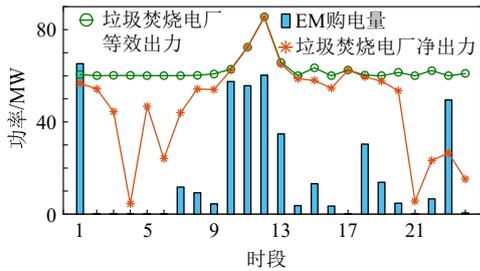


图 9 垃圾焚烧电厂出力 and 能量市场购电量

Fig. 9 Output of waste incineration power plant and purchasing power in energy market

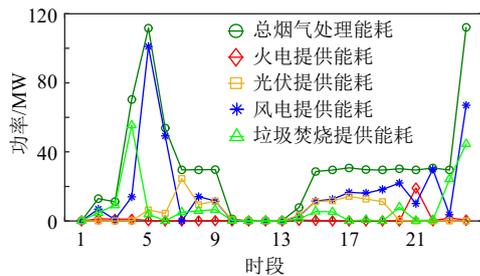


图 10 烟气处理能耗

Fig. 10 Energy consumption for the flue gas treatment

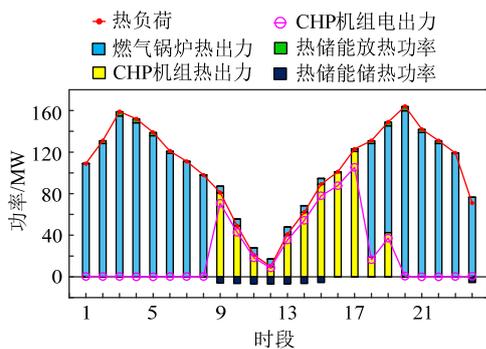


图 11 热负荷和各供热单元出力

Fig. 11 Heat load and output of each heating unit

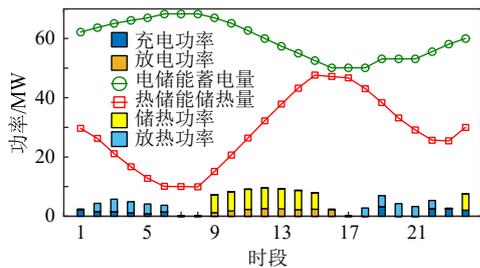


图 12 储能装置储、放功率和储能量

Fig. 12 Storage/discharge power and energy storage power level of energy storage device

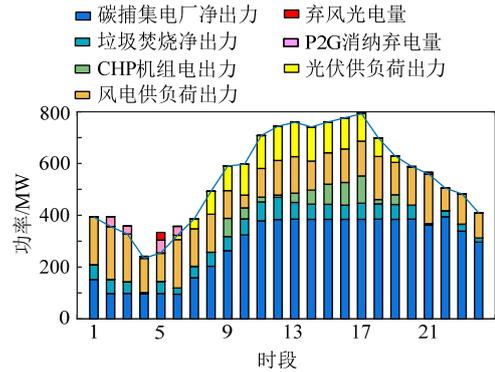


图 13 风光弃电量和各机组承担电负荷功率

Fig. 13 Abandoned wind power and photovoltaic power, electric load output of each unit

由图 13 可知，弃风弃光主要集中在该时段，是由于碳捕集电厂和垃圾焚烧电厂等灵活调节机组受机组出力上下限约束、爬坡速率约束、碳捕集能耗约束和烟气处理能耗约束的限制，导致调节能力有限从而产生弃风。此时 P2G 设备消纳了大部分弃电量，作为可转移负荷的碳捕集能耗和烟气处理能耗转移到该时段，风电光伏提供给两种能耗的功率大幅度增加，也进一步提高了风光消纳能力，在一定程度上缓解了新能源出力和电负荷的需求不匹配的矛盾和实现削峰填谷作用。综合图 11—13 可知此时由于电负荷较小而热负荷较高，热负荷基本由燃气锅炉提供，储能装置放热。该时段能量市场购电电价较低，综合图 9 和 12 可知，该时段储能电池充电，电能缺额部分从能量市场购买。

8—9 时段电负荷增加而风电出力降低，综合图 6—8 和图 10 可知，为满足负荷需求，碳捕集电厂增加出力，且各单位提供的碳捕集能耗与烟气处理能耗进行负荷时段转移，总体上呈现减少趋势，以增加机组的净出力。由图 11 可知，为应对热负荷快速降低且电负荷增加，燃气锅炉出力快速下降而 CHP 机组出力快速提升。

