

考虑灵活性资源的含氢能源微网优化调度

万秋婷¹, 李军祥^{1,2}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年7月1日

摘要

为保证能源可持续供应, 缓解全球变暖问题, 可再生能源快速发展, 对电力系统的调节能力提出了更高要求。针对系统可调节资源不足、能源利用率低的问题, 引入电氢双向转换装置和多元储能资源, 建立了灵活性资源参与的能源微网优化模型, 采用Gurobi求解器进行求解, 并对比了不同运行场景的调度结果。仿真结果表明, 在考虑电氢转换和电动汽车的调度结果中, 微网的运行成本降低了5.60%, 碳排放量减少了30.88%。考虑电制氢有助于实现能源梯级利用, 电动汽车作为储能资源参与微网调度, 在满足用户行程需求的前提下, 可以缓解微网调峰压力, 降低运行成本。通过电-热-氢-气多能源协同, 提升了新能源消纳率, 优化了系统经济与环境效益。

关键词

微网, 灵活性资源, 电氢双向转换, 电动汽车

Optimal Scheduling of Energy Microgrid Containing Hydrogen Considering Flexible Resources

Qiuting Wan¹, Junxiang Li^{1,2}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 27th, 2025; accepted: Jun. 24th, 2025; published: Jul. 1st, 2025

Abstract

In order to ensure sustainable energy supply and alleviate global warming, the rapid development of renewable energy has put forward higher requirements on the regulation capacity of the power

文章引用: 万秋婷, 李军祥. 考虑灵活性资源的含氢能源微网优化调度[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(4): 1-13.

DOI: 10.12677/orf.2025.154188

system. In view of the problems of insufficient adjustable resources and low energy utilization rate of the system, the electricity-hydrogen bidirectional conversion device and multi-energy storage resources are introduced, and an energy microgrid optimization model with flexible resources participating is established. The Gurobi solver is used to solve the problem, and the scheduling results of different operation scenarios are compared. The simulation results show that in the scheduling results considering the electricity-hydrogen conversion and electric vehicles, the operation cost of the microgrid was reduced by 5.60% and the carbon emissions were reduced by 30.88%. Hydrogen production from electricity helps to realize the cascade utilization of energy. And as energy storage resources, electric vehicles participate in microgrid scheduling, which can alleviate the pressure of microgrid peak regulation, and reduce operating costs on the premise of meeting the needs of users. Through the multi-energy coordination of electricity-heat-hydrogen-gas, the consumption rate of new energy is improved, and the economic and environmental benefits of the system are optimized.

Keywords

Microgrid, Flexible Resources, Electricity-Hydrogen Bidirectional Conversion, Electric Vehicles

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

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

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



Open Access

1. 引言

为了应对能源危机和温室效应问题,建设清洁低碳的新型能源体系成为了重要趋势。可再生能源快速发展,据国家能源局数据,2024年,全国可再生能源发电新增装机3.73亿千瓦,同比增长23%,全国可再生能源发电量约占全部发电量的35%,已成为能源供应和经济社会低碳转型的重要支撑。而风力、光伏等新能源发电具有随机性和波动性,给电网安全稳定运行带来了挑战,对系统的调节能力提出了更高要求。随着能源间的耦合性逐渐加强,能源微网可以连接供给侧和需求侧的多样化能源,是提高新能源消纳能力、实现系统高效运行的重要方式。现有文献考虑需求响应[1]-[4]、储能[5]-[7]、多能源耦合机制[8]-[12]等方面展开研究,为能源微网的稳定运行提供了有力支持。

氢能是一种清洁的二次能源,具有能量密度高、可以长期存储、方便运输等优势,且随着氢气制备、存储、利用等多个环节的技术发展,电氢耦合应用得到了广泛的关注。在《氢能产业发展中长期规划(2021~2035年)》中,提到了“因地制宜拓展氢能应用场景,推动氢能在交通、储能、发电、工业等领域的多元应用”。目前,学者们已经对氢能参与的能源系统优化运行开展了相关研究[13]-[18]。氢能具有灵活的能量转换与储存能力,是能源协调、提升系统可靠性与经济性的关键要素。氢储能作为新型储能形式,具备存储规模大、清洁无污染、长周期调节能力等优势,成为应对可再生能源波动、实现可持续发展的关键方法[19][20]。同时,为了保持能源系统的动态平衡,可以深入挖掘用户参与特点。电动汽车等新型清洁负载在用户需求中的占比不断增大,电动汽车电池作为储能资源,为电力系统灵活调节提供了更多选择。文献[21][22]等基于电动汽车等可控资源,提出了微网优化调度方案,以降低运行成本,减小对电网的冲击。Mei[23]等建立了含电动汽车的微电网优化模型,采用多目标权重法更好地平衡经济性和环保性两个目标。张家美[24]等考虑了光-氢-车在配电网规划中的协同应用策略,总结了城市配电网规划过程中面临的资源灵活性评估等问题。通过加强电动汽车与电网融合互动,可以缓解清洁能源接入和电动汽车大规模充电需求对电力系统造成的波动,起到“削峰填谷”的作用,推动电动汽车与能源转型协同发展。

上述文献分别对氢能利用、电动汽车参与系统协调优化进行了研究,但同时考虑电氢转换和电动汽车作为灵活性资源参与微网协同调度的研究较少。因此,基于分布式发电设备的特点和能量交互,本文建立了考虑电-热-氢-气的能源微网优化模型,讨论了电氢双向转换装置(Electricity-Hydrogen Bidirectional Conversion Device, EHBC)和电动汽车(Electric Vehicle, EV)等灵活性资源的影响,结合储氢罐、蓄热器两种储能设备,为微网提供了充足的可调度资源,促进了可再生能源消纳,有效降低了微网运行成本和碳排放,实现能源可持续发展。

