

考虑电-碳-氢耦合的多综合能源微网-配电网 分布式优化运行^{*}

张子尚¹ 赵平^{1,2} 叶加乐¹ 李振兴^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室 宜昌 443002)

摘要: 为了充分发掘综合能源微网(IEM)的调度潜力,促进新型电力系统转型,提出了多综合能源微网接入配电网的协同分布式优化运行方法。首先,构建 IEM 模型,包括掺氢热电联产机组(CHP)、氢燃料电池(FC)和储氢的氢能的多类型应用,形成电-碳-氢耦合的综合能源微网,减少碳排放和充分挖掘碳捕集装置和氢能的调度潜力。然后,在单微网模型构建之后,针对多综合能源微网接入配电网问题,将综合能源微网和配电网看作不同子区,建立多综合能源微网接入配电网的分布式优化运行模型。并采用自适应步长的交替方向乘子法(ADMM)求解模型。最后,基于改进型 IEEE33 节点配电网的仿真测算表明,考虑电-碳-氢耦合的多 IEM 接入配网系统后系统调度成本减少了 10%,碳排放减少了约 65%,且采用分布式优化所得结果与集中式差距仅为 0.8%,验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 综合能源微网;碳捕集;分布式优化;电碳氢耦合;交替方向乘子法

中图分类号: TM732; TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4

Considering the electricity-carbon-hydrogen coupling, the multi-integrated energy microgrid connected to the distributed optimal operation of the distribution network

Zhang Zishang¹ Zhao Ping^{1,2} Ye Jiale¹ Li Zhenxing^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yi, Chang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Cascade Hydropower Station Operation and Control, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to fully explore the dispatching potential of integrated energy microgrid (IEM) and promote the transformation of new power system, a collaborative distributed optimal operation method for multi-integrated energy microgrid access to distribution network was proposed. Firstly, an IEM model was constructed, and the multi-type applications of hydrogen energy, including combined heat and power (CHP), hydrogen fuel cell (FC) and hydrogen storage, were constructed to form a comprehensive energy microgrid with electricity-carbon-hydrogen coupling. Reduce carbon emissions and exploit the full potential of carbon capture units and hydrogen dispatch. Then, after the construction of the single microgrid model, aiming at the problem of multi-integrated energy microgrid access to the distribution network, the integrated energy microgrid and the distribution network are regarded as different sub-regions, and the distributed optimal operation model of multi-integrated energy microgrid access distribution network is established. The alternative direction method of multipliers (ADMM) was used to solve the model. Finally, the simulation results based on the improved IEEE33-node distribution network show that the system scheduling cost is reduced by 10% and the carbon emission is reduced by about 65% after the multi-IEM access distribution network system considering the electricity-carbon-hydrogen coupling, and the difference between the results obtained by distributed optimization and the centralized one is only 0.8%, which verifies the effectiveness and superiority of the proposed method.

Keywords: integrated energy microgrid; carbon capture; distributed optimization; electro-hydrocarbon coupling; alternating direction multiplier method

收稿日期:2024-10-12

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52077120)项目资助

0 引言

近年来,在“双碳”背景和能源结构转型的驱动下^[1],新型电力系统应运而生,大量微网以综合能源微网(integrated energy microgrid, IEM)的形式接入配电网,有效地整合了区域能源,提高了内部能源自给率,缓解供电压力,提高可再生能源的就地消纳问题^[2-3],推动着新型电力系统向着“绿色低碳”转型。但是 IEM 接入数量的激增会对系统的优化方式带来挑战。因此,研究多综合能源微网“绿色清洁”的接入配电网以及其优化问题,具有重要意义^[4-5]。

为了实现综合能源微网“绿色清洁”地接入配网,应关注减少综合能源系统的碳排放量问题,从而实现低碳或零碳运行。目前,国内外专家学者针对综合能源微网中引入碳捕集系统(carbon capture system, CCS)以及电转气装置(power to gas, P2G)进行了许多研究。文献[6]构建了包含电热气多能协同的微电网模型,并在热电联产机组(combined heat and power, CHP)模型中加入了碳捕集系统和电转气装置,以降低碳排放。文献[7]考虑含碳捕集技术和甲烷化设备的综合能源微网分布式优化调度,在降低系统碳排放的同时也带来了经济效益。电转气包括电解制氢和甲烷化两个步骤,甲烷化的原料来源为 CCS 捕获的二氧化碳和电解制氢得到的氢气。其中,氢气是甲烷化的原料之一,且氢能具有高效、环保和可再生等优点,在 IEM 中引入氢能可以提高清洁能源在能源使用中的占比,实现碳减排,促进碳循环^[8]。但是电解制氢的速率与甲烷化的速率不匹配,氢能的充分应用问题受到了广泛关注。文献[9]提出了电制氢热系统、配电网和供热网协同优化调度模型。文献[10]针对电解制氢考虑了电解槽、压缩机储氢罐和电储能进行建模。上述文研究了在 IEM 中引入 CCS、P2G 装置并探索了氢能的多种应用,充分发掘了系统供能设备包括掺氢 CHP 机组,氢燃料电池(fuel cell, FC)等的协同运行以及调度能力。然而,它们仅涉及一到两个氢能应用场景,且大多数以提高可再生能源消纳率或运行经济性为目标对氢能设备进行调度,未能综合考虑电解槽、两阶段电解制氢中的制取甲烷过程、储氢和氢燃料电池的制氢-储氢-用氢全过程。

IEM 聚合一定范围内的分布式能源和负荷,进行统一调度。当区域内存在多个 IEM 并形成互联多微网系统, IEM 之间就会存在能量交互、能量传递等方面的困难,导致调度策略复杂化,因此给多 IEM 的优化运行研究带来挑战。文献[11]对各子微网中的小型能源发电和负荷需求进行随机概率建模,并采用粒子群优化算法求解最优经济调度成本。文献[12]提出计及经济性和综合能效的区域多微网多目标优化调度方法,建立了考虑经济性和综合能效两个目标的多目标优化调度模型。上述研究均采用集中式方法求解,集中式优化所有相关数据由系统收集和处理,虽然求解简单,但随着系统规模的扩大和运行

环境的复杂化,集中式算法面临模型复杂度高、计算负担大、数据隐私风险高等问题^[13-14]。相比之下,分布式优化通过协调多区域边界,实现了全局最优计算,提高了优化效率同时还可以使得每个子区域独立求解,保护区域隐私^[15]。文献[16]提出一种计及绿证-碳联合交易机制的多微网合作运行优化调度方法。文献[17]提出一种计及电-碳交易与综合贡献率的多微网合作运行优化策略。上述文献均通过分布式求解多微网互联系统的优化调度,构建了多微网合作运行框架,实现了微网之间电碳交易,降低多微网系统运行成本。但随着微网的规模不断扩大,仅考虑多微网互联系统优化运行,不利于提高系统的能源的利用率,供电可靠性和可再生能源接入率。上述文献研究多微网分布式优化运行问题,但较少涉及针对微网接入配网的分布式优化研究。随着微网接入配网数量的不断增加,配网的网架结构、负荷特性及供电方式均会发生显著变化,这导致系统复杂度提升,优化难度也随之增加。因此,对微网接入配网的优化问题进行深入研究显得尤为重要。

针对上述问题,本文围绕多综合能源微网接入配电网系统,主要研究了在综合能源微网中引入 CCS-两阶段 P2G-掺氢 CHP 构成考虑电-碳-氢耦合的综合能源微网问题;多综合能源微网接入配电网系统,并对其分布式求解问题。首先,建立了 IEM-配电网系统模型,该模型包含掺氢热电联产机组、氢燃料电池、电热氢储能系统、碳捕集装置以及两阶段 P2G(包括电解制氢阶段和甲烷制取阶段)等装置。在模型中,氢能的多种应用被充分考虑,如将制取的氢气用于氢燃料电池供电、作为掺氢热电联产机组的原料以及进行储氢,这些应用有效发挥了 IEM 的灵活运行优势。然后采用自适应步长的交替方向乘子法(alternative direction method of multipliers, ADMM)提高系统的求解速度。最终,得到含碳捕集装置和氢能多种应用的综合能源微网-配电网优化调度方案。该方案不仅实现了系统调度成本的显著降低(降低了 10%),还大幅减少了碳排放(减少了约 65%)。此外,通过对比分布式优化结果与集中式优化结果,发现两者之间的差距仅为 0.8%,这充分验证了所提调度方案的可行性、经济性和环保性。