10—17 时段，电力负荷和能量市场购电电价较前一时段提升，综合图 6 和图 9 可知，为满足负荷需求，碳捕集电厂继续提升等效出力，垃圾焚烧电厂出力和净出力增加(因为其日发电总量存在上限，故不能全时段提升发电出力)，中断负荷随电力负荷和风光出力的变化趋势相应地增加，能量市场购电量也大幅增加。综合图 7—10 可知，各发电单元提供的碳捕集能耗和烟气处理能耗持续处于低位，因此碳排放量该时段较高，但在 15—17 时段烟气处理能耗小幅提升，是由于风电光伏出力处于较高出力水平，提供了一定的烟气处理能耗。由图 11—12 可知，由于该时段热负荷较低而电负荷较大，热负

荷基本由 CHP 机组提供以缓解电负荷压力, 储能电池放电, 储热装置储热。

18—20 时段电力负荷出现较低幅度地下降, 风电出力增加, 由图 9—10 可知, 能量市场购电量减少, 烟气处理能耗处于中位水平且大部分由风电提供。由图 11—12 可知, 随着电负荷压力减小和热负荷增加, CHP 机组出力持续减少, 燃气锅炉承担了大部分热负荷, 储热装置全时段放热以缓解供热压力。

21—22 时段, 风电出力增加, 综合图 6—9 可知, 此时段碳捕集电厂和垃圾焚烧电厂净出力增加, 碳捕集能耗转移到此时段以应对风电出力波动。由图 11 知, 此时热负荷较大, 储热装置放热。

23—24 时段, 此时能量市场购电电价较低, 风电较前一时段先减后增, 综合图 6—9 和图 10 可知, 碳捕集电厂净出力和能量市场购电量随风力波动先增后减, 碳捕集能耗相对地先减后加, 烟气处理能耗先处于中位而后大幅增加。碳捕集能耗和烟气处理能耗作为可转移负荷转移到此时段, 风电提供给两种能耗的功率先降低而后大幅度增加。

综上所述, 基于本文提出的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模型和方法, 可实现各单元之间灵活协调调度和互补, 利用碳捕集能耗和烟气处理能耗具有可时移、可调节负荷功率的特性, 建立互动机制, 再充分结合储能资源参与系统优化调度, 在风电和光伏等可再生能源出力波动的情形下, 进行灵活地协调优化调度, 以碳捕集能耗和烟气处理能耗的形式把负荷转移, 从低可再生能源发电高电负荷时段向高可再生能源发电时段转移。实现了源荷之间的供需平衡和削峰填谷, 在降低了两种能耗的燃料成本和碳排放的同时, 还协调了各机组分别提供的碳捕集能耗、烟气处理能耗以及上网功率, 使得风电和光伏转化成为可调度资源, 解决了可再生能源的出力波动性的问题, 提升了风光消纳能力, 在一定程度上缓解了新能源出力和电负荷的需求不匹配的矛盾。在联合运行无法完全消纳风光出力从而产生弃风弃光电量时, P2G 设备可进一步提升风光消纳能力, 最终优化了能源结构且使得 VPP 整体运行效益提高。

## 5 结论

本文提出的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模型, 引入 CCPP-P2G-燃气机组协同运行框架, 将风/光/碳捕集/垃圾焚烧 4 个出力单元进行联合运行, 可有效实现各单元之

间电能协调优化调度和碳的再利用, 从而实现内部资源更为有效地利用, 提升了风电消纳能力和 VPP 整体运行效益。由应用仿真结果可表明:

1) 考虑碳捕集系统和多种清洁能源的 VPP 系统能有效降低碳排放量。

2) 引入 CCPP-P2G-燃气机组协同运行框架可实现碳再利用, 有效降低碳封存成本和 P2G 购买 CO<sub>2</sub> 费用, 促进碳捕集电厂捕集更多的 CO<sub>2</sub>。另一方面, P2G 可提升风光消纳能力, 且消纳弃风弃光时, 生成天然气供给燃气机组可降低天然气购买成本。

3) 通过风/光/碳捕集/垃圾焚烧联合调度运行和引入储气装置解耦垃圾焚烧电厂发电环节与烟气处理环节两者关系, 再结合储能和可中断负荷资源参与系统优化调度, 可有效协调 VPP 内各单元出力水平和净碳排放水平的同时, 平抑可再生能源出力波动性和提升可再生能源消纳能力, 实现源荷之间的供需平衡和削峰填谷。

4) 将 VPP 内需求侧互动资源与发电侧资源有效整合, 缓解了新能源出力和电负荷的供需不匹配的矛盾, 提高了 VPP 在协调调度中应对可再生能源出力变化的调节能力, 优化了能源结构, 可获得更高的运行效益。

本文主要研究了 VPP 中能量资源协调优化调度, 在以后的研究工作中, 将在本文的基础上对综合能源进行光热电站和冷-热-电综合能源系统中多能源关系解耦和协调优化进行深入研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622-3630.  
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622-3630(in Chinese).
- [3] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2925-2934.  
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Multi-energy system valuation method based on energy analysis[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2925-2934(in Chinese).