2. 能源微网系统运行架构

本文考虑的能源微网系统架构如图1所示,主要由分布式发电设备(风力、光伏发电机组和热电联产机组)、电氢双向转换装置(含储氢罐)、储能设备和负荷构成。基于可逆固体氧化物电池技术,引入了具有电解池、燃料电池两种运行模式的电氢双向转换装置,将制氢和发电功能集成于一体,同时配置了储氢罐。在用户侧考虑电、热两种负荷类型,电动汽车根据充、放电价格和充电需求参与微网调度。为了便于管理,EV的电能交互均在微网内的充电桩进行,充电桩中的电能可以供给多个EV用户使用。在微网系统中有电、热、氢、天然气能量的流动和转换,能量流之间相互影响,氢能协调了电、热能的平衡。基于通信技术的进步,在能源设备连接线上安装智能表计,进行能量和信息的交互,可以根据每个时段微网的用能需求进行能量管理和设备维护。

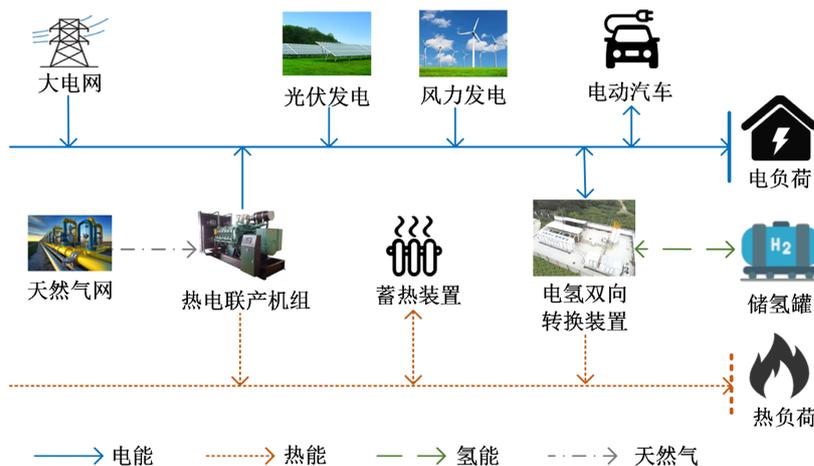


Figure 1. Energy microgrid system architecture
图1. 能源微网系统架构

3. 含氢能源微网优化模型

3.1. 灵活性资源模型

随着新能源的占比增加,对系统灵活性的需求不断提高。本文在微网中配置了灵活性储能资源、电-氢双向转换装置,同时由于电动汽车大规模普及和类储能特性,展现出调节潜力,在系统中考虑了电动汽车的参与分析灵活性调节能力。

(1) 电氢双向转换装置

EHBC通过切换电解池(Electrolyzer, EL)、燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HC)两种工作状态,完成电制氢、氢转电的双向能量转换,相比传统技术,有效提升了效率。当风、光伏发电富余时,电能通过电解池转化为氢能储存到储氢罐,而用电高峰时,可以利用存储的氢气发电。模型可以表示如下:

$$\begin{cases} m'_{EL} = P'_{EL} \eta_{EL} / q_{H_2}, & \chi' = EL \\ Q'_{EL} = P'_{EL} \eta_{EL,h}, \\ P'_{HC} = q_{H_2} m'_{HC} \eta_{HC,e}, & \chi' = HC \\ Q'_{HC} = q_{H_2} m'_{HC} \eta_{HC,h}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, m'_{EL} 为制氢量; Q'_{EL} 是 EL 状态下的产热功率; P'_{EL} 是 t 时的电解功率; q_{H_2} 是氢气的热值; η_{EL} 、 $\eta_{EL,h}$ 分别是制氢、产热效率; P'_{HC} 是 t 时 HC 的发电功率; Q'_{HC} 是产热功率; m'_{HC} 为消耗的氢气量; $\eta_{HC,e}$ 、 $\eta_{HC,h}$ 分别是电、热转换效率; χ' 表示 EHBC 在 t 时的工作状态, 同一时刻只能处于一种工作状态。

(2) 电动汽车

电动汽车具有跨时空特性, 不仅可以转移负荷时序, 还能进行反向供电, 其快速响应特性和存储能力为系统的灵活性调节提供了重要支撑。EV 用户根据用能需求进行充、放电操作, 结合电池能量水平、充放电功率和时间等数据, 将具有相似规律的 EV 视为集群, 在满足用户的正常出行需求的情况下建立 EV 的等效储能动态容量如下:

$$E^t = (1 - \alpha_{EV}^{loss}) E^{t-1} + \left(\eta_{cha} P'_{cha} - \frac{P'_{dis}}{\eta_{dis}} \right) \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$E^{\min} \leq E^t \leq E^{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq P'_{cha} \leq P_{cha}^{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P'_{dis} \leq P_{dis}^{\max} \quad (5)$$

$$P'_{cha} + P'_{dis} \leq 1 \quad (6)$$

$$E^{le} \geq E^{ex} \quad (7)$$

其中, E^t 、 E^{t-1} 分别是 EV 在 t 、 $t-1$ 的容量; α_{EV}^{loss} 是电池的自耗率; P'_{cha} 、 P'_{dis} 分别为 EV 在 t 时的充、放电功率; η_{cha} 、 η_{dis} 为充、放电效率; Δt 为充放电时间间隔; E^{\max} 、 E^{\min} 分别是 EV 电量的最大、最小值; P_{cha}^{\max} 、 P_{dis}^{\max} 分别是 EV 的最大充、放电功率; E^{le} 表示 EV 离开微网充电桩时的电池容量; E^{ex} 表示期望电量。