1 考虑电-碳-氢耦合的多综合能源微网-配电网系统框架

本文研究的考虑电-碳-氢耦合多综合能源微网-配电网系统框架如图 1 所示,以配电网作为主体框架,在其节点上接入发电机和 IEM。其中, IEM 中包含燃气锅炉(gas boiler, GB),风力发电机(wind turbine, WT),两阶段电转气装置, CCS 装置以及考虑氢能多种应用的掺氢热电联产机组,电解制氢装置和燃料电池,电热氢储能装置。

1)由电解槽生成的氢气,可以在系统中参与掺氢热电联产机组运行,氢燃料电池发电,储氢以及作为氢气原料

与 CCS 中捕集的反应生产甲烷。

2) 掺氢热电联产机组, 燃气锅炉等设备排出的 CO_2 会被碳捕集装置捕获, 处理后的 CO_2 传递到两阶段 P2G 设备中与电解槽制取的氢气反应合成天然气。

3) 系统中的发电设备可以供电给 CCS 和两阶段 P2G 设备使用。

配电网同 IEM 中的 CCS, 两阶段 P2G 装置和掺氢 CHP 等构成电-碳-氢耦合运行框架。

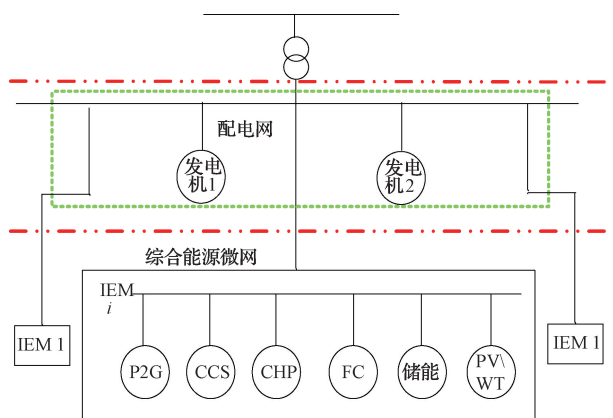


图 1 多综合能源微网-配电网系统框架

Fig. 1 Framework diagram of multi-integrated energy microgrid-distribution network system

1.1 综合能源微网主要设备模型

1) 加入 CCS 和 P2G 的掺氢热电联产机组

(1) CCS 数学模型

碳捕集装置实际功率包括运行功耗和基础功耗表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{CCS}}^t = P_{\text{ope}}^t + P_{\text{base}}^t \\ P_{\text{ope}}^t = \mu_{\text{CCS}} E_{\text{CCS}, \text{CO}_2}^t \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{CCS}^t 为 CCS 装置碳捕集功率; P_{base}^t 为基础功耗; P_{ope}^t 为运行功耗; μ_{CCS} 为捕集单位二氧化碳所需的电功率; $E_{\text{CCS}, \text{CO}_2}^t$ 为捕集的二氧化碳量。

(2) P2G 数学模型

两阶段电转气装置包括电解制氢和氢制甲烷阶段, 表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{H}_2, \text{P2H}}^t = \eta_{\text{e2H}} P_{\text{e}, \text{P2H}}^t \\ P_{\text{H}_2\text{G}}^{\text{out}} = \eta_{\text{H2G}} P_{\text{H}_2\text{G}}^{\text{in}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{H}_2, \text{P2H}}^t$ 、 $P_{\text{e}, \text{P2H}}^t$ 分别是电解生成 H_2 量和耗电量; $P_{\text{H}_2\text{G}}^{\text{out}}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{G}}^{\text{in}}$ 分别是产生甲烷功率和甲烷化耗氢量; η_{e2H} 、 η_{H2G} 分别为电解制氢和甲烷化的效率。

同时, 生产甲烷也会使用一定的电解槽功率, 表达式如下:

$$P_{\text{P2G}}^{\text{out}} = \eta_{\text{P2G}} P_{\text{P2G}}^t \quad (3)$$

式中: $P_{\text{P2G}}^{\text{out}}$ 、 P_{P2G}^t 分别为产生甲烷功率和电解槽耗电量; η_{P2G} 为 P2G 的转化效率。

甲烷化过程所需要的 CO_2 量来自于碳捕集电厂实际 CO_2 捕获量, 其表达式如下:

$$E_{\text{CO}_2, \text{H2G}}^t = \frac{P_{\text{H2G}}^{\text{out}} \times 3\,600}{L_{\text{CH}_4}} \rho_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

$$E_{\text{CCS}, \text{CO}_2}^t = E_{\text{CO}_2, \text{H2G}}^t + E_{\text{storage}}^t \quad (5)$$

式中: $E_{\text{CO}_2, \text{H2G}}^t$ 为 t 时刻微网生产甲烷需要的 CO_2 功率; L_{CH_4} 为单位体积天然气的热值; ρ_{CO_2} 为 CO_2 气体密度; E_{storage}^t 为 CO_2 封存量。式(5)表明甲烷化需要的 CO_2 和储存的 CO_2 全都来自 CCS, 完成了 CCS 和 P2G 的耦合。

(3) 掺氢热电联产机组数学模型

为了增加氢能的应用类型, 本文加入掺氢热电联产机组, 提高氢能使用效率同时减少了系统碳排放。

掺氢比为:

$$\theta_{\text{chp}}^t = \frac{P_{\text{H}_2, \text{chp}}^t}{L_{\text{H}_2}} \left/ \left(\frac{P_{\text{H}_2, \text{chp}}^t}{L_{\text{H}_2}} + \frac{P_{\text{CH}_4, \text{chp}}^t}{L_{\text{CH}_4}} \right) \right. \quad (6)$$

产电和产热功率为:

$$\begin{cases} P_{\text{chp}}^t = (P_{\text{H}_2, \text{chp}}^t + P_{\text{CH}_4, \text{chp}}^t) \eta_{\text{chp}}^p \\ H_{\text{chp}}^t = (P_{\text{H}_2, \text{chp}}^t + P_{\text{CH}_4, \text{chp}}^t) \eta_{\text{chp}}^H \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_{chp}^t 为掺氢比; $P_{\text{H}_2, \text{chp}}^t$ 为 t 时刻热电联产机组消耗氢气功率; $P_{\text{CH}_4, \text{chp}}^t$ 为 t 时刻热电联产机组消耗天然气功率; L_{H_2} 、 L_{CH_4} 分别为氢气和天然气热值; η_{chp}^p 、 η_{chp}^H 为燃气轮机的电效率和热效率; P_{chp}^t 、 H_{chp}^t 分别为燃气轮机的产电产热效率。

2) 燃气锅炉

燃气锅炉以产热为主, 当热电联产就无法满足热负荷时, 燃气锅炉补充供给热负荷, 其表达式如下:

$$H_{\text{GB}}^t = \eta_{\text{GB}} P_{\text{CH}_4, \text{GB}}^t \quad (8)$$

式中: H_{GB}^t 为 t 时刻产生的热功率; η_{GB} 为燃气锅炉热点转化效率; $P_{\text{CH}_4, \text{GB}}^t$ 为 t 时刻燃气锅炉消耗天然气功率。

3) 燃料电池

燃料电池可以将氢能转化为电能, 其表达式如下:

$$P_{\text{FC}}^t = \eta_{\text{FC}} P_{\text{FC}, \text{H}_2}^t \quad (9)$$

式中: P_{FC}^t 为 t 时刻燃料电池输出电功率; η_{FC} 为 t 时刻氢电转化效率; $P_{\text{FC}, \text{H}_2}^t$ 为 t 时刻燃料电池消耗氢气功率。

4) 综合能源微网碳配额和碳排放量

初始碳排放分配额由 CHP 与 GB 的传统机组碳排放分配额和 PV 与 WT 的新能源机组碳排放分配额两方面构成, 其表达式如下:

$$E_0 = \mu_c \sum_{t=1}^T (P_{\text{W}}^t + P_{\text{chp}}^t + H_{\text{GB}}^t) \quad (10)$$

式中: E_0 是给定的默认碳排放额; μ_c 是单位发电/发热功率给定的碳排放基准额度。

综合能源微网的碳排放量主要由 CHP 机组和燃气锅炉机组。且 CCS 可以捕获一部分二氧化碳, 则 IEM 的实际碳排放量为:

$$\begin{cases} E_{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T (E'_{\text{CO}_2, \text{CHP}} + E'_{\text{CO}_2, \text{GB}} - E'_{\text{CO}_2, \text{CCS}}) \\ E'_{\text{CO}_2, \text{CHP}} = \epsilon_1 (P'_{\text{chp}} + 0.15 \cdot H'_{\text{CHP}}) \\ E'_{\text{CO}_2, \text{GB}} = \epsilon_2 (0.2 \cdot H'_{\text{GB}}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $E'_{\text{CO}_2, \text{CHP}}$ 为 CHP 机组的碳排放量; $E'_{\text{CO}_2, \text{GB}}$ 为 GB 机组的碳排放量; ϵ_1 为 CHP 机组的碳排放系数; ϵ_2 为 GB 机组的碳排放系数。

