

考虑碳捕集与甲烷化的综合能源微网分布式优化调度

李玉婷, 彭敏放

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了促进综合能源微网的低碳性与经济性, 并降低信息安全风险, 提出考虑碳捕集与甲烷化的综合能源微网分布式优化调度模型。通过在传统火电厂上加装碳捕集设备, 将捕集的 CO_2 用于甲烷化, 可以减少系统碳排放, 将多余的配额进行出售, 在降低系统碳排放的同时也带来了经济效益。并且考虑了分布式优化调度, 以解决多综合能源微网联合优化调度带来的信息安全问题。仿真结果表明所提模型可以有效减少系统碳排放并兼顾经济性, 同时能降低信息安全风险。

关键词: 综合能源微网; 碳捕集; 甲烷化; 碳交易; 储氢; 分布式优化调度

中图分类号: TM73; TK01

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202207026

0 引言

随着电力市场化改革, 国家发展改革委、国家能源局大力推进多能互补, 逐步开放能源市场, 综合能源微网(integrated energy microgrid, IEM)作为耦合冷热电气的重要手段, 具有发展前景。现阶段我国仍然以火力发电为主, 且煤电的主体地位在短时间内不会发生变化^[1-3], 而燃烧煤炭带来的碳排放量巨大, 这与碳达峰、碳中和的目标相悖, 因此如何从源头上降低碳排放量是一个亟待解决的问题。

为了应对减碳的需求, 已有碳交易以及二氧化碳碳捕集、封存与利用(CO_2 capture utilization and storage, CCUS)技术在初步发展中。碳交易的定价分为传统定价机制以及阶梯式碳交易机制, 目前的研究正逐步转向以阶梯式碳交易为主。文献[4]提出了一种考虑电制氢与阶梯式碳交易的综合能源微网优化调度方法, 通过设置场景对比证明所提模型的经济性与低碳性。文献[5]提出的电热气综合能源系统调度模型中, 对比分析了2种碳交易机制对碳排放量与系统运行成本的影响, 证明了阶梯式碳交易对于低碳经济调度的积极促进作用。文献[6]将碳交易机制引入能源市场的竞价策略中, 在尽可能得到最优定价策略的同时, 降低了系统的碳排放量与运行成本。CCUS技术包含碳捕集、碳封存、碳利用三部分, 其中碳捕集过程所获得的 CO_2 可应用于甲烷化。目前将甲烷化引入综合能源调度中的研究较少, 且未详细研究甲烷化对系统碳排放与成本的影响机制。文献[7]将捕集到的高浓度 CO_2 用于甲烷化, 并使用储气装置解决 CO_2 生产与利用时间

不匹配的问题, 所提模型降低了系统的碳排放量与弃风率。文献[8]在垃圾焚烧虚拟电厂的优化调度中考虑了碳捕集与甲烷化, 所提模型提高了风光的消纳率, 并且有效降低了电厂成本与碳排放。 H_2 是甲烷化的原材料之一, 然而电制氢的速率与甲烷化反应的速率不尽相同, 天然气系统与电力系统的运行时间尺度在匹配上也存在问题。并且基于对节能减碳的迫切需求, 储氢问题也再次受到关注^[9]。文献[10]提出了一种考虑氢能物理特性的综合能源系统优化方法, 基于范氏方程建立了精细的高压储氢罐运行特性模型。文献[11]针对电动汽车不同充电方式, 搭建了电热氢混合的综合能源系统, 考虑了 H_2 的产生、使用速率以及储氢罐的压力, 为电动汽车供电系统提供了坚实的保障。

随着分布式发电的发展, 综合能源微网也将成为未来电网供电的重要方式, 各微网之间将会逐渐产生密切联系, 而不是仅与配电网进行交互, 若多个微网进行联合优化调度, 则会给各微网的信息安全隐患带来极大隐患, 因此有学者将分布式优化(又称分散优化)方法引入多综合能源微网的调度问题求解中。分散优化的方法包含分块坐标下降法、增广拉格朗日函数法、分解内点法等^[12], 其本质均是将一个包含多部分优化的问题分解成几个独立优化的问题, 每个独立优化的部分仅需交换少量边界信息即可求解。

本文基于上述研究, 构建了考虑碳捕集、甲烷化与阶梯式碳交易的综合能源微网模型, 在传统火电厂上加装碳捕集设备, 对捕集的 CO_2 进行甲烷化, 并加入储氢罐用以调配 CO_2 生产与利用时间不匹配的问题, 设置4种场景进行算例仿真, 详细分析了碳捕集与甲烷化对系统碳排放和经济性的影响及机制。对于含有多个综合能源微网的系统, 使用分布式优化进行求解, 保障了多微网利益主体的信息安全性。

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-05-20

在线出版日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61472128, 61973107)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61472128, 61973107)

1 综合能源微网优化调度模型

本文考虑的综合能源微网结构如图1所示,微网内负荷包括电、气、热、冷负荷。冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统、甲烷化设备、电制冷设备、电制热设备将多种能源耦合起来,电源侧还包括燃煤电厂与风电、光伏。对其中的燃煤电厂进行低碳化改造,加装碳捕集设备形成碳捕集电厂。但鉴于目前仅对传统火电厂引入碳捕集设备进行了研究^[13],因此本文的CCHP机组为普通机组。

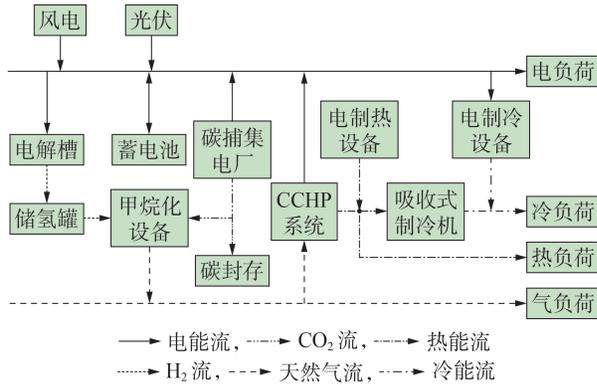


图1 综合能源微网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of IEM structure

1.1 电力与天然气部分模型

1.1.1 CCHP系统模型

CCHP系统主要包括燃气轮机(micro-turbine, MT)、余热锅炉、吸收式制冷机等。其发电效率可以用如下三次多项式拟合^[14-15]:

$$\eta_i^{\text{MT},e} = \left[a_3 \left(\frac{P_i^{\text{CCHP},e}}{P_{\text{MT},\text{max}}} \right)^3 + a_2 \left(\frac{P_i^{\text{CCHP},e}}{P_{\text{MT},\text{max}}} \right)^2 + a_1 \frac{P_i^{\text{CCHP},e}}{P_{\text{MT},\text{max}}} + a_0 \right] \eta^{\text{MT},r} \quad (1)$$