(3) 储能设备

储氢罐(Hydrogen Storage, HS)是 EHBC 中配置的氢能储存设备, 在电能供应不足时可以供给氢能用于发电。蓄热器(Thermal Storage, TS)可以缩小系统内热能供应和需求之间的差距, 在热负荷低时储存热量, 在热负荷高时释放热量。储能设备的容量与自耗率、充放能量有关, 每个时段储能设备的容量要满足上下限约束, 模型如下所示:

$$E'_{HS} = (1 - \alpha_{HS}^{loss}) E'^{t-1}_{HS} + \left(\eta_{HS,in} m'_{in} - \frac{m'_{out}}{\eta_{HS,out}} \right) \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$E^t_{TS} = (1 - \alpha_{TS}^{loss}) E^{t-1}_{TS} + \left(\eta_{TS,in} Q'_{in} - \frac{Q'_{out}}{\eta_{TS,out}} \right) \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$E^{\min}_{HS} \leq E^t_{HS} \leq E^{\max}_{HS} \quad (10)$$

$$E^{\min}_{TS} \leq E^t_{TS} \leq E^{\max}_{TS} \quad (11)$$

式中, E'_{HS} 、 E^t_{TS} 分别是储氢罐、蓄热器在 t 时的储能容量; E'^{t-1}_{HS} 、 E^{t-1}_{TS} 分别是 $t-1$ 时的储氢罐、蓄热器容量; α_{HS}^{loss} 、 α_{TS}^{loss} 分别为储氢罐、蓄热器的自耗率; m'_{in} 、 m'_{out} 是 t 时储氢罐的输入、输出氢能; Q'_{in} 、 Q'_{out}

分别是蓄热器存入、放出的热功率; $\eta_{HS,in}$ 、 $\eta_{HS,out}$ 分别为充、放氢效率; $\eta_{TS,in}$ 、 $\eta_{TS,out}$ 分别是充、放热效率; E_{HS}^{max} 、 E_{HS}^{min} 分别是储氢罐容量的上、下限; E_{TS}^{max} 、 E_{TS}^{min} 分别是蓄热器容量的上、下限。

(4) 热电联产机组

热电联产(Combined Heat and Power, CHP)机组可以燃烧天然气产生电能,同时利用余热向用户供热,是能源系统中连接电、气、热能的重要耦合设备,有效提高了能源利用率。CHP 机组的发电功率、产热功率与天然气热值有关,为保持系统稳定,机组运行时需要满足爬坡约束,其数学模型如下所示:

$$P_{CHP}^t = G_{CHP}^t q_g \eta_{CHP,e} \quad (12)$$

$$Q_{CHP}^t = G_{CHP}^t q_g \eta_{CHP,h} \quad (13)$$

$$\Delta P_{CHP}^{t,\min} \leq P_{CHP}^t - P_{CHP}^{t-1} \leq \Delta P_{CHP}^{t,\max} \quad (14)$$

式中: P_{CHP}^t 和 Q_{CHP}^t 是 t 时刻 CHP 机组输出电功率、输出热功率; G_{CHP}^t 为 t 时刻 CHP 机组消耗的天然气; q_g 为天然气热值; $\eta_{CHP,e}$ 、 $\eta_{CHP,h}$ 分别为发电效率、制热系数; $\Delta P_{CHP}^{t,\max}$ 、 $\Delta P_{CHP}^{t,\min}$ 分别是 CHP 机组发电出力爬坡上下限。

3.2. 微网优化模型

微网运行过程中的成本 C_{mg} 主要包含设备的运行维护成本 C_{op} ,从大电网和天然气网的购能成本 C_b ,激励电动汽车用户参与微网调度灵活充放电的成本 C_{ev} 。同时,为降低系统碳排放量,采用无偿分配方式进行初始碳配额分配,微网系统实际的碳排放主要来源于 CHP 机组利用的天然气和向大电网购电(假设所购电力都是火力发电),在实际碳排放量和碳配额之间存在差异时,产生碳排放成本 C_{ca} 。

$$C_{mg} = C_{op} + C_b + C_{ev} + C_{ca} \quad (15)$$

$$C_{op} = \sum_{t=1}^T \sum_{d \in D} c_d P_d^t, D = \{PV, WT, CHP, EHBC, HS, TS\} \quad (16)$$

$$C_b = \sum_{t=1}^T (p_e^t P_{grid}^t + p_g^t G_{grid}^t) \quad (17)$$

$$C_{ev} = \sum_{t=1}^T ((P_{dis}^t + p_{ev}^t) P_{dis}^t - p_{cha}^t P_{cha}^t) \quad (18)$$

$$C_{ca} = p_{ca} \sum_{t=1}^T ((\varepsilon_f - \varepsilon_{f,0}) P_{grid}^t + (\varepsilon_g - \varepsilon_{g,0}) G_{CHP}^t) \quad (19)$$

式中, c_d 为设备的单位运行维护成本; P_d^t 为设备实际出力; D 为微网中的设备集合; p_e^t 为分时电价; p_g^t 为天然气的单价; P_{grid}^t 为购电功率; G_{grid}^t 为购入的天然气量; p_{cha}^t 、 p_{dis}^t 分别是电动汽车单位充、放电价格; p_{ev}^t 是激励 EV 放电的单位成本; p_{ca} 为单位碳价; ε_f 、 ε_g 是大电网火力发电、消耗天然气的实际碳排放因子; $\varepsilon_{f,0}$ 和 $\varepsilon_{g,0}$ 是外购电力、消耗天然气的碳配额系数; T 为调度周期内总时段。

(1) 电功率平衡约束

$$P_{PV}^t + P_{WT}^t + P_{HC}^t + P_{CHP}^t + P_{grid}^t + P_{dis}^t = L_e^t + P_{cha}^t + P_{EL}^t \quad (20)$$