1.2 碳交易机制

相关机构或者政策根据微网的新能源装机容量、燃气轮机、燃气锅炉装机容量等因素为每个微网分配一定的初始碳配额。如果微网的碳排放高于碳配额,会考虑向碳交易市场购买碳配额,如果微网碳排放小于碳配额,则会向碳交易市场出售碳配额,鼓励每个微网减少碳排放,提高自身收益。

1.3 综合能源微网-配电网系统供能框架

系统的供能框架如图 2 所示,掺氢燃气轮机通过燃烧天然气和氢气的混合燃气来产生高温蒸汽,带动发电机转子转动发电,产生的热量和燃气锅炉一起供给热负荷,二者产生的二氧化碳通过碳捕集装置收集,通过电转气装置制取甲烷,减少系统碳排放,减少系统购气量,减少成本。

2 考虑电-碳-氢耦合的多综合能源微网接入配电网分布式系统建模

上述提到的考电-碳-氢耦合的多综合能源微网-配电网系统,对系统中的综合能源微网,配电网以及二者之间的耦合进行建模,其中, IEM 和配电网通过联络线相连且联络线的功率一致。将配网与各个 IEM 分别视为不同的分区,以便后续使用 ADMM 算法,对多微网-配电网系统进行分布式求解。

2.1 综合能源微网模型

1) 目标函数

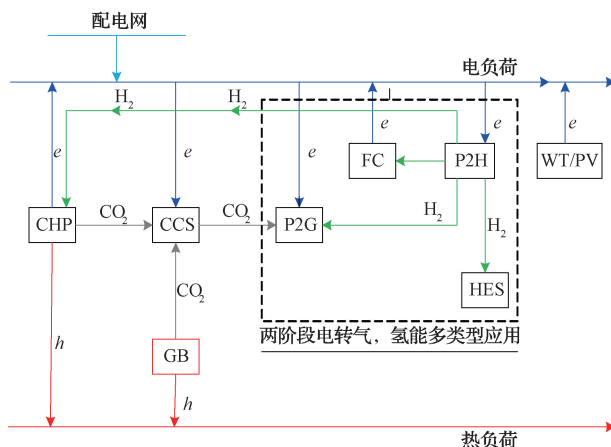


图 2 多综合能源微网-配电网系统供能图

Fig. 2 Energy supply diagram of multi-integrated energy microgrid-distribution network system

微网的目标函数包括 4 部分,分别为购气成本、运维成本、弃风弃光惩罚和碳交易成本。

$$F_{\text{MG}} = C_{\text{gas, buy}} + C'_{\text{chp}} + C_{\text{RE}} + C_{\text{CO}_2} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{gas, buy}}$ 、 C'_{chp} 、 C_{RE} 和 C_{CO_2} 分别为购气成本、运维成本、弃风弃光惩罚以及碳交易成本。

各个成本表达式如下:

$$C_{\text{gas, buy}} = \sum_{t=1}^T [c_{\text{buy}} P'_{\text{gas, buy}}] \quad (13)$$

式中: c_{buy} 为天然气单价; $P'_{\text{gas, buy}}$ 为 t 时刻购买天然气功率。

$$C'_{\text{chp}} = \sum_{t=1}^T [c_{\text{chp}} P'_{\text{chp}} + \delta_{\text{storage}} E'_{\text{storage}} + c_{\text{P2G}} P'_{\text{P2G}} + c_{\text{CCS}} P'_{\text{CCS}} + c_{\text{FC}} P'_{\text{FC}}] \quad (14)$$

式中: c_{chp} 为 CHP 机组运维成本系数; δ_{storage} 为储碳成本系数; c_{P2G} 为 P2G 运维成本系数; c_{CCS} 为 CCS 运维成本系数; c_{FC} 为运维成本系数。

$$C_{\text{RE}} = c_{\text{RE}} P_{\text{RE}} \quad (15)$$

式中: c_{RE} 为弃风弃光惩罚成本系数; P_{RE} 为弃风弃光量。

$$C_{\text{CO}_2} = \lambda_{\text{buy}}^{\text{CO}_2} E'_{\text{buy}} - \lambda_{\text{sell}}^{\text{CO}_2} E'_{\text{sell}} \quad (16)$$

式中: $\lambda_{\text{buy}}^{\text{CO}_2}$ 为购买单位碳排放额的价格; $\lambda_{\text{sell}}^{\text{CO}_2}$ 为卖出单位碳排放额的价格; E'_{buy} 、 E'_{sell} 分别为购买和售出的碳配额。

2) 约束条件

(1) 平衡约束

$$\begin{cases} P'_{\text{chp}} + P'_{\text{FC}} + P'_{\text{W}} + P'_{\text{ESS}} - P'_{\text{ESS}} + P'_{\text{MG}} = P'_{\text{load}} + P'_{\text{e, P2H}} \\ P'_{\text{H}_2, \text{P2H}} = P'_{\text{H}_2, \text{FC}} + P'_{\text{H}_2, \text{cha, t}} - P'_{\text{H}_2, \text{dis, t}} + P'_{\text{H}_2, \text{in}} + P'_{\text{H}_2, \text{chp}} \\ H'_{\text{chp}} + H'_{\text{GB}} + P'_{\text{H}} - P'_{\text{H}} = H'_{\text{load}} \\ P'_{\text{gas, buy}} = P'_{\text{CH}_4, \text{chp}} + P'_{\text{CH}_4, \text{GB}} \\ E_{\text{CO}_2} = E_0 + E'_{\text{buy}} - E'_{\text{sell}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P'_{MG} 为配网注入微网的联络线上的功率; P'_{buy} 为 IEM 向配网购电功率; P'_{sell} 为 IEM 向配网售电价格; P'_{load} 、 H'_{load} 分别表示 t 时刻电、热负荷量; E_0 为 IEM 的初始碳排放配额; E_{CO_2} 为 IEM 的总碳排放量; E'_{buy} 为购买碳排放额总量; E'_{sell} 为卖出碳排放额总量。式(17)为 IEM 的电热氢耦合平衡,公式依次表示电平衡、氢平衡、热平衡、气平衡和碳平衡。

(2) IEM 向配网传输功率限制

$$\begin{cases} P'_{\text{MG}} = P'_{\text{buy}} - P'_{\text{sell}} \\ 0 \leq P'_{\text{buy}} \leq P_{\text{buy}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P'_{\text{sell}} \leq P_{\text{sell}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: P'_{buy} 为 IEM 向 ADN 购电功率; P'_{sell} 为 IEM 向 ADN 售电价格。

(3) 电解制氢,热电联产机组,燃气锅炉约束

电解制氢最大功率和爬坡约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{\text{e, P2H}} \leq P_{\text{e, P2H}}^{\text{max}} \\ P_{\text{e, P2H}}^{\text{down}} \leq P'_{\text{e, P2H}} - P'_{\text{e, P2H}}^{t-1} \leq P_{\text{e, P2H}}^{\text{up}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{e, P2H}^{\max}$ 为电解设备出力上限; $P_{e, P2H}^{\text{down}}$ 、 $P_{e, P2H}^{\text{up}}$ 分别为爬坡约束下限和上限。

热电联产机组最大功率和爬坡约束为:

$$\begin{cases} P_{\text{chp}}^{\min} \leq P_{\text{chp}}^t \leq P_{\text{chp}}^{\max} \\ H_{\text{chp}}^t \leq H_{\text{chp}}^t \leq H_{\text{chp}}^t \\ P_{\text{chp}}^{\text{down}} \leq P_{\text{chp}}^t + H_{\text{chp}}^t - P_{\text{chp}}^{t-1} + H_{\text{chp}}^{t-1} \leq P_{\text{chp}}^{\text{up}} \end{cases} \quad (20)$$

燃气轮机掺氢比应在 20% 以内保证燃气轮机安稳运行, 即:

$$0 \leq \theta_{\text{chp}}^t \leq 20\% \quad (21)$$

式中: $P_{\text{chp}}^{\min}$ 、 $P_{\text{chp}}^{\max}$ 为热电联产机组电出力下限和上限; $H_{\text{chp}}^{\min}$ 、 $H_{\text{chp}}^{\max}$ 为热电联产机组热出力下限和上限; $P_{\text{chp}}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{chp}}^{\text{up}}$ 分别为爬坡约束下限和上限。