式中: $\eta_i^{\text{MT},e}$ 为 t 时段MT的发电效率; $\eta^{\text{MT},r}$ 为MT的额定发电效率; $P_i^{\text{CCHP},e}$ 为 t 时段MT的发电量; $P_{\text{MT},\text{max}}$ 为MT的最大发电功率; a_0 — a_3 为MT的发电效率系数。

MT的余热烟气被回收后,可通过吸收式制冷机将其转化为可使用的热能和冷能,其模型如下:

$$Q_i^{\text{gt}} = P_i^{\text{CCHP},e} \frac{1 - \eta_i^{\text{MT},e} - \eta_{\text{L}}}{\eta_i^{\text{MT},e}} \quad (2)$$

$$P_i^{\text{CCHP},h} = Q_i^{\text{gt}} \eta^{\text{MT},h} \eta_{\text{rec}} \quad (3)$$

$$P_i^{\text{CCHP},c} = Q_i^{\text{gt}} \eta^{\text{MT},c} \eta_{\text{rec}} \quad (4)$$

式中: Q_i^{gt} 为 t 时段MT烟气的余热; η_{L} 为MT的热损失系数; $P_i^{\text{CCHP},h}$ 、 $P_i^{\text{CCHP},c}$ 分别为 t 时段吸收式制冷机的产热量、产冷量; η_{rec} 、 $\eta^{\text{MT},h}$ 、 $\eta^{\text{MT},c}$ 分别为吸收式制冷机的烟气回收率、制热系数、制冷系数。

MT的耗气量计算式如下^[16]:

$$V_i^{\text{CCHP}} = \frac{P_i^{\text{CCHP},e}}{\eta_i^{\text{MT},e} \gamma_{\text{NG}}^{\text{LHV}}} \quad (5)$$

式中: V_i^{CCHP} 为 t 时段MT消耗的天然气的体积; $\gamma_{\text{NG}}^{\text{LHV}}$ 为天然气的低热值。

考虑到式(5)为非线性函数,其分子、分母中均包含变量,求解存在一定困难,因此本文采用文献[17]的线性化方法进行求解,如附录A式(A1)—(A6)所示。

1.1.2 储氢罐模型

本文采用文献[10]的低压储氢罐模型,建立理想气体状态方程模型如下:

$$P_i^{\text{HS}} V^{\text{HS}} = n_i^{\text{HS}} R T^{\text{H}} \quad (6)$$

$$n_i^{\text{HS}} = S_i^{\text{HS}} / V_{\text{m}} \quad (7)$$

$$S_i^{\text{HS}} = S_{i-1}^{\text{HS}} + V_i^{\text{H}_2} - V_i^{\text{H}_1} \quad (8)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{HS}} \leq P_i^{\text{HS}} \leq P_{\text{max}}^{\text{HS}} \quad (9)$$

式中: P_i^{HS} 、 n_i^{HS} 、 S_i^{HS} 分别为 t 时段储氢罐的气压、 H_2 的物质的量、气体体积; V^{HS} 、 R 、 T^{H} 、 V_{m} 分别为储氢罐体积、理想气体常数、气体温度、气体摩尔体积,均为常数; $V_i^{\text{H}_1}$ 、 $V_i^{\text{H}_2}$ 分别为 t 时段储氢罐输出、输入的气体体积; $P_{\text{min}}^{\text{HS}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{HS}}$ 分别为储氢罐气压上、下限。

1.1.3 电制冷与电制热模型

由式(1)可知,当MT的发电功率较低时,其发电效率会大幅降低^[18],因此在微网中引入电制冷/电制热,以弥补MT发电效率较低时带来的供冷/供热不足,其制热、制冷量分别如下:

$$P_i^{\text{EC},1} = \gamma P_i^{\text{EC}} \quad (10)$$

$$P_i^{\text{EH},1} = \gamma P_i^{\text{EH}} \quad (11)$$

式中: $P_i^{\text{EC},1}$ 、 P_i^{EC} 和 $P_i^{\text{EH},1}$ 、 P_i^{EH} 分别为 t 时段电制冷和电制热的输出、输入功率; γ 为电制冷/电制热的转换效率。

1.2 碳交易与甲烷化部分模型

1.2.1 碳排放量与配额

2021年7月16日,中国碳排放权交易市场正式启动上线交易,上线首日交易总量达410.40万t,交易总额突破2亿元。根据生态环境部办公厅发布的《2019—2020年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》,碳排放配额包括供电与供热部分,燃煤机组与MT的碳排放配额计算式如下:

$$D_i^{\text{CF}} = P_i^{\text{CF}} B_{\text{CF},e} F_1 F_{\text{CF},r} \quad (12)$$

$$F_{\text{CF},r} = 1 - 0.22 \beta_{\text{tp}} \quad (13)$$

$$D_i^{\text{CCHP}} = P_i^{\text{CCHP},e} B_{\text{CCHP},e} F_1 F_{\text{CCHP},r} + P_i^{\text{CCHP},h} B_{\text{CCHP},h} \lambda_{\text{ch}} \quad (14)$$

$$F_{\text{CCHP},r} = 1 - 0.6 \beta_{\text{tp}} \quad (15)$$

式中: D_i^{CF} 、 P_i^{CF} 、 $B_{\text{CF},e}$ 和 $F_{\text{CF},r}$ 分别为 t 时段燃煤机组的碳排放配额、 t 时段燃煤机组的发电功率、燃煤机组的供电基准值和供热系数; F_1 为冷却系数; β_{tp} 为机组供热比; D_i^{CCHP} 、 $B_{\text{CCHP},e}$ 、 $F_{\text{CCHP},r}$ 和 $B_{\text{CCHP},h}$ 分别为 t 时段MT的碳排放配额、MT的供电基准值、供热系数和供热基准值; λ_{ch} 为发电量折合成供热量的转换系数。

燃煤机组与MT的碳排放量拟合模型分别如下:

$$M_i^{\text{CF}} = \alpha_{\text{CF}} (P_i^{\text{CF}})^2 + \beta_{\text{CF}} P_i^{\text{CF}} \quad (16)$$

$$M_t^{\text{CCHP}} = \alpha_{\text{CCHP}} (P_t^{\text{CCHP,e}})^2 + \beta_{\text{CCHP}} P_t^{\text{CCHP,e}} \quad (17)$$

式中: M_t^{CF} 、 M_t^{CCHP} 分别为 t 时段燃煤机组、MT 产生的 CO_2 质量; α_{CF} 、 β_{CF} 和 α_{CCHP} 、 β_{CCHP} 分别为燃煤机组和 MT 的发电碳排放系数。