式中, P_{PV}^t 、 P_{WT}^t 分别是光伏、风力发电功率; L_e^t 为 t 时刻的电负荷。

(2) 热功率平衡约束

$$Q_{CHP}^t + Q_{EL}^t + Q_{HC}^t + Q_{out}^t - Q_{in}^t = L_h^t \quad (21)$$

式中, L_h^t 是 t 时刻的热负荷。

(3) 微网从大电网、天然气网购能的范围约束

$$0 \leq P_{grid}^t \leq P_{grid}^{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq G_{grid}^t \leq G_{grid}^{\max} \quad (23)$$

式中, P_{grid}^{\max} 、 G_{grid}^{\max} 分别是购入电功率、天然气的最大值。

为验证含氢能源微网在消纳风光出力、推动多能互补降碳中的作用, 以系统运行成本最小为目标, 构建了优化模型, 协调能源供应和转换, 制定合理的调度策略, 模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & C_{mg} \\ \text{s.t.} \quad & (1) \sim (14), (20) \sim (23) \end{aligned} \quad (24)$$

3.3. 模型求解

基于上述分析, 考虑微网内灵活性资源的利用和功率平衡等约束, 以最小运行成本调动系统灵活调节能力, 构建了混合整数线性规划模型如式(24)所示。模型的求解流程如图 2 所示。通过 Yalmip 工具箱和 Gurobi 求解器进行求解。

(1) 输入风力、光伏发电和微网电、热负荷的预测数据, 初始化不同储能的容量。(2) 把设备出力、储能充放功率和电动汽车的充放电功率作为决策变量, 考虑碳排放, 以最小化微网的运行成本为目标, 优化系统运行计划。

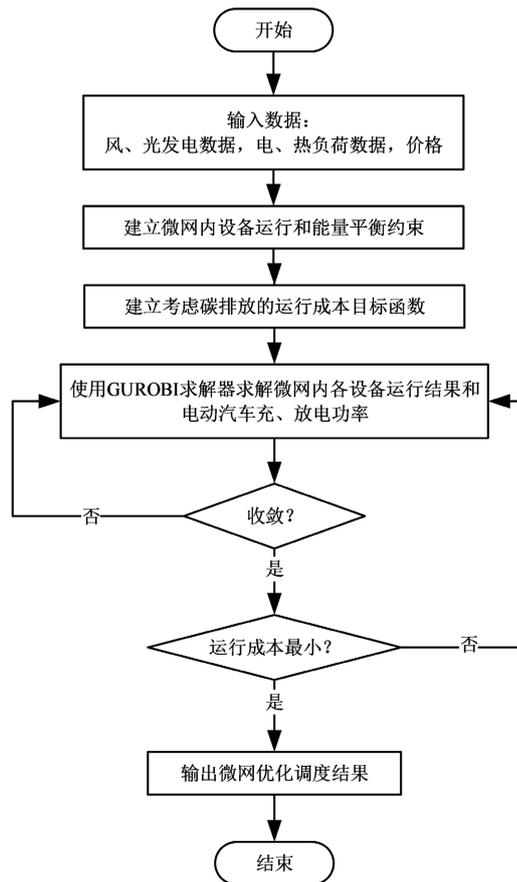


Figure 2. Model solving process

图 2. 模型求解流程

4. 仿真分析

4.1. 参数设置

参考相关文献, 分别由下面的方法生成微网风力、光伏发电和电负荷、热负荷预测数据见图 3。采用正弦平方曲线模拟光照变化, 叠加天气的影响生成光伏发电数据; 参考文献[25], 基于威布尔分布生成风速, 通过分段函数计算并考虑预测误差生成风电机组出力; 在电负荷基础值上考虑早晚高峰波动生成电负荷; 由温度变化生成供暖需求, 结合生活热水的早晚使用高峰生成热负荷。

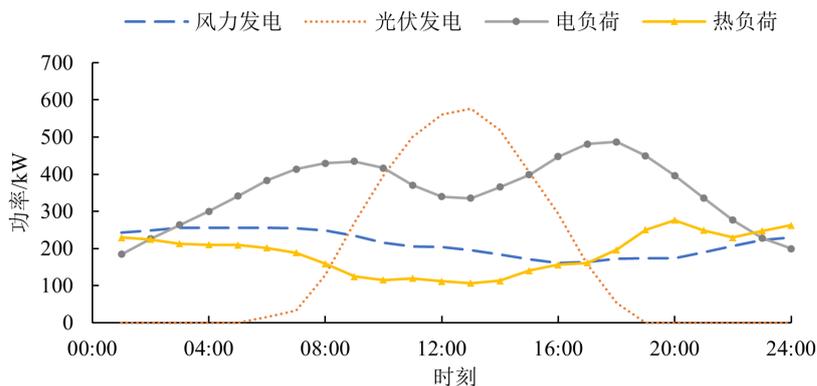


Figure 3. Wind and solar power generation and load forecasting curves of microgrid
图 3. 微网风、光发电及负荷预测曲线

参考文献[26], 以居民电动汽车作为需求侧灵活储能资源, 假设微网内电动汽车的规模为 50 辆, 考虑早晚行程信息, 通过蒙特卡洛法抽样得到电动汽车的起始充电时刻和充电时长, 从而得到日基础充电负荷。为保证电动汽车用户的基本用车需求, EV 在行程期间不参与充放电, 且电量随行程减少。结合文献和实际运行情况, 设置各设备参数如表 1, 分时电价和充、放电价格见表 2, T 取 24。通过仿真实验发现, 调整储能额定容量、分布式发电机组的功率约束参数可以影响系统调度方案, 在不同的场景下这些参数是可以优化的。