燃气锅炉最大功率和爬坡约束为:

$$\begin{cases} H_{\text{GB}}^{\min} \leq H_{\text{GB}}^t \leq H_{\text{GB}}^{\max} \\ H_{\text{GB}}^{\text{down}} \leq H_{\text{GB}}^t - H_{\text{GB}}^{t-1} \leq H_{\text{GB}}^{\text{up}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $H_{\text{GB}}^{\min}$ 、 $H_{\text{GB}}^{\max}$ 为燃气锅炉出力下限和上限; $H_{\text{GB}}^{\text{down}}$ 、 $H_{\text{GB}}^{\text{up}}$ 分别为爬坡约束下限和上限。

CCS、P2G 最大功率约束为:

$$\begin{cases} P_{\text{CCS}}^{\min} \leq P_{\text{CCS}}^t \leq P_{\text{CCS}}^{\max} \\ P_{\text{P2G}}^{\min} \leq P_{\text{P2G}}^t \leq P_{\text{P2G}}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{CCS}}^{\min}$ 、 $P_{\text{CCS}}^{\max}$ 为 CCS 出力下限和上限; $P_{\text{P2G}}^{\min}$ 、 $P_{\text{P2G}}^{\max}$ 为 CCS 出力下限和上限。

燃料电池最大功率和爬坡约束为:

$$\begin{cases} P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\min} \leq P_{\text{FC}, \text{H}_2}^t \leq P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\max} \\ P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\text{down}} \leq P_{\text{FC}, \text{H}_2}^t - P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{t-1} \leq P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\text{up}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\min}$ 、 $P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\max}$ 为燃料电池出力下限和上限; $P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{FC}, \text{H}_2}^{\text{up}}$ 分别为爬坡约束下限和上限。

(4) 新能源发电约束

$$0 \leq P_{\text{RE}}^t \leq P_{\text{RE}}^{\max} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{RE}}^{\max}$ 为风机或光伏发电出力预测值。

(5) 储能约束

考虑到源荷不一致问题, 故引入储电、储热等设备来缓解。各储能模型相似, 故对其进行统一建模, 储氢罐数学模型如式(26), 其他储能设备模型类似。

$$\begin{cases} S_X^t = S_X^{t-1} + (P_X^{\text{cha}, t} \eta_X^{\text{cha}} - P_X^{\text{dis}, t} / \eta_X^{\text{dis}}) \Delta t \\ 0 \leq P_X^{\text{cha}, t} \leq u_X^{\text{ch}} P_X^{\text{chmax}} \\ 0 \leq P_X^{\text{dis}, t} \leq u_X^{\text{dis}} P_X^{\text{dismax}} \\ S_X^{\min} \leq S_X^t \leq S_X^{\max} \\ S_X^0 = S_X^T \\ u_X^{\text{dis}} + u_X^{\text{ch}} \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_X^{\text{cha}, t}$ 、 $P_X^{\text{dis}, t}$ 分别为储能储存和释放功率; S_X^t 为储能容量; η_X^{cha} 、 η_X^{dis} 分别为储能充能效率和释放效率; u_X^{ch} 、 u_X^{dis} 分别表示储能设备充、放电的 0~1 变量; P_X^{chmax} 、 P_X^{dismax} 分别为储电设备充、放电功率最大值; $S_X^{\min}$ 、 $S_X^{\max}$ 分别表示储电设备储能容量的最小值和最大值; S_X^0 、 S_X^T 分

别为储电设备在整个调度周期的始末值。若储能为氢储能, 其中 X 为 H_2 , 热电同理分别为 ESS、H。

2.2 配电网模型

1) 约束条件

(1) 潮流约束

使用 DistFlow 模型表示配网的潮流, 并参考文献[18]进行线性化处理。

$$\begin{cases} P_{ij}^t = P_{\text{load}, j}^t - P_{\text{gen}, j}^t + P_{\text{DN}, j}^t + P_j^t \\ Q_{ij}^t = Q_{\text{load}, j}^t - Q_{\text{gen}, j}^t + Q_j^t \\ V_i = V_j + \frac{P_{ij}^t r_{ij} + Q_{ij}^t x_{ij}}{V_0} \end{cases} \quad (27)$$

式中: P_{ij}^t 为 t 时刻节点 i, j 之间的有功功率; $P_{\text{load}, j}^t$ 为 t 时刻节点 j 负荷功率; $P_{\text{gen}, j}^t$ 为 t 时刻节点 j 发电机有功功率; $P_{\text{DN}, j}^t$ 为 t 时刻微网注入配网的联络线上的功率; P_j^t 为 t 时刻节点 j 有功功率; Q_{ij}^t 为 t 时刻节点 i, j 之间的无功功率; $Q_{\text{load}, j}^t$ 为 t 时刻节点 j 负荷功率; $Q_{\text{gen}, j}^t$ 为 t 时刻节点 j 发电机无功功率; Q_j^t 为 t 时刻节点无功功率; V_i 、 V_j 分别为 t 时刻节点 i, j 电压; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路 ij 的阻抗和导纳。

(2) 微型燃气轮机约束

$$\begin{cases} P_{\text{gen}, i}^{\min} \leq P_{\text{gen}, i}^t \leq P_{\text{gen}, i}^{\max} \\ Q_{\text{gen}, i}^{\min} \leq Q_{\text{gen}, i}^t \leq Q_{\text{gen}, i}^{\max} \\ R_{\text{gen}, i}^{\min} \leq P_{\text{gen}, i}^t - P_{\text{gen}, i}^{t-1} \leq R_{\text{gen}, i}^{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $Q_{\text{gen}, i}^t$ 表示节点 i 在 t 时刻的微燃机无功功率; $P_{\text{gen}, i}^{\min}$ 、 $P_{\text{gen}, i}^{\max}$ 、 $Q_{\text{gen}, i}^{\min}$ 、 $Q_{\text{gen}, i}^{\max}$ 、 $R_{\text{gen}, i}^{\min}$ 、 $R_{\text{gen}, i}^{\max}$ 分别表示微燃机有功、无功以及爬坡功率的下限和上限。

(3) 配网与微网功率传输约束

$$P_{\text{DN}, i}^{\min} \leq P_{\text{DN}, i}^t \leq P_{\text{DN}, i}^{\max} \quad (29)$$

式中: $P_{\text{tie}, i}^t$ 表示配网 IEM 之间在 t 时刻的联络线传输功率; $P_{\text{tie}, i}^{\min}$ 、 $P_{\text{tie}, i}^{\max}$ 分别为联络线的最小、最大传输功率。

(4) 节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i^t \leq V_i^{\max} \quad (30)$$

式中: V_i^t 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值, $V_i^{\min}$ 、 $V_i^{\max}$ 分别为节点电压幅值的下限和上限。

2) 目标函数

配网的优化目标是使得总成本 F_{DN} 最低, 考虑配网的发电成本和向上级电网的购电成本。

$$F_{\text{DN}} = \min \sum_{t=1}^T (C_{\text{grid}}^t + C_{\text{gen}}^t + C_{\text{tran}}^t) \quad (31)$$

$$C_{\text{grid}}^t = c_{\text{grid}}^t P_{\text{grid}}^t \quad (32)$$

$$C_{\text{gen}}^t = \sum_{g \in G} (a_g (P_{\text{gen}}^t)^2 + b_g P_{\text{gen}}^t + c_g) \quad (33)$$

$$C_{\text{tran}}^t = c_{\text{tran}} P_{\text{DN}, i}^t \quad (34)$$

式中: C_{gen}^t 为配网发电成本; P_{gen}^t 表示节点 i 的微燃机有功功率; a_g 、 b_g 、 c_g 分别表示微燃机成本系数; G 接入配网的微燃机集合; C_{grid}^t 配网向主网购电成本; c_{grid}^t 为向主网购电价格; P_{grid}^t 为 t 时刻向主网购电功率; C_{tran}^t 为联络线传

输成本; c_{tran} 联络线传输成本系数。

2.3 综合能源微网和配网的耦合

采用联络线的方式来连接 IEM 与配网, 联络线应该满足一致性约束, 一致性约束倾向于保证主动配电网与微电网之间的联络线功率保持一致, 在进行分布式管理的时候, 配电网的输出功率必须等于微电网的输入功率, 即:

$$P'_{\text{DN},i} + P'_{\text{MG}} = 0 \quad (35)$$

每一个 IEM 的决策都应是独立, 不包含与其他 IEM 的信息交互, ADN 和 IEM 之间只共享联络线信息, 以确保操作的一致性。因此, 可以以完全分散的方式解决多微电网配电系统的协同运行问题, 同时保持各子系统运营商的独立决策。