1.2.2 阶梯式碳交易

碳排放权交易主要有传统碳交易与阶梯式碳交易 2 种形式。在一定的调度周期内,若某交易主体本身的碳排放量未超过其碳排放配额,则此交易主体可以出售多余的碳排放额度以获得收益,否则需向其他主体购买碳排放权。

阶梯式碳交易是指将超出配额范围的碳排放量设置为若干个阶梯,分段定价计算费用,其成本表达式如下^[4-5]:

$$C_t^{\text{r}} = \begin{cases} \lambda M & M \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(M-l) + \lambda l & l \leq M \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(M-2l) + \lambda(2+\alpha)l & 2l \leq M \leq 3l \\ \lambda(1+3\alpha)(M-3l) + \lambda(3+3\alpha)l & 3l \leq M \leq 4l \\ \lambda(1+4\alpha)(M-4l) + \lambda(4+6\alpha)l & 4l \leq M \leq 5l \\ \vdots & \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_t^{r} 为 t 时段碳交易成本; M 为交易量; λ 为碳交易基础单价; α 为每个区间的碳交易单价增长率; l 为碳排放区间长度。

1.2.3 碳捕集

为实现“双碳”目标,我国在政策上实行碳交易机制,可以刺激促进企业等减排;而在技术上则大力推行 CCUS 技术,从源头减少 CO_2 的排放。碳捕集的模式如下^[4,19]:

$$0 \leq M_t^{\text{BJ}} \leq \eta_{\text{CO}_2} M_t^{\text{CF}} \quad (19)$$

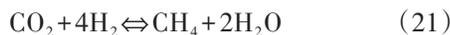
$$P_t^{\text{BJ}} = \lambda_{\text{BJ}} M_t^{\text{BJ}} \quad (20)$$

式中: M_t^{BJ} 为 t 时段碳捕集捕获的 CO_2 质量(下文简称为碳捕集质量); η_{CO_2} 为碳捕集设备的效率; P_t^{BJ} 为 t 时段碳捕集设备的耗能; λ_{BJ} 为单位碳捕集质量耗能。

碳捕集得到的 CO_2 可用于碳利用与碳封存。碳利用有多种形式,如用于强化采油、制化肥、制液体燃料等^[20], 本文将对 CO_2 进行甲烷化处理。

1.2.4 CO_2 甲烷化

利用 CO_2 合成 CH_4 , 一方面可以减少碳排放, 另一方面也可以缓解我国天然气短缺的问题。 CO_2 甲烷化是指在 $150 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度、 $0.1 \sim 10 \text{ MPa}$ 的气压以及催化剂的作用下, CO_2 和 H_2 发生 Sabatier 反应, 直接生成 CH_4 ^[21]。反应过程如下:



Sabatier 反应中 CO_2 、 H_2 、 CH_4 的摩尔质量满足 1:4:1 的关系, 由于 3 类物质处于同一气压与温度之中, 其反应的体积之比也一样, 因此三者之间的关系应满足:

$$V_t^{\text{H}_2} = 4 \frac{M_t^{\text{MR}}}{\rho_{\text{CO}_2}(1-\omega^{\text{MR}})} \quad (22)$$

$$V_t^{\text{CH}_4} = \frac{M_t^{\text{MR}}}{\rho_{\text{CO}_2}(1-\omega^{\text{MR}})} \quad (23)$$

式中: $V_t^{\text{CH}_4}$ 为 t 时段反应中生成的 CH_4 体积; M_t^{MR} 为 t 时段反应消耗的 CO_2 质量; ω^{MR} 为反应的损耗系数; ρ_{CO_2} 为 CO_2 的密度, 取 $1.965 \times 10^{-3} \text{ t/m}^3$ 。

甲烷化反应中的 H_2 可以通过电解水制氢、重整制氢、化石燃料制氢等方式获取, 其中电解水制氢的碳排放量最低, 制氢效率也较高^[22]。为实现“双碳”目标, 本文采取电解水方式制氢, 具体模型如下:

$$P_t^{\text{H}_2} = \lambda_{\text{eH}_2} V_t^{\text{H}_2} \quad (24)$$

式中: $P_t^{\text{H}_2}$ 为 t 时段电解水制氢的耗电量; λ_{eH_2} 为电解水产生单位体积 H_2 的耗电量。

1.3 约束条件

1.3.1 平衡约束

在综合能源微网内要满足电平衡、天然气平衡、热平衡、冷平衡, 具体约束条件见附录 A 式(A7)—(A10)。

1.3.2 设备运行约束

综合能源微网内各设备的约束有对燃煤机组、MT 的运行约束, 包括额定功率上下限约束和爬坡约束。运行约束条件见附录 A 式(A11)—(A14)。

1.4 优化目标

本文以综合能源微网的总成本最低为目标, 考虑一天内(将一天等分为 24 个时段)的经济调度问题, 包含碳交易成本、碳捕集成本、碳封存成本、燃煤成本、天然气成本, 以及从其他微网的购电购气成本。

$$f = \sum_{t=1}^{24} (C_t^{\text{r}} + C_t^{\text{BJ}} + C_t^{\text{FC}} + C_t^{\text{CF}} + C_t^{\text{CH}_4} + C_t^{\text{e}}) \quad (25)$$

$$C_t^{\text{BJ}} = \lambda_{\text{BJ}} M_t^{\text{BJ}} \quad (26)$$

$$C_t^{\text{FC}} = \lambda_{\text{FC}} M_t^{\text{FC}} \quad (27)$$

$$C_t^{\text{CH}_4} = \lambda_{\text{CH}_4} (V_t^{\text{grid}} + V_t^{\text{micro}}) \quad (28)$$

$$C_t^{\text{e}} = \lambda_{\text{e}} (P_t^{\text{grid}} + P_t^{\text{micro}}) \quad (29)$$

$$C_t^{\text{CF}} = \left[b_2 (P_t^{\text{CF}})^2 + b_1 P_t^{\text{CF}} + b_0 \right] \lambda_{\text{coal}} \quad (30)$$

式中: C_t^{BJ} 、 C_t^{FC} 、 $C_t^{\text{CH}_4}$ 、 C_t^{e} 、 C_t^{CF} 分别为 t 时段综合能源微网的碳捕集成本、碳封存成本、购气成本、购电成本和燃煤成本; V_t^{grid} 、 V_t^{micro} 分别为 t 时段从气网、其他微网购买的天然气体积; P_t^{grid} 、 P_t^{micro} 分别为 t 时段从电网、其他微网购买的电功率; λ_{BJ} 、 λ_{FC} 分别为碳捕集、碳封存单价; λ_{CH_4} 、 λ_{e} 、 λ_{coal} 分别为天然气、电能、煤炭单价; b_0 — b_2 为燃煤机组耗煤系数。