Table 1. Parameters of each device

表 1. 各设备参数

参数	数值	参数	数值
$\eta_{EL}、\eta_{EL,h}$	0.70、0.20	$\varepsilon_{f,0}/(\text{kg/kWh})$	0.79
$\eta_{HC,e}、\eta_{HC,h}$	0.60、0.30	$\varepsilon_f/(\text{kg/kWh})$	0.98
$\eta_{CHP,e}、\eta_{CHP,h}$	0.30、0.50	$\varepsilon_{g,0}/(\text{kg/m}^3)$	1.70
$q_{H_2}/(\text{kWh/m}^3)$	3.54	$\varepsilon_g/(\text{kg/m}^3)$	1.89
$q_g/(\text{kWh/m}^3)$	10.70	$\eta_{cha}、\eta_{dis}$	0.95
$p_g/(\text{元/m}^3)$	3	$\eta_{HS,in}、\eta_{HS,out}$	0.90
$P_{cha}^{max}、P_{dis}^{max}/(\text{kW})$	400	$\eta_{TS,in}、\eta_{TS,out}$	0.90
$E^{max}/(\text{kWh})$	1200	$\alpha_{HS}^{loss}、\alpha_{TS}^{loss}、\alpha_{EV}^{loss}$	0.001、0.002、0.005

Table 2. Time of use electricity price and charging/discharging electricity price
表 2. 分时电价和充、放电价

时段	分时电价/(元/kWh)	充、放电价格/(元/kWh)
谷(23:00~24:00, 00:00~06:00)	0.37	0.35/0.10
平(06:00~09:00, 14:00~18:00)	0.82	0.75/0.50
峰(09:00~14:00, 18:00~23:00)	1.35	1.20/0.90

4.2. 仿真结果与分析

为了验证模型的有效性, 构建了 4 种运行场景, 如表 3 所示, 为了显示电氢转换设备和 EV 参与产生的影响, 在场景 2、3 中分别考虑这两个因素并获得微网调度结果, 在场景 4 中同时考虑电氢能源转换和 EV 参与, 从成本、碳排放量等角度对不同场景下的调度结果进行了对比分析。

Table 3. Four scenarios
表 3. 四种场景

场景	不考虑电氢转换和 EV 参与	电氢转换	EV 参与
1	√		
2		√	
3			√
4		√	√

(1) 微网经济性和碳排放分析

不同场景下微网的运行经济情况见表 4, 可以看到, 同时考虑电氢转换和 EV 的参与(对比场景 1、4), 微网的运行成本降低了 276.82 元(5.60%), 风、光发电完全消纳。对比场景 1、2, 在考虑电氢能源转换的情况下, 微网内的能源转换更加灵活, 向外购能减少, 微网的运行成本降低, 风、光发电消纳率提高了 24.28%。对比场景 1、3, 因为有 EV 用户参与充放电的收益, 微网的运行成本降低了 410.47 元, 风、光消纳率也有一定上升, 说明协调微网中的 EV 有助于平衡电能供需, 提高微网经济运行效果。

Table 4. Operation results of microgrid in different scenarios
表 4. 不同场景下微网的运行结果

场景	微网运行成本/元	设备运维成本/元	购能成本/元	电动汽车参与成本/元	风、光发电消纳率/%
1	4940.78	2152.21	2772.92	-	61.89
2	4702.58	2587.36	2103.87	-	86.17
3	4530.31	2156.26	2716.54	-357.10	68.60
4	4663.96	2754.61	1959.14	-59.72	100

不同场景下微网的碳排放情况见表 5, 在包含电氢转换和 EV 参与的场景 4 中碳排放量减少了 551.46 kg (30.88%)。只考虑电氢能源转换的情况下, 碳排放量减少了 421.22 kg。而对比场景 3、4, 场景 3 没有电氢双向转换设备的运维成本, 只考虑 EV 参与的微网运行成本较低, 但碳排放量提高 490.46 kg, 同时风、光消纳率下降 31.40%, 这是因为没有充分调动微网内的能量转换调节潜力。通过比较不同场景下的微网运行情况, 发现电氢转换通过能量耦合提高了微网内能源利用的灵活性, 从而提高了新能源消纳率,

降低了微网的碳排放量。电动汽车的充放电为微网平衡供需提供了有力的支持, 将两者结合有利于微网低碳经济运行。

Table 5. Carbon emissions of microgrid in different scenarios

表 5. 不同场景下微网的碳排放情况

场景	1	2	3	4
碳排放量/kg	1785.72	1364.50	1724.72	1234.26

(2) 场景 4 下微网能量调度分析

在图 4 中可以看到, 微网主要由光伏和风力发电机组、CHP 机组、电氢转换设备的 HC 状态发电、EV 放电提供电能。在 00:00~02:00、07:00、17:00~19:00, 风力、光伏发电小于用电需求(包括 EV 充电负荷), 除了 CHP 机组在产热时发电外, 微网中的电氢转换设备处于 HC 发电状态, 利用氢能发电。在 03:00~06:00、20:00~23:00, EV 参与放电, 微网中的电能供应大于用电负荷, 通过 EL 状态转换为氢能存储, 不仅可以消纳新能源, 在电能不足时也可以利用存储的氢能发电。在 10:00~16:00, 大电网电价较高, 电能由风、光发电和 CHP 机组提供, 在满足基础负荷需求后, EV 进行充电, EL 状态制氢消纳剩余电能。