- [4] 许福鹿, 周任军, 曹俊波, 等. 多种市场下虚拟电厂电-热-气协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 35-42.  
XU Fulu, ZHOU Renjun, CAO Junbo, et al. Coordinated optimal dispatching of power-heat-gas for virtual power plant participating in multiple markets[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 35-42(in Chinese).
- [5] SCHIEBAHN S, GRUBE T, ROBINIUS M, et al. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(12): 4285-4294.
- [6] GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1371-1390.
- [7] 崔杨, 闫石, 仲悟之, 等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254-4264.  
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254-4264(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 陈伯达, 林楷东, 张勇军, 等. 计及碳捕集和电转气协同的电气互联系统优化调度[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 9-17.  
CHEN Boda, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Optimal dispatching of integrated electricity and natural gas energy systems considering the coordination of carbon capture system and power-to-gas[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 9-17(in Chinese).
- [10] 孙惠娟, 蒙锦辉, 彭春华. 风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4040-4049.  
SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power/photovoltaic/hydropower/carbon-capture units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4040-4049(in Chinese).
- [11] 周任军, 陈溢, 阳卫伟, 等. 含烟气储存装置的风电-垃圾焚烧虚拟电厂双阶段优化调度[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 78-84.  
ZHOU Renjun, CHEN Yi, YANG Weiwei, et al. Two-stage optimal dispatching of wind power-waste incineration virtual power plant with flue gas storage device[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 78-84(in Chinese).
- [12] 周任军, 徐健, 王仰之, 等. 利用市场交易奖惩措施的风电-垃圾焚烧虚拟电厂优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 90-96.  
ZHOU Renjun, XU Jian, WANG Yangzhi, et al. Optimal operation of virtual power plant with wind power and waste incineration based on rewards and punishment measures for market trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 90-96(in Chinese).
- [13] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6780-6790.  
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790(in Chinese).
- [14] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15, 121.  
DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15, 121(in Chinese).
- [15] 王振浩, 杨璐, 田春光, 等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 137-143.  
WANG Zhenhao, YANG Lu, TIAN Chunguang, et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 137-143(in Chinese).
- [16] 傅润炜, 姜磊, 孙惠娟. 基于并行分子微分进化的综合能源系统优化调度[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 125-133.  
FU Runwei, JIANG Lei, SUN Huijuan. Optimization scheduling of integrated energy system based on parallel molecular differential evolution algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(6): 125-133(in Chinese).
- [17] PENG Chunhua, XIE Peng, PAN Lei, et al. Flexible robust optimization dispatch for hybrid wind/photovoltaic/hydro/thermal power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 751-762.



孙惠娟

在线出版日期: 2021-03-11。

收稿日期: 2020-10-10。

作者简介:

孙惠娟(1982), 女, 副教授, 通信作者, 研究方向为智能电网优化调度与配电网规划, E-mail: sunhuijuan1982@163.com;

刘昀(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网优化调度, E-mail: 82268075@qq.com;

彭春华(1973), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、微电网优化运行与控制, E-mail: chinapch@163.com。

(责任编辑 王晔)