2 分布式优化调度模型

目前大多关于综合能源系统的研究都是集中式优化, 需要收集所有综合能源微网的信息进行统一调度, 涉及信息隐私、通信量大等问题。随着综合能

源微网的快速发展与普及,集中式优化调度已不再适用,因此本文采用分布式优化调度,互联的微网之间只需交换少量边界信息,即可在微网内部完成优化调度。

2.1 互联综合能源微网优化模型

采用联络线切割法^[12]进行求解,其示意图如图2所示,用新增的节点将IEM A和IEM B分解。将电力联络线与天然气联络线分割开,分割处等效为虚拟电源与虚拟气源。对于联络点,应满足如下边界约束条件:

$$\mathbf{T}^A = \mathbf{T}^B \quad (31)$$

式中: \mathbf{T}^A 、 \mathbf{T}^B 分别为IEM A、IEM B的边界变量,包括虚拟电源的发电功率与虚拟气源的天然气体积。

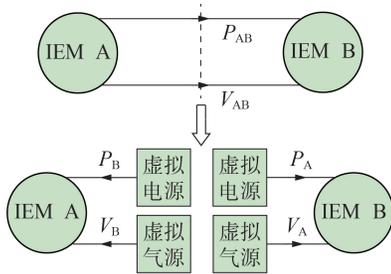


图2 联络线切割法示意图

Fig.2 Schematic diagram of tie-line splitting method

设 \mathbf{X}^A 、 \mathbf{X}^B 分别为IEM A、IEM B的内部变量,即第1节所包含的变量,则典型的互联综合能源微网优化调度模型如下:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}^A, \mathbf{T}^A) + f(\mathbf{X}^B, \mathbf{T}^B) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{T}^A = \mathbf{T}^B \\ \mathbf{G}_A(\mathbf{X}^A, \mathbf{T}^A) \\ \mathbf{G}_B(\mathbf{X}^B, \mathbf{T}^B) \end{cases} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $f(\cdot)$ 为IEM A、IEM B的运行成本函数; $\mathbf{G}_A(\cdot)$ 、 $\mathbf{G}_B(\cdot)$ 分别为IEM A、IEM B的运行约束。

2.2 分散优化调度

文献[23]基于增广拉格朗日函数法,提出一种采用辅助问题原理的算法,将多区域优化问题分解成多个独立子区域优化问题。该方法通过在目标函数中构造辅助函数,将增广拉格朗日函数中的二次项进行近似化,从而并行求解互联的IEM A、IEM B,具体如下:

$$\begin{cases} \mathbf{T}^{A,n+1} = \operatorname{argmin} \left\{ f(\mathbf{X}^A, \mathbf{T}^A) + \sum_i \left\{ \frac{c_i^n}{2} (\mathbf{T}_i^A - \mathbf{T}_i^{A,n})^2 + \left[\kappa_i^n + b_i^n (\mathbf{T}_i^{A,n} + \mathbf{T}_i^{B,n}) \right] \mathbf{T}_i^A \right\} \right\} \\ \mathbf{T}^{B,n+1} = \operatorname{argmin} \left\{ f(\mathbf{X}^B, \mathbf{T}^B) + \sum_i \left\{ \frac{c_i^n}{2} (\mathbf{T}_i^B - \mathbf{T}_i^{B,n})^2 + \left[\kappa_i^n + b_i^n (\mathbf{T}_i^{A,n} + \mathbf{T}_i^{B,n}) \right] \mathbf{T}_i^B \right\} \right\} \end{cases} \quad (33)$$

式中:上标 n 表示迭代次数;下标 i 表示第 i 个边界变量; b 、 c 、 κ 均为常数。

$$a_i^{n+1} = k_c a_i^n \quad (34)$$

$$b_i^{n+1} = k_c b_i^n \quad (35)$$

$$c_i^{n+1} = k_c c_i^n \quad (36)$$

$$\kappa_i^{n+1} = \kappa_i^n + a_i^n (\mathbf{T}^{A,n+1} + \mathbf{T}^{B,n+1}) \quad (37)$$

式中: a 为常数,为了保证算法的收敛性,每次迭代过程中取值不同,根据文献[12,23],一般要求 a 、 b 、 c 满足 $a=b=c/2$; k_c 为调整系数,取值大于1。并且,迭代同时满足式(38)、(39)的条件即可终止循环。

$$|\mathbf{T}^{A,n+1} + \mathbf{T}^{B,n+1}| < \varepsilon \quad (38)$$

$$\left| \frac{\mathbf{T}^{A,n+1} + \mathbf{T}^{B,n+1}}{\mathbf{T}^{A,n} + \mathbf{T}^{B,n}} \right| < 1 \quad (39)$$

式中: ε 为迭代收敛条件的阈值,其取很小的值。

因此,互联综合能源微网的分散优化调度模型的求解流程图见附录B图B1。

3 算例分析

3.1 算例描述

为验证本文所提模型的有效性,采用图1、2所示的综合能源微网模型,IEM A、IEM B的新能源出力以及冷热电负荷见附录B图B2,各设备具体参数见附录B表B1。本文模型的约束中存在三次项的非线性项,采用文献[17]的分段线性化方法进行求解,将模型转化为混合整数线性优化问题,使用MATLAB与CPLEX线性求解器即可求解。

3.2 对比分散优化与独立优化

为对比分散优化与独立优化的调度结果及经济效益,本节设置如下2种方案:方案1是IEM A、IEM B联合进行分散优化调度的方案,方案2是IEM A、IEM B各自在本区域进行独立优化调度的方案。方案1与方案2的优化结果见附录B图B3和图B4,系统运行成本与CO₂净排放量见表1。

表1 2种方案的调度结果

Table 1 Dispatching results of two schemes

调度结果	独立优化调度		分散优化调度	
	IEM A	IEM B	IEM A	IEM B
火电运行成本/\$	28289	28310	28290	28307
碳捕集成本/\$	14480	14481	14480	14481
碳封存成本/\$	539	537	541	538
购电成本/\$	-5406	-3579	-7567	-909
购气成本/\$	-1200	3704	-1049	3107
碳交易成本/\$	-16651	-16463	-16680	-16537
运行总成本/\$	20051	26987	18015	28986
碳净排放量/t	101.7	108.1	100.7	105.6

从图B3和图B4可以看出,采用分散优化调度与独立优化调度的结果基本一致,但前者的火电发电量总体比后者的少;对比图B3(a)与图B4(a),对于IEM A的火力发电,采用分散优化时的波动性稍

微强于独立优化。

从表1对比分析也可知,分散优化调度与独立优化调度的结果相差无几,系统总运行成本变化不到0.1%,碳净排放量变化仅1.6%。对于IEM A,采用分散优化调度时向外部出售的电能比独立优化调度多盈利\$ 2161,但出售的天然气减少了\$ 151,总体运行成本降低了\$ 2036;对于IEM B,采用分散优化调度时向外部出售的电能比独立优化调度少盈利\$ 2670,从外部购买的天然气也减少了\$ 597,总体运行成本增加了\$ 1999,总体而言,分散优化调度的系统运行成本降低了\$ 37。