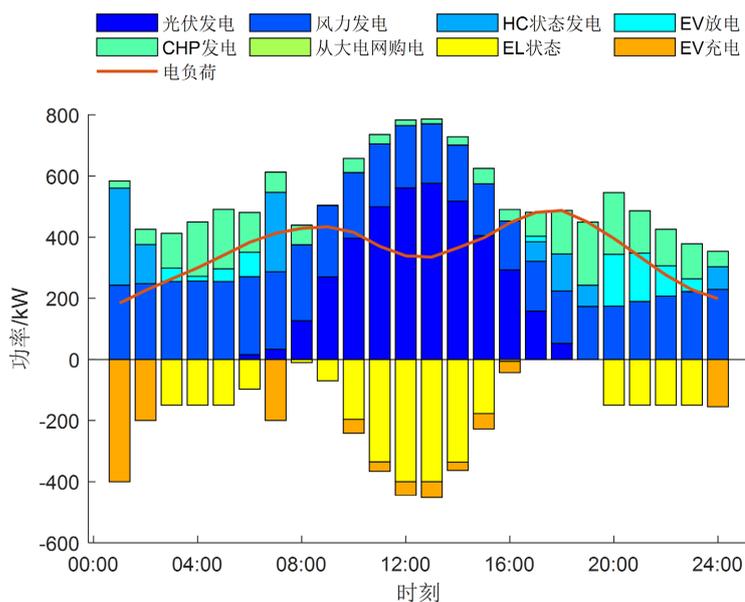


Figure 4. Electric power balance of microgrid in scenario 4

图 4. 场景 4 下微网的电功率平衡

在图 5 中, 微网的热负荷主要由 CHP 机组、电氢转换设备的 EL/HC 状态、蓄热器提供。在热负荷较高的 00:00~02:00 时段, 电氢转换设备在 HC 状态发电弥补电负荷, 同时产生了一定的热能, CHP 机组和蓄热器也在持续供热。在 03:00~07:00、18:00~21:00, CHP 机组作为微网中主要的热能来源, 满足了较高的热能需求, 同时这段时间内电氢转换设备运行产生余热, 提供了部分热力输出, 热能供应高于热负荷, 多余热能由蓄热器存储。在 10:00~14:00 之间, 由于 EL 状态运行功率较高, 产生的热能较多, CHP 机组运行功率较小即可满足热负荷。在 08:00~09:00、15:00~16:00, 蓄热器的热能输出增加, 成为主要的辅助热源。

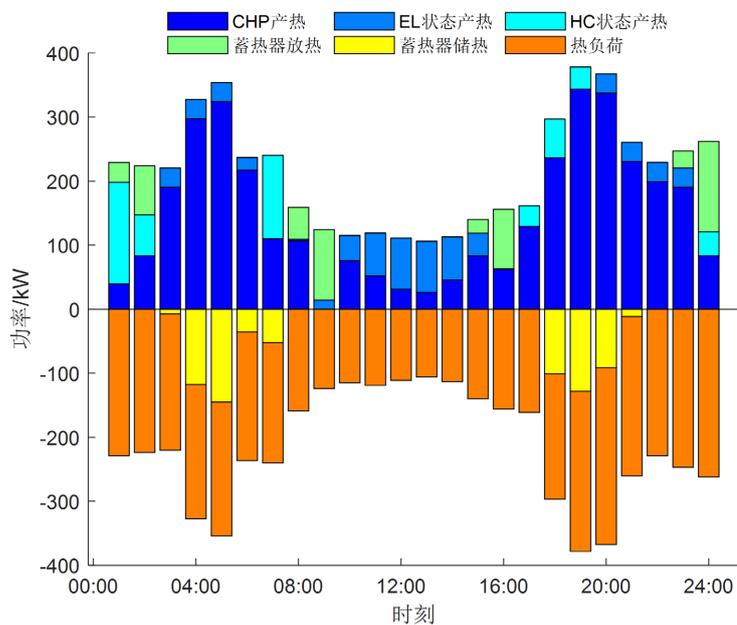


Figure 5. Thermal power balance of microgrid in scenario 4
 图 5. 场景 4 下微网的热功率平衡

(3) 场景 4 下微网灵活性分析

氢能是微网系统中平衡电能、热能的重要灵活性资源，结合电能、热能的平衡性分析，通过图 6 可知，在 00:00~02:00、07:00、17:00~19:00，微网中的电氢转换设备处于 HC 状态，需要消耗氢能发电产热，这时的氢能由储氢罐放出。而在其他时段，电氢转换设备是 EL 状态，通过电解水制氢，并储存在储氢罐中，其中在 03:00~05:00 为电价低谷时段，利用低价电能制氢可以灵活调整电能的利用时段。在电氢转换设备运行过程中，通过产生或消耗电能和热能调节供需。

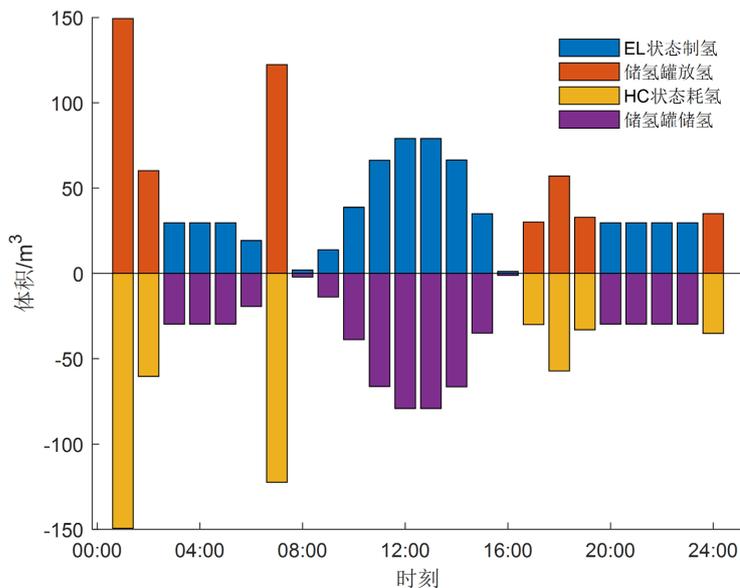


Figure 6. Hydrogen utilization of microgrid in scenario 4
 图 6. 场景 4 下微网的氢能利用情况

储能作为典型的灵活性资源, 在能源微网中展现出了调节潜力。储能(HS/TS)运行情况如图 7(a), 图 7(b)所示, 能量占比在安全范围内波动。储氢罐(HS)中氢能的存储、释放主要取决于电氢转换设备的运行状态, 在风、光发电高峰时段(09:00~16:00), 利用剩余的电力电解制氢, 存储到储氢罐中; 在风光发电较小而负荷较大时(17:00~19:00), 释放氢能, 由 HC 发电, 提高了微网整体的能量利用效率。蓄热器(TS)是微网中平衡热能的重要设备, 存储了 CHP 机组产热、电氢转换设备运行时的余热(03:00~07:00、18:00~21:00), 同时在热负荷高峰(23:00~24:00、00:00~02:00)等时段释放热能。