2.4 多综合能源微网接入配电网分布式优化模型

由式(35)可得, IEM 与配网之间通过有功功率进行耦合一致性约束, 区域之间需要交互边界有功功率即可。综上, 可得出多 IEM 接入配电网的分布式优化模型为:

$$\min(F_{\text{DN}} + \sum_{i \in G} F_{\text{MG},i}) \quad (36)$$

$$\text{s. t.} \quad G(x) \leq 0 \quad (37)$$

$$H(x) = 0 \quad (38)$$

$$x_{i0} = x_{i0}^* \quad (39)$$

式(36)表示系统总目标函数, 其中包括配网成本 F_{DN} 和微网成本 $F_{\text{MG},i}$, G 表示多微网集合。式(37)表示不等式约束, 对应式(18)~(25)和式(28)~(30)。式(38)表示等式约束, 对应式(17)和(27)。式(39)表示各个子区域的一致性约束, 主要为了后面 ADMM 算法的全局变量更新, x_{i0} 是各个区域的交互量, 本文中, 多个微网通过配电网和联络线相连接, 所以优化中的全局变量是联络线上有功功率($P'_{\text{DN},i}, P'_{\text{MG}}$)。 x_{i0}^* 是随着迭代更新的全局变量。

3 基于自适应步长 ADMM 算法的多综合能源微网-配电网分布式优化模型求解

3.1 基于快速自适应步长 ADMM 算法的综合能源微网接入配电网分布式优化模型解法

分布式优化的求解算法, ADMM 算法是当前研究中较为常见的分布式优化算法。由于传统的 ADMM 算法求解需要迭代子问题, 求解速度一般, 故采用自适应步长 ADMM 算法对其惩罚因子项进行修正^[19]。

对于分布式框架下的优化模型, 将一致性约束通过拉格朗日乘子添加到目标函数中, 转化为增广拉格朗日函数, 其表达式如下:

$$\begin{cases} L = \min(F_{\text{DN}} + \sum_{i \in G} F_{\text{MG},i}) + \\ \sum_{i \in T} \sum_{i \in G} (\beta_i^m (x_i - x_i^*) + \frac{\eta^m}{2} \|x_i - x_i^*\|_2^2) \\ \text{s. t.} \quad \text{式(37) ~ (39)} \end{cases} \quad (40)$$

式中: β_i^m 表示第 m 次迭代拉格朗日乘子; η^m 表示第 m 次迭代惩罚因子。然后求解各个微网和配网之间的交互

量 x_i 。

全局变量更新为:

$$x_{i0}^* = \frac{1}{2\eta} (\beta_{i0} + \beta_{0i}) + \frac{1}{2} (P_{\text{DN},i} + P_{\text{MG},i}) \quad (41)$$

对偶变量更新为:

$$\beta_i^{m+1} = \beta_i^m + \eta^m (x_i^m - x_i^{*m}) \quad (42)$$

在算法计算过程中, 随着不断迭代, 原始残差和对偶残差逐渐收敛, 最终得到最优解, 其计算公式分别为:

$$r^m = \|x_{i0}^m - x_{i0}^{*m}\| \quad (43)$$

$$s^m = \|x_{i0}^{*m} - x_{i0}^{*m-1}\| \quad (44)$$

式中: r^m 为原始残差; s^m 为对偶残差。算法的叠迭代终止条件为 $r^m \leq \epsilon_r$ 且 $s^m \leq \epsilon_s$ 。

由于传统的 ADMM 算法求解速度过慢, 本文采用一种根据残差改进自适应调整惩罚因子的方法来提高算法的计算速度, 其步长改变规则如下:

$$\eta^{m+1} = \begin{cases} \eta^m / (1 + \lg(s^m / r^m)), & s^m \leq 0.5r^m \\ \eta^m / (1 + \lg(r^m / s^m)), & s^m \geq 5r^m \\ \eta^m, & \text{其他} \end{cases} \quad (45)$$

3.2 分布式优化求解算法步骤

综上, 采用快速自适应步长 ADMM 算法求解综合能源微网-配电网协同分布式优化流程如下。

步骤 1) 初始化迭代算子以及联络线变量处置, 迭代次数 $m=0$ 。

步骤 2) 各区域提取联络线耦合变量参考值, 并行求解子区调度模型, 获取第 m 次迭代的联络线耦合变量结果, 计算第 m 次迭代的原始残差及对偶残差。

步骤 3) 检验各区域计算结果是否满足收敛判据, 若收敛则迭代结束, 输出调度结果; 否则, 将第 m 次迭代计算结果作为第 $m+1$ 次迭代参考值, 根据式(41)、(42)更新全局变量和对偶变量, 置迭代次数 $m = m+1$, 返回步骤 2)。

流程如图 3 所示。由上述流程可知, 各子区的模型求解、迭代算子计算及残差求取均在本区域进行, 仅在进行联络线变量参考值提取和残差收敛判断时与相邻区域进行交互, 交互信息少, 通信需求低, 保护了各区域的信息隐私, 实现了区域内部自治, 区域之间分散协调的分布式优化。

4 算例分析

本文以 3 个综合能源微网接入 IEEE33 节点配网系统为例, 验证加入碳捕集系统和氢能多类型应用后采用分布式优化方法的有效性。每个微网都包括 CCS、掺氢 CHP、燃气锅炉、风力发电机、光伏设备、两阶段 P2G 装置、燃料电池、电热氢储能, 同时考虑电负荷需求响应。微网销售价格如表所示, 设备参数如表 1 所示。在 IEEE33 节点配网的 10、20、30 节点接入了 3 个上述综合能源微网, 3、9、16 节点接入微燃机, 具体结构如图 4 所示。在计算最优潮流中电压基准值取 12.66 kV, 基准功率取

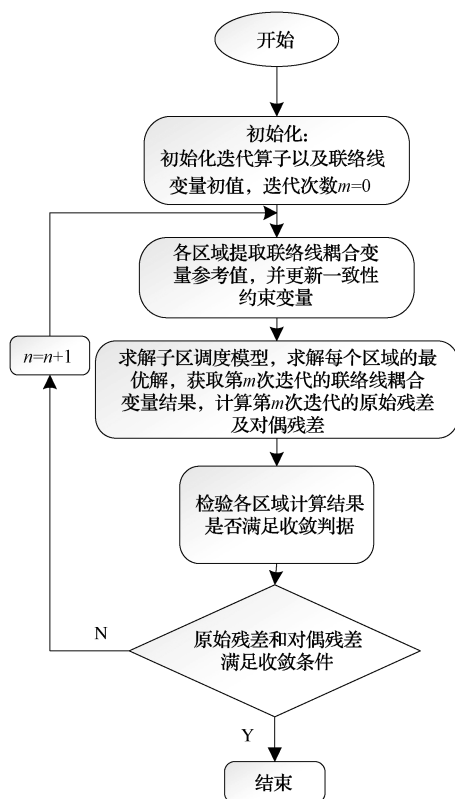


图3 多 IEM-配电网分布式求解流程

Fig.3 Flow chart of multi-IEM-distribution network distributed solution

100 MVA。天然气价格为 0.5 元/ m^3 , 电压范围为 $[0.95\text{p.u.}, 1.05\text{p.u.}]$ 耦合变量和乘数的初始值都设置为 0。本文算例在 MATLAB R2018b 环境下, 采用 YAMLP 调用 Gurobi 求解器求解。

各个微网负荷情况如图 5 所示, 其中, 综合能源微网 A 接入风力发电机, 综合能源微网 B、C 接入光伏设备, 交易电价采用分时电价。

为了验证加入碳捕集系统和氢能多类型应用后采用分布式优化方法的有效性、经济性和环保性, 设置了 5 种场景进行对比分析, 各场景分别从碳捕集设备, 氢制甲烷, 燃料电池, 掺氢燃气轮机设备是否投入运行来进行设置。方案如表 2 所示, 其中 $\checkmark$ 表示投入使用, $\times$ 表示不投入使用。

4.1 考虑电-碳-氢耦合的系统运行分析

1) 考虑电-碳-氢耦合的系统经济性分析

为了分析考虑电-碳-氢耦合后对系统的影响, 对场景 1~5 分别进行仿真分析, 5 种场别对应的 IEM 成本以及系统总成本对应表 3~5 所示。

由表 3~5 可知, 对比场景 1 和场景 2, 在加入碳捕集和储能装置后, 碳排放减少了 60% 左右, 同时相较于场景 1, 碳交易收益提升了 2 443.81 元, 这是因为场景 2 可以出售多余的碳配额来获取碳交易收益, 随着碳排放量的减