2种方案的碳净排放量均变化不明显,由向外出售碳排放交易权所带来的盈利也均超过\$ 16000。由此可证明分散优化调度的优越性,既能保证找到最优解,也能保障每个微网主体的信息隐私安全。

3.3 低碳经济调度分析

本节根据是否引入碳捕集、甲烷化,设定如下4种场景分析调度情况:场景1,不引入碳捕集设备和甲烷化装置;场景2,引入甲烷化装置,但火电厂不装配碳捕集设备,则甲烷化部分的CO₂需要从外部购买,价格为78.5\$/t;场景3,不引入甲烷化装置,但火电厂装配碳捕集设备;场景4,采用含碳捕集和甲烷化的分布式优化调度。

本文考虑上述4种场景的低碳经济调度情况,表2为4种场景下的系统成本与CO₂排放量情况。

从表2可知,相比场景1,场景2下系统运行总成本降低了\$ 1992,即降低了3.0%,碳净排放量增加了38 t,即增加了4.6%,这说明在系统中仅引入甲烷化对系统的经济效益有正面影响,但是会增加系统的碳排放量。原因在于系统中引入甲烷化,虽然会带来CO₂购买成本,但是同时会产生CH₄供给气负荷,降低天然气的购买成本,从而赚取差价。但也是由于甲烷化装置的存在,需要消耗H₂,增加了电制氢的耗电量,而发电的主要来源是火电厂,故增大了碳排放量。

相比场景1,场景3下系统总成本降低了\$ 13550,即降低了21.3%,碳净排放量降低了611 t,即降低了72.1%,可知在综合能源系统的火电厂中

加装碳捕集设备,可以在一定程度上降低系统运行成本,并大幅减少碳排放量,对低碳经济调度起到积极影响。原因在于给火电厂加装碳捕集设备后,降低了排放到大气中的CO₂质量,并且可以结余大量碳排放配额到碳排放市场进行交易,得以赚取差价。

相比场景3,场景4下系统总成本降低了\$ 2997,即降低了6.0%,碳净排放量无变化。这是由于引入甲烷化装置后,部分捕集到的CO₂经Sabatier反应生成CH₄,向系统内部提供一定量的天然气,从而减少天然气购买成本。但相比场景2,场景4下系统总成本以及碳净排放量均下降得十分明显,总成本下降了\$ 14555,即降低了23.6%,碳净排放量下降了649 t,即降低了75.9%。

综上,说明降低碳排放量与运行成本的关键在于给火电厂加装碳捕集设备,而引入甲烷化装置只能在一定程度上减少系统运行成本。

图3、4分别展示了场景4下的冷、热出力情况。可以看出冷、热负荷主要由电制冷与电制热供给,CCHP出力占比较少。对于IEM A,CCHP仅在时段1出力,对于IEM B,CCHP在时段12、13、19、20出力,结合附录B图B2分析可知:当冷热负荷处于负荷低谷时段时,由电制冷/电制热供给;当其处于高峰时段时,CCHP会参与供给。原因在于CCHP机组运行会产生CO₂,且其未加装碳捕集设备,若运行则会占用碳排放配额,带来一定的运行成本;而负荷高峰期时,仅靠电制冷/电制热供给运行成本过大,启动CCHP机组不仅可以弥补部分冷热需求,还可以提供一定的电能。

3.4 碳交易价格影响分析

鉴于中国2021年7月才全面开放碳交易市场,碳交易机制尚不成熟,价格制定不一,本文针对此情况,分析碳交易的基础价格与区间价格涨幅对系统运行成本以及碳排放量的影响。图5、6分别为改变场景4的碳交易基础价格以及碳交易区间价格涨幅后,IEM A与IEM B的系统运行成本和碳净排放量的情况。

由图5可知:碳交易基础价格在\$ 3至\$ 9时,IEM A的系统运行成本较高,一直高于\$ 26000;

表2 4种场景下的调度结果

Table 2 Dispatching results under four scenarios

场景	IEM	火电运行成本/\$	碳捕集和碳封存成本/\$	购电成本/\$	购气成本/\$	碳交易成本/\$	CO ₂ 购买成本/\$	运行总成本/\$	碳净排放量/t
1	IEM A	23848	0	-3577	1102	4250	0	25622	370.3
1	IEM B	26289	0	24	6386	5227	0	37926	447.2
2	IEM A	24742	0	-3581	-1049	4556	290.7	24958	397.0
2	IEM B	26671	0	1067	3076	5357	427.4	36598	458.5
3	IEM A	28289	15027	-8566	1102	-16680	0	19171	100.7
3	IEM B	28305	15028	-2378	6412	-16538	0	30827	105.5
4	IEM A	28289	15021	-5156	-1172	-16684	0	18015	100.7
4	IEM B	28310	15019	-3263	3720	-16505	0	28986	105.5