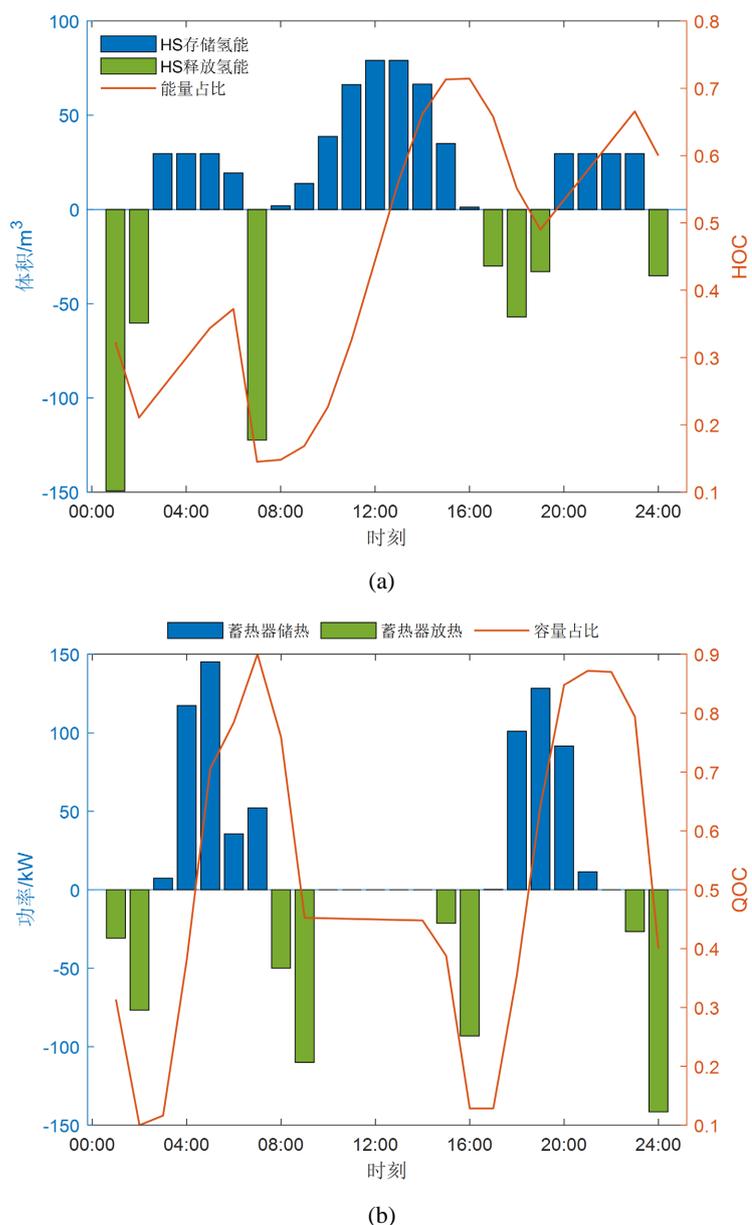


Figure 7. (a) Operation results of hydrogen storage in microgrid under scenario 4; (b) Operation results of thermal storage in microgrid under scenario 4
图 7. (a) 场景 4 下微网的储氢罐运行结果; (b) 场景 4 下微网的蓄热器运行结果

对于 EV 用户而言, 21:00~次日 01:00 为基础的 EV 充电负荷分布时段。微网通过激励放电价格鼓励

用户参与放电, 在非用车时段接入电网, 满足了充电负荷需求, 灵活响应微网调度。通过图 8 可知, 在用车时间, EV 没有接入微网充电桩, 不能参与充放电, 同时电池容量伴随行程减少。在保证电池性能的情况下, 分散了 EV 的充放电时间, 主要在 00:00~02:00、10:00~16:00 时段充电, 消纳微网中多余的新能源发电量, 在 03:00~06:00、20:00~23:00 放电, 为微网提供更多的灵活性电能供应。在非用车时间, EV 通过充电桩与微网相连, 进行电能双向互动, 可以发挥电池的灵活调节能力。