表 1 IEM 以及配电网参数表参数设置

Table 1 IEM and distribution network parameter table parameter settings

设备	参数/kW
IEM 与配电网交互功率限值	1 000
配电网与主网交互功率限值	2 000
CHP	出力范围 $[0, 400]$
	爬坡速率限制 $[120, 120]$
	运行碳排放系数 1.2
CCS	掺氢比 0.7
	固定能耗 50
	功耗范围 $[50, 400]$
FC	处理单位 CO_2 运行能耗为 0.2
	效率 0.87
GB	出力范围 $[0, 300]$
	产热碳排放系数 0.8
P2G	出力范围 $[0, 300]$
	电转氢效率 0.85
	甲烷化效率 0.7
电储能	容量范围 $[100, 600]$
	初始容量 200
	最大充放功率 200
	充放电效率 0.9
热储能	容量范围 $[30, 270]$
	初始容量 150
	最大充放功率 75
储氢	充放电效率 0.9
	容量范围 $[150, 1\ 500]$
	初始容量 750
	最大充放功率 500
发电机	充放电效率 0.9
	接入位置 3、9、16
	最小功率 0、0、0
	最大功率 400、500、600

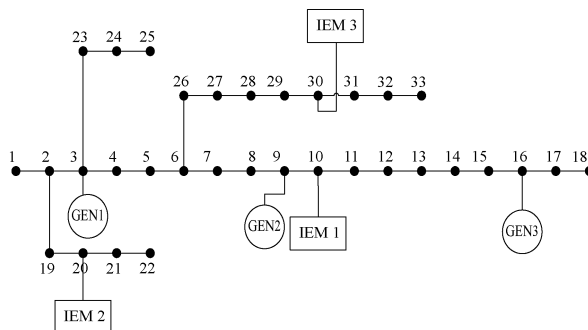


图4 IEEE33 节点示意图

Fig.4 IEEE33 node diagram

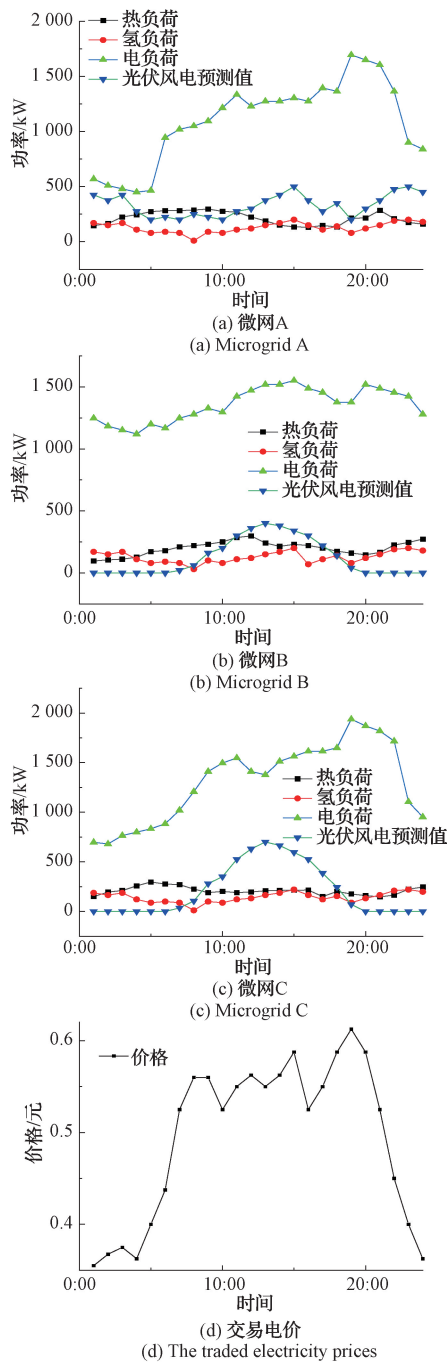


图5 各个微电网负荷以及交易电价

Fig.5 Individual microgrid loads and traded electricity prices

少,碳交易收益会不断提升,鼓励各个微网减少其碳排放。同时场景1存在较大弃风弃光问题,但由于碳捕集设备消耗能量较大,故可以消纳多余的风光发电量,减少弃风弃光成本。体现其环保性和经济性。

对比场景2、场景3和场景4,场景2在捕集二氧化碳后,还要考虑碳封存成本,而场景3考虑甲烷化,场景3虽然引入了甲烷化设备,维护成本提高了,但是比减少的碳

表2 5种不同的场景设置

Table 2 Five different scene settings

场景	碳捕集	氢制甲烷	燃料电池	掺氢燃气轮机
1	×	×	×	×
2	✓	×	×	×
3	✓	✓	×	×
4	✓	✓	✓	×
5	✓	✓	✓	✓

表3 不同场景的微网A经济收益

Table 3 Economic benefits of microgrid A in different scenarios

场景	购气 /元	运维 /元	弃风弃光 /元	碳交易 /元	碳排放量 /t
1	1 584.75	1 835.57	1 514.58	-1 356.6	1 3370.52
2	1 575.71	1 893.03	378.17	1 087.14	5 326.03
3	1 494.14	1 984.99	394.55	1 151.01	5 112.99
4	1 460.30	2 084.99	0	1 198.65	4 953.21
5	1 440.14	2 127.54	0	1 201.97	4 841.84

表4 不同场景的微网B经济收益

Table 4 Economic benefits of microgrid B in different scenarios

场景	购气 /元	运维 /元	弃风弃光 /元	碳交易 /元	碳排放量 /t
1	1 320.71	1 837.18	1 347.77	-1 950.8	12 744.34
2	1 069.29	1 872.64	485.47	541.58	4 517.18
3	1 232.36	1 954.58	257.93	595.86	4 336.49
4	1 185.93	2 075.88	0	601.18	4 318.76
5	1 179.42	2 128.79	0	606.08	4 221.64

表5 不同场景的C微网经济收益

Table 5 Economic benefits of microgrid C in different scenarios

场景	购气 /元	运维 /元	弃风弃光 /元	碳交易 /元	碳排放量 /t
1	1 544.72	1 834.14	1 275.35	-1 594.2	12 141.1
2	1 453.07	1 900.07	457.87	686.24	4 681.43
3	1 431.76	1 988.85	308.46	742.41	4 494.17
4	1 427.13	2 166.08	0	705.26	4 618.02
5	1 440.14	2 127.54	0	723.20	4 416.44

交易成本和弃风弃光低,总体收益还是提高。场景3虽然只考虑氢制取甲烷这一个氢能源应用类型,但是使用的仍然是原本未能消纳的新能源发电,提高了能源利用率。场景4引入燃料电池,氢能可以得到充分利用,同时氢燃料电池可以代替一部分燃气轮机发电,进一步减少系统碳排

放,体现其环保性。

对比场景 4 和场景 5 进一步引入掺氢 CHP 机组,再一次增加氢气的利用类型,实现了热氢耦合,同时系统碳排放进一步降低。由于采用燃气掺氢,进一步减少了燃气轮机和燃气锅炉的甲烷使用,且氢气热值比甲烷高,系统会优先考虑绿色掺氢 CHP 机组参与发电发热,进一步提高发电发热效率,减少了甲烷的购买,提高能源利用,更进一步体现经济性和环保性。

表 6 所示为不同运行场景下微网总体收益,可以看到,随着碳捕集设备和氢能多类型应用的增加,系统总成

本逐渐减少且碳排放也在减少,可再生能源的消纳能力提高,场景 4 和场景 5 可以做到完全消纳。虽然配网总成本随着场景的改变会变高,这是因为随着设备的增加,微网容量也随之提高,将微网看作配网的负荷,相应的联络线上的功率也会变大,由于联络线传输成本考虑在配网成本,随着联络线功率提高,配网总成本也随之提高。同时随着场景的推进,微网成本也会逐渐下降,碳排放量也会减少,而且微网下降的成本配网提高的成本大,总体成本降低了 10%,体现本文所提场景的经济性和环保性,验证场景的合理性。

表 6 不同场景总收益

Table 6 Total revenue for different scenarios

场景	购气/元	运维/元	弃风弃光/元	碳交易收益/元	微网成本/元	配网成本/元	碳排放量/t
1	4 450	5 506	4 137	-4 901.6	18 996	41 122	38 255.9
2	4 331	5 665	1 321	2135.34	9 183	43 527	14 524.6
3	3 898	6 458	960	2 489.29	8 828	44 672	13 943.6
4	4 073	6 301	0	2 505.39	7 869	46 157	13 889.9
5	4 024	6 366	0	2 531.18	7 859	46 253	13 479.9