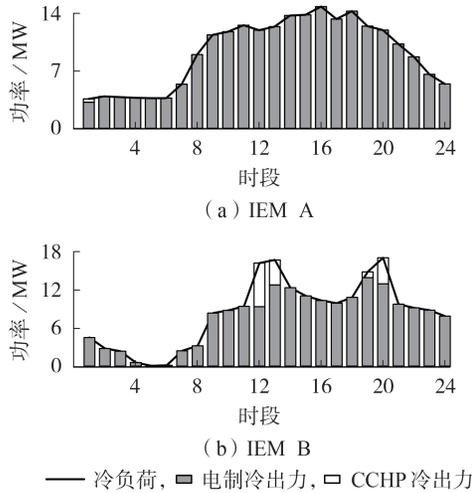


图 3 场景 4 下的冷出力

Fig.3 Cooling output under Scenario 4

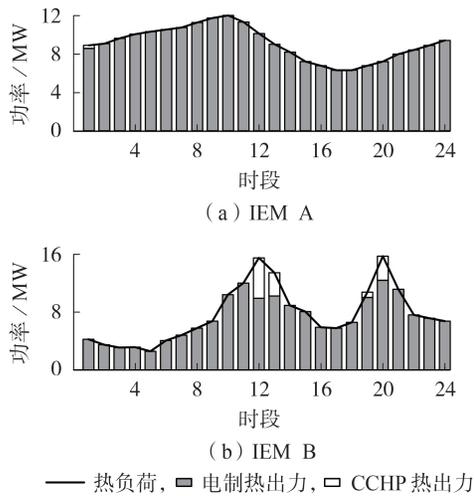


图 4 场景 4 下的热出力

Fig.4 Heat output under Scenario 4

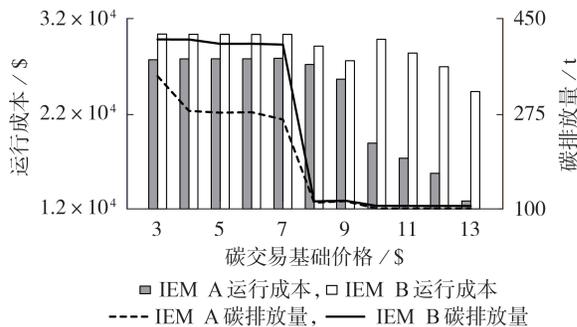


图 5 不同碳交易基础价格下的运行成本与碳排放量

Fig.5 Operating cost and carbon emission under different carbon trading prices

IEM B 的系统运行成本始终处于较高水平,但整体呈现下降趋势,这说明在有碳捕集设备与甲烷化装置的基础上,提高碳交易基础价格有利于降低系统运行成本。当碳交易价格上升到 \$ 8 后,2 个微网的碳净排放量均出现断层式下降,从 300 t 以上下降到

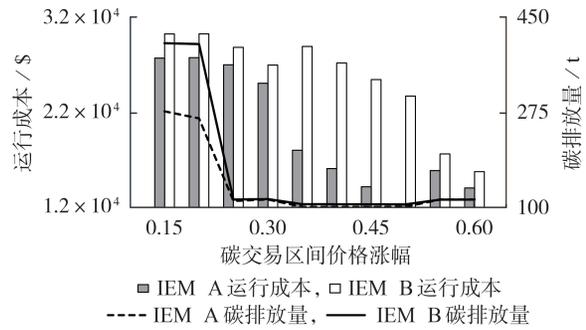


图 6 不同碳交易区间价格涨幅下的运行成本与碳排放量

Fig.6 Operating cost and carbon emission under different carbon trading band price increasing degrees

100 t 左右,并逐渐趋于平稳,这说明适当提高碳交易基础价格也有利于降低系统的碳净排放量。

由图 6 可知:当碳交易区间价格涨幅提升至 0.35 后,IEM A 的运行成本降低了近 \$ 1000,降幅达 35.7%;而对于 IEM B,价格涨幅要达到 0.55 以后才有明显的成本降低。对于碳净排放量,碳交易区间价格涨幅只需提升至 0.25 后就已有十分明显的降低,IEM A 的碳净排放量降幅达 60%,IEM B 的碳净排放量降幅达 75%。由此可知,适当提高碳交易区间价格涨幅能降低系统运行成本以及系统的碳排放量。

但是,也不能为了降低成本与碳排放而一味提高碳交易基础价格与涨幅,本文模型尚未考虑人为心理因素与其他机制的影响,例如当碳交易价格上涨到一定程度时,其他碳排放主体为了控制成本不再购买碳排放权而导致碳交易市场活跃度降低,从而间接导致系统盈利减少,成本升高。

4 结论

本文在碳达峰、碳中和的背景下,提出一种考虑甲烷化与碳交易的综合能源微网分布式优化调度模型,得到如下结论。

1) 分布式优化调度模型相较于独立优化调度模型,两者的调度结果几近相同,系统的运行成本变化不到 0.1%,碳净排放量变化仅 1.6%。而分布式优化调度模型仅需交换少量边界信息即可完成全局的优化调度,保障了每个综合能源微网主体的信息隐私安全。

2) 本文考虑了是否引入碳捕集设备或甲烷化装置对系统运行成本以及碳净排放量的影响,分析发现,降低碳排放量与运行成本的关键在于给火电厂加装碳捕集设备,引入甲烷化装置能在一定程度上减少系统运行成本,但随着甲烷化技术的发展,且其在综合能源系统研究中占比越来越大,其重要性不言而喻。

3) 分析了改变碳交易的基础价格与区间价格涨

幅对系统运行成本以及碳排放量的影响。适当提高碳交易基础价格或者碳交易区间价格涨幅有利于降低系统的运行成本以及碳净排放量。

综上,本文在传统的冷热电气综合能源微网中引入碳捕集与甲烷化装置,为综合能源系统的低碳经济调度研究提供一定参考。引入了储氢模型,解决了燃气系统与电力系统的运行时间尺度不匹配的问题。并采用分布式求解的方法,在保障经济性与低碳性的基础上兼顾了微网的信息安全。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张美珍. 中国煤炭清洁发电技术扩散及其驱动政策研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
ZHANG Meizhen. Diffusion of China's clean coal-fired power generation technologies and its driving policies [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [2] WANG J, ZHONG H, MA Z, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202(15): 772-782.
- [3] 张鸿宇, 凡海波, 方辉, 等. 考虑负荷偏离度的零碳排放综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. [2022-01-17]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000848>.
- [4] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [5] 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.
- [6] 彭春华, 张海洋, 孙惠娟, 等. 碳交易机制下综合能源市场多供能主体均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 463-471.
PENG Chunhua, ZHANG Haiyang, SUN Huijuan, et al. Balanced bidding strategy for multiple energy suppliers in the integrated energy market under carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 463-471.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 83-94.
ZHANG Hong, YUAN Tiejian, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-94.
- [10] 任洲洋, 罗潇, 覃惠玲, 等. 考虑储氢物理特性的含氢区域综合能源系统中长期优化运行[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3324-3333.
REN Zhouyang, LUO Xiao, QIN Huiling, et al. Mid/long-term optimal operation method of regional integrated energy systems considering hydrogen physical characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3324-3333.
- [11] 阳洋, 李奇, 蒲雨辰, 等. 考虑电动汽车充电方式的热电氢耦合孤岛综合能源系统优化配置[J/OL]. 电网技术. [2022-02-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1981>.
- [12] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
QU Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.
- [13] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 447-461.
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 447-461.
- [14] 耿健, 杨冬梅, 高正平, 等. 含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 25-32.
GENG Jian, YANG Dongmei, GAO Zhengping, et al. Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25-32.
- [15] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194.
- [16] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑富氧燃烧技术的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 592-608.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electro-gas-thermal integrated energy system based on oxy-combustion technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 592-608.
- [17] 李瑞欣. 冷热电联供型微电网优化调度研究[D]. 南昌:南昌大学, 2020.
LI Ruixin. Research on optimal scheduling of combined cooling heating and power microgrids[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [18] HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C, MUGNIOT N. Fuel consumption minimization of a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 673-681.
- [19] 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.
- [20] 赵志强,张贺,焦畅,等. 全球CCUS技术和应用现状分析[J]. 现代化工,2021,41(4):5-10.
ZHAO Zhiqiang,ZHANG He,JIAO Chang,et al. Review on global CCUS technology and application[J]. Modern Chemical Industry,2021,41(4):5-10.
- [21] 王小柳. CO₂催化转化合成甲烷的研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
WANG Xiaoliu. Research on catalytic conversion of CO₂ for the production of CH₄[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2020.
- [22] 李建林,李光辉,马速良,等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. 热力发电,2021,50(6):1-8.
LI Jianlin,LI Guanghui,MA Suliang,et al. Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation,2021,50(6):1-8.
- [23] 刘宝英,杨仁刚. 采用辅助问题原理的多分区并行无功优化算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):47-51.
LIU Baoying,YANG Rengang. Multi-subarea parallel reactive power optimization based on APP[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(7):47-51.