附录 A

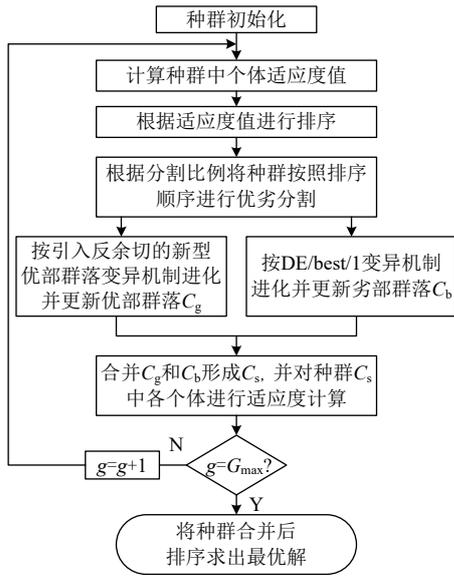


图 A1 算法流程图

Fig. A1 ACDE algorithm flow chart

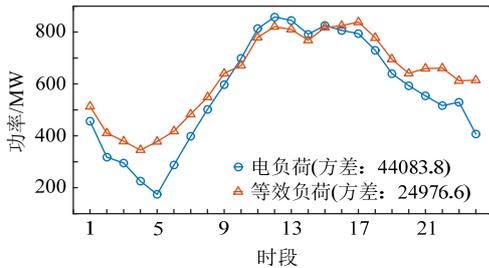


图 A2 负荷预测值和等效负荷值

Fig. A2 Load forecast values and equivalent load

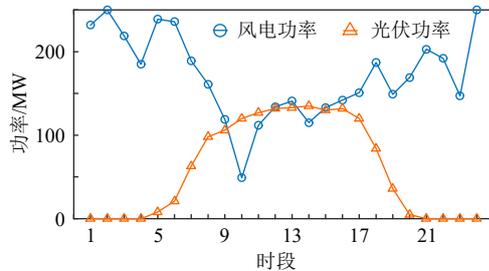


图 A3 风电和光伏出力

Fig. A3 Wind power and photovoltaic output

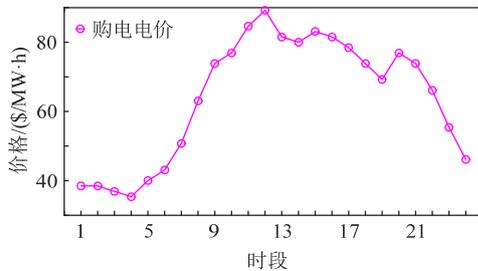


图 A4 电力市场购电电价

Fig. A4 Electricity market purchase electricity price

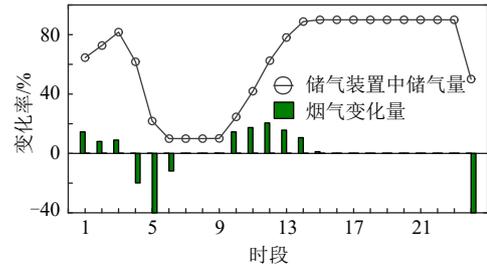


图 A5 储气装置储气量和烟气变化量

Fig. A5 storage capacity and variation of accumulator unit

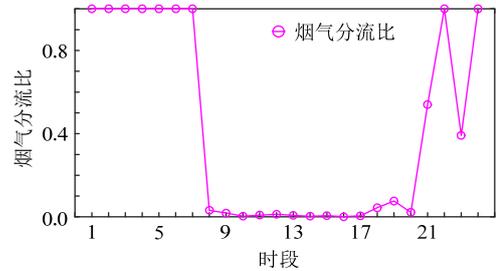


图 A6 碳捕集系统烟气分流比

Fig. A6 Flue gas diversion ratio of carbon capture system

表 A1 能源集线器各单元参数

Table A1 Energy hub unit parameters

$P^A/\text{MW}$	$w^C/(\text{MW}\cdot\text{h}/\text{t})$	$\alpha^{\text{CO}_2}/(\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$\eta^{\text{P}2\text{G}}$	$w^\alpha$
15	0.269	0.2	0.6	0.513
$e^S/(\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$\eta^{\text{CHP}e}$	$\eta^{\text{CHP}h}$	$\sigma^{\text{ES}}$	$\sigma^{\text{TS}}$
0.96	0.35	0.4	0.001	0.01
$\eta^{\text{ESC}}$	$\eta^{\text{ESD}}$	$\eta^{\text{TSC}}$	$\eta^{\text{TSD}}$	$d^I/(\$/\text{h})$
0.95	0.95	0.88	0.88	200
$b^I/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$c^I/(\$/(\text{MW})^2\cdot\text{h})$	$d^I/(\$/\text{h})$	$e^I/(\text{rad}/\text{MW})$	$P^{\text{G}_{\text{min}}}/\text{MW}$
17	0.04	270	9.8	100
$k^C/(\$/\text{t})$	$\gamma^C/(\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$e^\alpha$	$k^{\text{CH}_4}/\$/\text{m}^3$	$k^{\text{CO}_2}/(\$/\text{t})$
19.8	0.76	0.96	0.419	120
$k^{\text{P}2\text{G}}/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$k^{\text{CS}}/(\$/\text{t})$	$\lambda_1/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$\lambda_2/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$P^{\text{G}_{\text{max}}}/\text{MW}$
20	4.89	21.4	14.2	400
$\Delta P^{\text{G}}/\text{MW}$	$\Delta P^{\text{C}}/\text{MW}$	$P^{\text{CHP,max}}/\text{MW}$	$P^{\text{CHP,min}}/\text{MW}$	$H^{\text{CHP,max}}/\text{MW}$
60	65	140	0	160
$H^{\text{CHP,min}}/\text{MW}$	$\Delta P^{\text{PH}}/\text{MW}$	$S^{\text{ES,max}}/\text{MW}$	$S^{\text{ES,min}}/\text{MW}$	$S^{\text{TS,max}}/\text{MW}$
0	120	120	10	50
$S^{\text{TS,min}}/\text{MW}$	$S_0^{\text{ES}}/\text{MW}$	$S_0^{\text{TS}}/\text{MW}$	$W^{\text{WL,max}}/\text{MW}$	$P^{\text{WL,max}}/\text{MW}$
10	60	30	1500	100
$P^{\text{WL,min}}/\text{MW}$	$V^{\text{WL}\alpha,\text{max}}$	$V_L^{\text{WL}\alpha,\text{min}}$		
60	400	160		