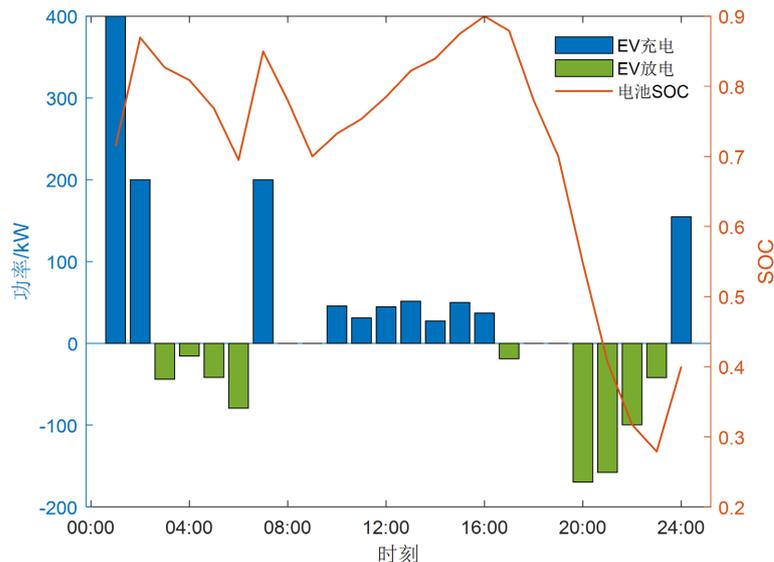


Figure 8. Operation results of EV in scenario 4

图 8. 场景 4 下电动汽车运行结果

5. 结论

本文以考虑灵活性资源的含氢能源微网为研究对象, 针对微网内不同设备之间的能量交互问题, 建立了微网优化模型, 分析了不同场景下微网的运行成本、碳排放量和各设备利用情况, 提高了系统整体灵活性, 具有良好的经济和环境效益。引入电氢双向转换和热电联产设备, 实现了能源的高质量转换和梯级利用, 提升了能源利用效率和可再生能源的消纳空间, 同时, 把具有相似规律的电动汽车聚合为储能, 为微网提供了可调度的灵活性资源, 促进高比例新能源就地消纳, 推动了能源结构的优化。

参考文献

- [1] 段新会, 程泽龙, 张东超, 等. 考虑需求响应与两阶段 P2G 的综合能源系统优化调度[J]. 系统仿真学报, 2024(6): 1-13.
- [2] 王辉, 王宝全, 李旭阳, 等. 基于主从博弈的楼宇微网优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 10-18+26.
- [3] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 160-168.
- [4] Yousri, D., Farag, H.E.Z., Zeineldin, H. and El-Saadany, E.F. (2023) Integrated Model for Optimal Energy Management and Demand Response of Microgrids Considering Hybrid Hydrogen-Battery Storage Systems. *Energy Conversion and Management*, 280, Article ID: 116809. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116809>
- [5] 霍高臣, 苏海滨. 基于虚拟储能的楼宇微电网综合能源优化研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 678-689.
- [6] 丁琦欣, 赵波, 陈哲, 等. 基于多时间尺度特征提取的微网电氢混合储能协同优化配置[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20241114.2052.025>, 2025-05-22.

- [7] 檀勤良, 单子婧, 丁毅宏, 等. 考虑蓄电池与电制氢的多能源微网灵活性资源配置双层优化模型[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 38-49.
- [8] 陈飞雄, 郭奕鑫, 邵振国, 等. 计及新能源出力相关性的多能源微网仿射实时优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3248-3257.
- [9] 刘志坚, 刘瑞光, 梁宁, 等. 含电转气的微型能源网日前经济优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 535-543.
- [10] Shen, Y., Hu, W., Liu, M., Yang, F. and Kong, X. (2022) Energy Storage Optimization Method for Microgrid Considering Multi-Energy Coupling Demand Response. *Journal of Energy Storage*, **45**, Article ID: 103521. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103521>
- [11] Chen, H., Yang, S., Chen, J., Wang, X., Li, Y., Shui, S., et al. (2024) Low-Carbon Environment-Friendly Economic Optimal Scheduling of Multi-Energy Microgrid with Integrated Demand Response Considering Waste Heat Utilization. *Journal of Cleaner Production*, **450**, Article ID: 141415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141415>
- [12] Rehman, T., Khan, M.A., Hussain, A. and Kim, H. (2024) Optimal Sizing of Multi-Energy Microgrid with Electric Vehicle Integration: Considering Carbon Emission and Resilience Load. *Energy Reports*, **11**, 4192-4212. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.001>
- [13] 赵波, 吴启亮, 陈哲, 等. 基于可再生能源的电氢耦合关键技术及示范验证[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20241114.1807.019>, 2025-05-22.
- [14] 张瀚公, 谢丽蓉, 王层层, 等. 考虑氢能多元利用的综合能源系统低碳灵活调度[J/OL]. 中国电力, 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.TM.20250509.0922.002>, 2025-05-22.
- [15] 林俐, 郑馨姚, 周龙文. 基于燃氢燃气轮机的风光火储多能互补优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3007-3022.
- [16] 杨冬锋, 左圣宇, 杨晶莹, 等. 考虑绿色氢能证书交易机制和新能源汽车碳配额的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 562-571.
- [17] 高玉, 王琦, 陈严, 等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 51-59.
- [18] 李江南, 程韧俐, 周保荣, 等. 含碳捕集及电转氢设备的低碳园区综合能源系统随机优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 149-156.
- [19] Yan, H., Zhang, W., Kang, J. and Yuan, T. (2023) The Necessity and Feasibility of Hydrogen Storage for Large-Scale, Long-Term Energy Storage in the New Power System in China. *Energies*, **16**, Article No. 4837. <https://doi.org/10.3390/en16134837>
- [20] 石子川, 邵能灵, 樊飞龙, 等. 含高比例可再生能源园区混合储能系统能量-功率跨季节协调调度方法[J/OL]. 上海交通大学学报, 1-29. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.243>, 2025-05-22.
- [21] 于仲安, 肖宏亮, 夏强威, 等. 基于 V2G 模式下电动汽车参与的微电网优化调度仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(6): 1412-1426.
- [22] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
- [23] Mei, Y., Li, B., Wang, H., Wang, X. and Negnevitsky, M. (2022) Multi-Objective Optimal Scheduling of Microgrid with Electric Vehicles. *Energy Reports*, **8**, 4512-4524. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.131>
- [24] 张家美, 孙凯, 李洪涛, 等. 考虑光-车-氢接入的新型城市配电网规划研究综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1067-1079.
- [25] 王莹, 高岩. 计及需求响应的随机综合能源系统优化配置[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(2): 157-165.
- [26] 吾提库尔·阿不都外力, 葛清, 马志斌, 等. 考虑电动汽车动态拥堵的配电网灵活性资源双层优化调度[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2417-2427.