作者简介:



李玉婷

李玉婷(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统(**E-mail**: yutingli@hnu.edu.cn);

彭敏放(1964—),女,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电气设备监测诊断与评估、智能配电网、智能信息处理等(**E-mail**: pengminfang@hnu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Distributed optimal dispatching of integrated energy microgrid considering carbon capture and methanation

LI Yuting,PENG Minfang

(College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract:To promote the low-carbon and economic operation of integrated energy microgrid and reduce information security risk, the distributed optimal scheduling model of integrated energy microgrid considering carbon capture and methanation is proposed. By installing carbon capture devices on heat-engine plants, the captured CO₂ can be used for methanation, which contributes to the reduction of system's carbon emissions. The surplus carbon emission trading rights can be traded, which not only reduces the carbon emissions of the system but also provides additional economic benefits. The distributed optimal scheduling is proposed to solve the information privacy problem caused by the joint optimal scheduling of multi-integrated energy microgrid. Simulative results show that the proposed model can effectively balance the system-wide carbon emissions and the economics at the same time, while reducing the risk of information security.

Key words:integrated energy microgrid; carbon capture; methanation; carbon trading; hydrogen storage; distributed optimal dispatching

附录 A

(1) 式(5)的分段线性化方法。

先将式(5)转化为 V_t^{CCHP} 关于 $P_t^{\text{CCHP,e}}$ 的单变量函数，再将 $P_t^{\text{CCHP,e}}$ 分为 N 段区间，进行分段线性化：

$$V_t^{\text{CCHP}} = \sum_{i=1}^N (k^i P_t^{\text{CCHP,e},i} + b^i Z_t^i) \quad (\text{A1})$$

$$P_t^{\text{CCHP,e}} = \sum_{i=1}^N P_t^{\text{CCHP,e},i} \quad (\text{A2})$$

$$k^i = \frac{f(P_t^{i+1}) - f(P_t^i)}{P_t^{i+1} - P_t^i} \quad (\text{A3})$$

$$b^i = f(P_t^i) - k^i P_t^i \quad (\text{A4})$$

$$Z_t^i P_t^i \leq P_t^{\text{CCHP,e},i} \leq Z_t^i P_t^{i+1} \quad (\text{A5})$$

$$\sum_{i=1}^N Z_t^i \leq 1 \quad (\text{A6})$$

式中： P_t^i 为区间 i 的前端点值； k^i 、 b^i 分别为区间 i 的斜率、截距； Z_t^i 为 0-1 变量，限制 $P_t^{\text{CCHP,e}}$ 的取值只能在其中一段区间，当 $P_t^{\text{CCHP,e}}$ 取值在区间 i ， Z_t^i 置 1，否则置 0。式(1)及后续的非线性约束条件的线性化方法同上文一样，后文不再赘述。

(2) 平衡约束。

$$P_t^{\text{grid}} + P_t^{\text{mico}} + P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{CF}} + P_t^{\text{CCHP,e}} = P_t^{\text{EC}} + P_t^{\text{EH}} + P_t^{\text{H}_2} + P_t^{\text{load,e}} \quad (\text{A7})$$

$$V_t^{\text{grid}} + V_t^{\text{mico}} + V_t^{\text{CH}_4} = V_t^{\text{CHP}} + V_t^{\text{load}} \quad (\text{A8})$$

$$P_t^{\text{CCHP,h}} + P_t^{\text{EH,1}} = P_t^{\text{load,h}} \quad (\text{A9})$$

$$P_t^{\text{CCHP,c}} + P_t^{\text{EC,1}} = P_t^{\text{load,c}} \quad (\text{A10})$$

式中： P_t^{grid} 、 P_t^{mico} 分别为从配电网、其他综合能源微网获取的电功率； P_t^{PV} 、 P_t^{WT} 分别为微网内部的光伏、风机发电量； V_t^{grid} 、 V_t^{mico} 分别为从天然气管网、其他微网获取的天然气体积； $P_t^{\text{load,e}}$ 、 V_t^{load} 、 $P_t^{\text{load,h}}$ 、 $P_t^{\text{load,c}}$ 分别为为微网内的电、气、热、冷负荷。

(3) 设备运行约束。

$$P_{\min}^{\text{CF}} \leq P_t^{\text{CF}} \leq P_{\max}^{\text{CF}} \quad (\text{A11})$$

$$\Delta P_{\min}^{\text{CF}} \leq P_t^{\text{CF}} - P_{t-1}^{\text{CF}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{CF}} \quad (\text{A12})$$

$$P_{\min}^{\text{CCHP,e}} \leq P_t^{\text{CCHP,e}} \leq P_{\max}^{\text{CCHP,e}} \quad (\text{A13})$$

$$\Delta P_{\min}^{\text{CCHP,e}} \leq P_t^{\text{CCHP,e}} - P_{t-1}^{\text{CCHP,e}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{CCHP,e}} \quad (\text{A14})$$

式中： P_{\min}^{CF} 、 P_{\max}^{CF} 和 $P_{\min}^{\text{CCHP,e}}$ 、 $P_{\max}^{\text{CCHP,e}}$ 分别为燃煤机组和燃气轮机的出力最小值、最大值； $\Delta P_{\min}^{\text{CF}}$ 、 $\Delta P_{\max}^{\text{CF}}$ 和 $\Delta P_{\min}^{\text{CCHP,e}}$ 、 $\Delta P_{\max}^{\text{CCHP,e}}$ 分别为燃煤机组和燃气轮机的最小爬坡率、最大爬坡率。