2)考虑电-碳-氢耦合的系统调度分析

采用场景 5 进行优化调度分析,微网与配网联络线功率如图 6 所示,各个综合能源微网的调度情况如图 7 所示。

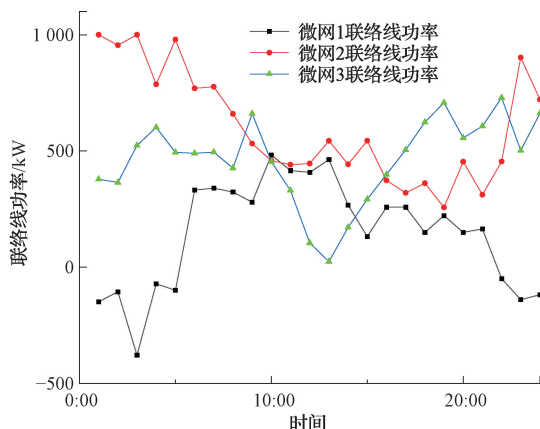


图 6 联络线功率

Fig. 6 Power of the contact line

由图 7(a)~(c)可以看出,对于微网 A,由于 0:00~6:00 和 21:00~24:00 时,负荷较低,风电出力较高,电储能进行充电,微网配网之间的联络线出现功率返送,PCCS 和 PP2G 提高功率,为了消纳多余风电。同时 6:00 以后,随着负荷升高,联络线功率开始正向流动,19:00~21:00 时,由于负荷过高,通过储能放电来平衡源荷,21:00 以后负荷回归正常,继续向储能充电。

对于微网 B,负荷功率一直较为平缓,0:00~6:00,由于光伏出力为 0,故提高联络线功率,以平衡源荷关系,

9:00~15:00,光伏发电量较大,相应的联络线功率也随之相对减小,以消纳多余光伏。

对于微网 C,0:00~9:00 随着负荷增大,联络线功率也随之增大,同时还对储能进行充电,9:00~18:00,虽然光伏出力较大,但是微网系统可以通过提高 PCCS 功率来对其完全消纳,而 19:00~21:00,没有光伏,设备爬坡功率有限,储能进行放电。

由图 7(d)~(f)可知,系统热功率主要由掺氢 CHP 机组供应,这是因为掺氢燃气轮机相比与燃气锅炉产生单位数量的热能,碳排放更小,总体成本也会更低。储热罐主要起调节作用,当热负荷较高时,CHP 机组最大功率产热不足以满足负荷,则燃气锅炉也进行产热,来供应热负荷,当热负荷较低时,CHP 机组生产的多余热负荷可以储存到储热罐内,可以在热负荷偏高时释放,以平衡源荷。

由图 7(g)~(i)可知,由于系统氢能全部由电转气即电解制氢供给,而电转气装置的功率由系统电功率图中可以得到,可以看到氢气产量与图 7(a)~(c)中电转气装置功率趋势大体一致;系统中制氢功率大时,多余产生的氢气会储存在氢储能中,当系统制氢功率不足时,储氢罐会释放储存的氢气。

4.2 自适应步长 ADMM 算法收敛性分析

采用场景 5 情况下系统分别采用集中式运行,传统 ADMM 算法以及加速 ADMM 算法求解。收敛精度设置为 2.5×10^{-2} 。表 5 为集中式运行,传统 ADMM 算法和加速 ADMM 算法下系统的成本、误差、求解时间、迭代次数。

表 7 和图 8 所示为上述 3 种情况下,系统成本收敛情况,可以看到,通过 ADMM 算法和自适应 ADMM 算法得

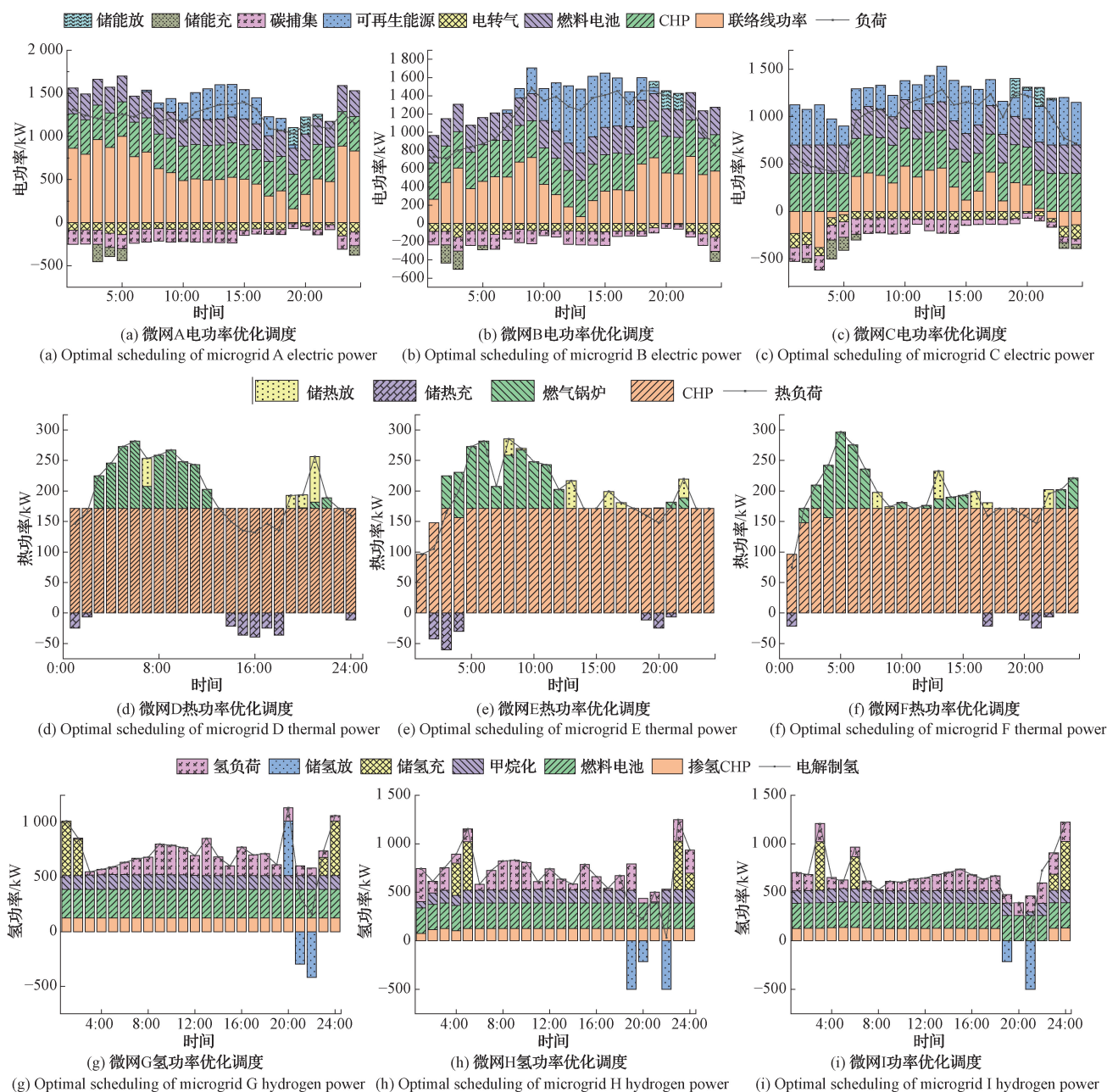


图7 场景5情况下系统优化调度

Fig. 7 System optimization scheduling diagram in scenario 5

到的总成本基本相同,误差均在0.1%以内,但是,集中式运行需要将系统内所有数据统一计算,无法保证微网之间的隐私性独立性和安全性,不利于每个微网运营商独立决策,通过分布式运行,微网之间仅通过联络线功率,就可以完成全局优化运行,减轻了实际运行中,占用较多时间的通信负担,保护了信息隐私。

虽然两种分布式运行方案的计算时间高于集中式运行,但是分布式运行的优点不在于此,相较于集中式运行,分布式运行实现了决策自主性和数据隐私性,且子微网可以在本地计算后,将相关数据上传至配网,且各个子微网

表7 不同算法对比

Table 7 Comparison of different algorithms

运行方式	迭代次数	求解时间/s	成本/元	误差/%
集中式	—	—	48 981.14	—
ADMM	68	149.3	48 941.24	0.08
自适应 ADMM	24	20.8	48 965.42	0.03