附录 B

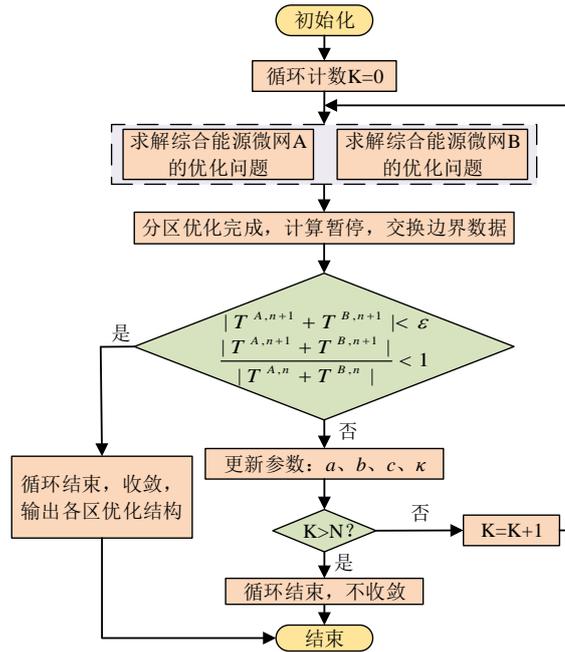
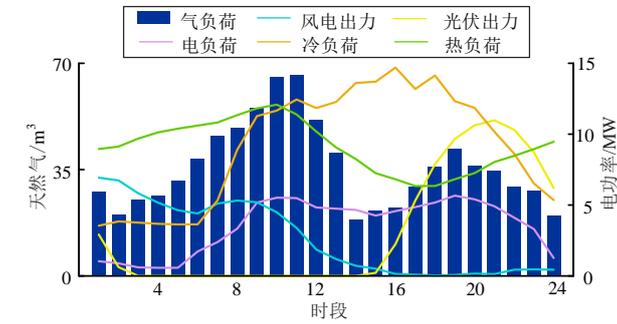
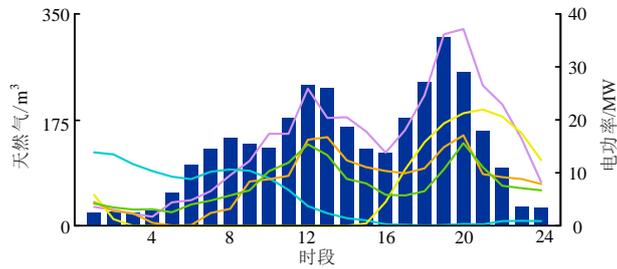


图 B1 分散优化调度求解流程图

Fig.B1 Flowchart of distributed optimal dispatching



(a) IEM A



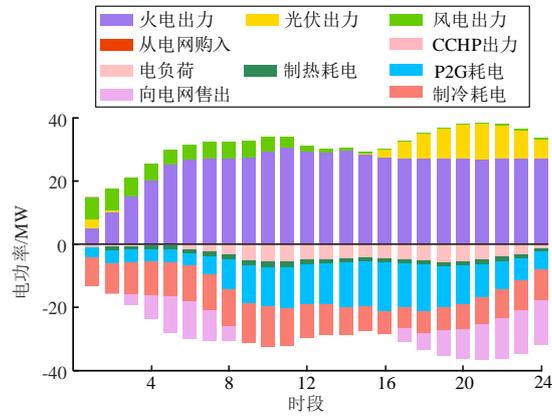
(b) IEM B

图 B2 新能源出力与冷热电负荷

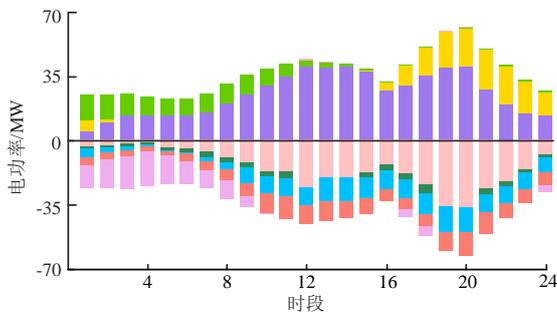
Fig.B2 New energy resources output and load demand curve

表 B1 系统参数
Table B1 System parameters

参数	数值	参数	数值
$\eta^{MT,r}$	0.4	$\alpha_{CF} (t/(MW h)^2)$	0.01
$P^{MT,max} (MW)$	50	$\beta_{CF} (t/(MW h))$	0.85
a_3	0.8264	$\alpha_{CCHP} (t/(MW h)^2)$	0.006
a_2	-2.334	$\beta_{CCHP} (t/(MW h))$	0.5
a_1	2.329	$\lambda (\$/t)$	10.56
a_0	0.1797	α	35%
η_L	0.05	l	20 t
η_{rec}	0.75	η_{CO_2}	0.9
$\eta^{MT,h}$	1.17	$\lambda_{BJ} (MW h/t)$	0.23
$\eta^{MT,c}$	1.45	$\lambda_{eH_2} (MW h/m^3)$	0.005
$\gamma_{NG}^{LHV} (kW h/m^3)$	9.78	$\lambda_{BJ} (\$/t)$	21-36
$B_{CF,e} (t/MW h)$	0.979	$\lambda_{FC} (\$/t)$	1.15
$B_{CCHP,e} (t/(MW h))$	0.392	$\lambda_{CH_4} (\$/m^3)$	0.7
$B_{CCHP,h} (t/GJ)$	0.058	$b_2 (t/(MW^2 h)^2)$	0.0008617
F_1	水冷取 1, 空气冷取 1.05	$b_1 (t/(MW h))$	-0.025063
β_p	0.075	$b_0 (t/h)$	33.10503
$\lambda_{eh} (GJ/(MW h))$	3.6	$\lambda_{coal} (\$/t)$	108.33



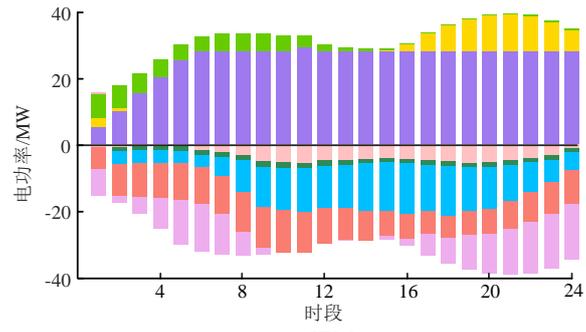
(a) IEM A



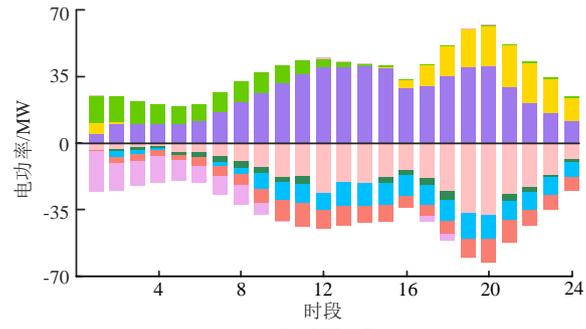
(b) IEM B

图 B3 分散优化调度各单元出力与能耗

Fig.B3 Electric quantity of various types of units in distributed optimal dispatching



(a) IEM A



(b) IEM B

图 B4 独立优化调度各单元出力与能耗

Fig.B4 Electric quantity of various types of units in independent optimal dispatching