的计算可以同步进行。而且本文所使用的自适应 ADMM 算法与传统的 ADMM 算法相比,通过自适应步长的方

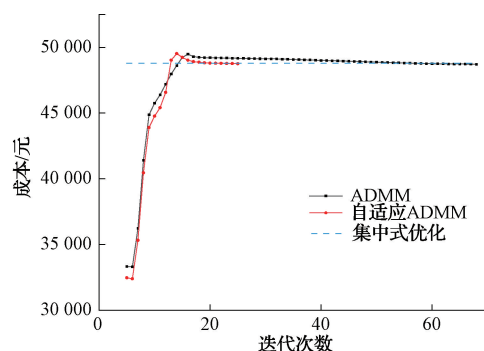


图8 分布式算法与集中式算法成本对比

Fig. 8 Cost comparison between distributed and centralized algorithms

法,将迭代次数从68次优化到24次,计算时间也大大缩减,提高了计算率。图9所示为自适应步长ADMM算法中原始残差和对偶残差的收敛情况,可以看到,随着迭代次数的增加,在迭代8进行第8次时,自适应ADMM算法的收敛速度就优于传统ADMM算法。

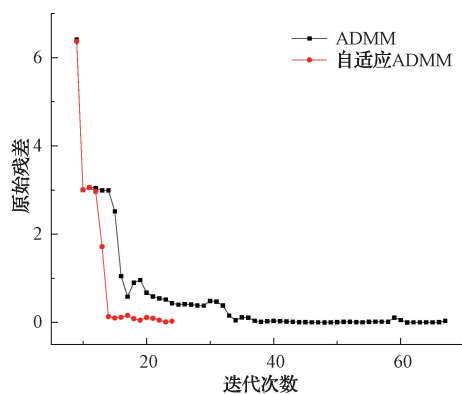
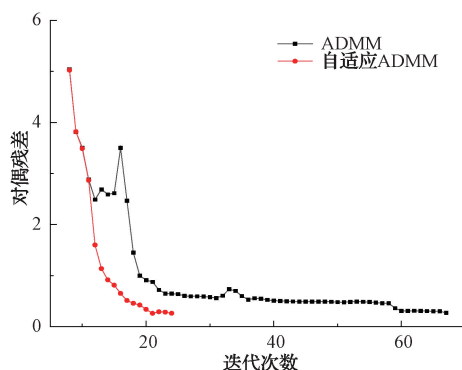
(a) 原始残差收敛情况
(a) Convergence of the original residuals(b) 对偶残差收敛情况
(b) Convergence of dual residuals

图9 原始残差和对偶残差对比

Fig. 9 Comparison of raw residuals and dual residuals

5 结论

本文提出了一种考虑电-碳-氢耦合的多综合能源微网接入配电网的协同分布式优化方法,通过3个综合能源

微网接入IEEE33节点配电系统,验证了方法的有效性。得到如下结论。

1)综合能源微网中引入CCS-两阶段P2G-掺氢CHP构成考虑电-碳-氢耦合的综合能源微网,该运行方法下CCS可以将捕集的 CO_2 供给电转气装置,电转气装置包括电解制氢和甲烷化步骤,并在甲烷化过程中引入氢能多类型应用。实现了碳循环,促进了碳减排,IEM运行成本减少了10%,IEM碳排放量减少了65%,提升了系统的经济效益,对可再生能源的消纳能力,发掘系统调度潜力,提高氢能利用率。

2)本文所提分布式优化调度模型相较于集中式优化运行,结果几乎相同,成本误差仅为0.08%,但是采用分布式优化调度,可以在仅交互少量边界信息的情况下,完成全局优化调度,保证了各个微网的隐私,配网微网由不同的运营商管理时,可以减少隐私泄露,有利于每个微网进行独立决策。

3)采用了自适应步长的ADMM算法进行求解,与传统ADMM相比自适应步长的ADMM算法得到的总成本基本相同,误差均在0.1%以内,且仅迭代24次用时20.8s即可求解成功,提高了求解效率。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG ZH G, KANG CH Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 石浩杰,熊厚博,张笑演,等. 考虑多微网接入的气电-交通耦合系统分布式规划方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 66-76.
SHI H J, XIONG H B, ZHANG X Y, et al. Distributed planning method for gas-electricity and transportation coupling system considering multi-microgrid integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(17): 66-76.
- [3] 孟国情,邱晓燕,张明珂,等. 计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度[J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 138-145.
MENG G Q, QIU X Y, ZHANG M K, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering flexible loads and battery swapping station [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(14): 138-145.
- [4] 鄢仁武,林丽婵. 考虑P2HH和二维激励需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(11): 1-6.

- 2023, 42(12): 77-85.
- YAN R W, LIN L CH. Optimal dispatch of integrated energy system considering P2HH and two-dimensional incentive demand response. [J] Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(12): 77-85.
- [5] 陈乐飞, 朱自伟, 王凯, 等. 基于混合博弈的配电网与多综合能源微网优化运行[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2229-2243.
- CHEN L F, ZHU Z W, WANG K, et al. Optimal operation of distribution networks and multiple integrated energy microgrids based on mixed game theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2229-2243.
- [6] 吴锦领, 楼平, 管敏渊, 等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2711-2723.
- WU J L, LOU P, GUAN M Y, et al. Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric nash bargaining [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2711-2723.
- [7] 李玉婷, 彭敏放. 考虑碳捕集与甲烷化的综合能源微网分布式优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 46-53.
- LI Y T, PENG M F. Distributed optimal dispatching of integrated energy microgrid considering carbon capture and methanation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 46-53.
- [8] ROSEN M A, KOOHI-FAYEGH S. The prospects for hydrogen as an energy carrier: An overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems [J]. Energy, Ecology and Environment, 2016, 1(1): 10-29.
- [9] LI J A, LIN J, SONG Y H, et al. Operation optimization of power to hydrogen and heat (P2HH) in ADN coordinated with the district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1672-1683.
- [10] 马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 25-39.
- MA T F, PEI W, XIAO H, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 25-39.
- [11] 吴红斌, 孙瑞松, 蔡高原. 多微网互联系统的动态经济调度研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1426-1433.
- WU H B, SUN R S, CAI G Y. Dynamic economic dispatch for multi-microgrid interconnection system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1426-1433.
- [12] 王守相, 吴志佳, 袁霜晨, 等. 区域多微网系统的多目标优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 14-20.
- WANG SH X, WU ZH J, YUAN SH CH, et al. Method of multi-objective optimal dispatching for regional multi-microgrid system[J] Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(5): 14-20.
- [13] 叶宇剑, 吴奕之, 胡健雄, 等. 市场环境下智能配用电系统分层协同优化运行: 研究挑战、进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2078-2097.
- YE Y J, WU Y ZH, HU J X, et al. Hierarchical coordinated optimization for power distribution and consumption system operation in a market environment: Challenges, progress and prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2078-2097.
- [14] 凡航, 徐葳, 范晓昱, 等. 隐私计算在新型电力系统中的应用分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 187-199.
- FAN H, XU W, FAN X Y, et al. Application analysis and prospect of privacy-preserving computation in new power system[J]. Automation of Electric power system, 2023, 47(19): 187-199.
- [15] CHEN X, ZHAI J Y, JIANG Y N, et al. Decentralized coordination between active distribution network and multi-microgrids through a fast decentralized adjustable robust operation framework[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023. DOI: 10.1016/J.SEGAN.2023.101068.
- [16] 蔺红, 马越, 战鹏帆. 计及绿证-碳交易的多微网合作运行优化调度[J/OL]. 控制工程, 1-13.
- LIN H, MA Y, ZHAN P F. Optimal scheduling of multi-microgrid cooperative operation considering green certificate-carbon trading [J/OL]. Control Engineering of China, 1-13.
- [17] 张忠会, 熊骁跃, 万昶, 等. 计及电-碳交易与综合贡献率的多微网合作运行优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3258-3268.
- ZHANG ZH H, XIONG X Y, WAN CH, et al. Multi-microgrids cooperative operation optimization

- strategy considering electricity-carbon trading and comprehensive contribution rate[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3258-3268.
- [18] YE H, GAYME D F, LOW S H, Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1656-1663.
- [19] 张世旭, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 基于自适应步长 ADMM 的配电网分布式鲁棒优化调度策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 81-93.
- ZHANG SH X, MIAO SH H, YANG W CH, et al. Distributed robust optimal dispatch for active distribution networks based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 81-93.

作者 简 介

张子尚(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与优化。

E-mail: 1069831117@qq.com

赵平, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

E-mail: zp1975@126.com