

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.005

基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置

侯永全¹, 徐敦彬¹, 袁晓冬², 曾飞², 肖学权¹, 马立方¹, 梅霜¹

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221600; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 随着氢储能技术的不断发展,含氢微网中包含多个主体电源的容量合理配置问题将是今后推进电氢融合的重要方向之一。文中针对风光氢微网系统之间的合理配置问题展开研究。首先,考虑风光氢三方个体的收益模式,以风光出力为前提,氢储能实现电网剩余功率消纳,构建多主体收益模型;其次,针对氢储能制氢侧采用质子交换膜电解槽和碱性电解槽混合方法,以制氢收益与消纳率为目标,构建混合制氢配置模型;最后,采用NSGA-II算法计算各主体纳什均衡点求解各主体配置结果。结合西北某地区典型月风速、光照场景数据进行计算,仿真结果表明,通过优化配置后多主体能源参与博弈后整体系统收益提升6.8%,实现了能源消纳;同时在采用混合制氢设备后,氢储能主体收益提升2.64%,负荷中断率相较单一制氢降低14%,改善了系统经济性和可靠性。

关键词: 风电; 光伏; 制氢; 氢储能; 燃料电池; 博弈论

Optimized Allocation of Hydrogen-containing Micro Grid Multi-subject Energy System Based on Game Theory

HOU Yongquan¹, XU Dunbin¹, YUAN Xiaodong², ZENG Fei², XIAO Xuequan¹,
MA Lifang¹, MEI Shuang¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Xuzhou Power Supply Corporation, Jiangsu Xuzhou 221600, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuous development of Hydrogen energy storage technology, the rational capacity allocation problem of Hydrogen-containing micro grids containing multiple main power sources will be one of the important directions to promote the integration of electricity and Hydrogen in the future. In this paper, the rational allocation problem between wind and Hydrogen micro grid systems is studied. Firstly, a multi-subject revenue model is constructed with consideration of the individual revenue model of wind-solar Hydrogen, with the wind solar power as the premise as well as with Hydrogen storage to realize the residual power consumption of grid. Then, as for the hybrid method of proton-exchange membrane electrolyzer and alkaline electrolyzer for the Hydrogen storage side, a hybrid Hydrogen configuration model by taking the Hydrogen revenue and the rate of consumption as the target is constructed. Finally, the NSGA-II algorithm is adopted to calculate the Nash equilibrium of each subject and solve the configuration results of each subject. The calculation is made in combination with typical monthly wind speed and light scenario data in certain region in northwest of China. The simulation results show that the revenue of the overall system is improved by 6.8% through the optimized configuration of multiple energy sources participating in the game and the energy consumption is achieved. Meanwhile, after adopting the hybrid Hydrogen equipment, the main body revenue of the Hydrogen storage is improved by 2.64%, and the load interruption rate is reduced by 14% compared with a single Hydrogen system, which improves the economic performance and reliability of the system.

Key words: wind power; photovoltaic; Hydrogen production; Hydrogen storage; fuel cells; game theory

收稿日期:2024-03-05; 修回日期:2024-05-08

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023166)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co. (J2023166).

0 引言

近年来,以风光为主的可再生能源装机量不断提升,如何实现可再生能源的灵活消纳的同时解决负荷供应成为未来能源发展的重要方向;氢能作为一种清洁高效能源,其具有长时储存、安全高效以及原料丰富等优势。构建含氢微网可实现新能源的利用和氢能的应用,是解决微网内能源消纳与电能供应问题的重要途径。但含氢微网中电源主体多,各主体个体的配置不同将影响子系统收益以及电能供应需求,且制氢设备的性能也影响着氢储能的消纳能力与供电质量,因此,研究含氢微网多主体下的电源配置问题以及制氢设备配置对实现含氢微网的推广、新能源的消纳和电能可靠供应具有重要意义^[1-10]。

目前国内外针对含氢微网系统相关的运行模式与配置技术进行了相应的研究,文[11]中针对氢储能为主的含氢微网,综合考虑微网运行成本、供电可靠性和弃电率,采用改进猫群算法对氢储能配置进行优化,但系统内系统较多,求解后仅能保证整体运行最优,并不能实现各能源主体经济性均实现最优;文[12]构建了工业园区综合能源系统,并依据价格能量博弈模式,利用3阶段主从博弈方法对氢储能最优容量进行求解,提高了各运行商的收益,但该研究并未考虑到微网其他主体配置问题,不能保证负荷中断率以及其他主体在不同配置下收益问题;文[13]以整体微网电量成本、弃电率与负荷中断情况为目标,提出了一种基于电氢耦合混合储能配置方法,实现微网内部各单元容量配置,但并未考虑多主体收益问题,且单一能源工况下负荷供应存在一定的成本;文[14]中针对风光氢等不同投资者提出一种合作博弈的微网配置方法,实现了各投资者收益以及总体收益最优,但由于氢储能出力限制,导致系统弃风弃光现象仍然明显,无法保证整体配置的最优性。同时,针对氢储能制氢特性研究方面,文[15]针对电解槽制氢问题,对单一电解制氢与复合电解制氢方式进行了特性对比,并通过综合评估方法选出了最优配比,但系统求解方案利用专家打分法具有局限性,不能实现配比最优化;文[16]针对多类型电解制氢协同问题,提出了一种风光互补的协同制氢策略,实现了以制氢成本与风光消纳率为目标的制氢容量配置,但由于主体为制氢并未考虑发电侧能源配置,无法适用于多主体利益的场景问题,不利于微网整体经济性与电能供应保证。上述研究集中于氢储能配置下微网整体利

益最优以及单一利益主体最优,并未实现在整体利益最优前提下各能源供电主体收益最优,使得含氢微网多主体配置下出现收益不均的问题,且针对氢储能制氢特性并未深入考虑,无法实现氢储能消纳和出力能力的提升。因此,在多主体能源协同工作的含氢微网中,如何在实现多主体能源利益最大化的同时保证新能源的消纳和电能可靠性的保障对含氢微网的发展具有重要意义^[17-22]。

综上所述,为解决含氢微网多电源主体容量配置下的个体收益以及负荷稳定供电问题,文中提出一种基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置方法,针对风光氢个体运营模式,考虑投资成本、弃电惩罚、负荷中断、售气、售电等收益,构建各博弈参与者的非合作博弈模式模型,同时氢储能参与者采用混合电解制氢设备提升能量利用率和供电可靠性,以各主体收益为目标,采用NSGA-II算法对各主体的配置结果下收益的纳什均衡点进行求解。最后选取西北地区典型日场景进行算例仿真,对比不同运行模式下以及不同制氢设备下的微网运行情况,基于仿真算例分析了不同电价补贴下对各主体配置的敏感度分析。

1 含氢微网系统模型

1.1 含氢微网系统架构

随着氢能技术的发展,相对于传统电储能技术,构建以氢储能为主体的含氢微网可以实现长周期供电以及清洁高效等优势。含氢微网模型见图1,主要包含风电、光伏、碱性电解槽(alkaline electrolyzer, AEL)、质子交换膜电解槽(proton exchange membrane, PEM)、储氢罐以及燃料电池和负荷组成,由风电光伏新能源出力优先保证系统内负荷需求,余电或者缺电由氢储能进行补充,以此来保证负荷供应的前提下实现新能源的进一步消纳。

1.2 风电系统

风机场景风力特性满足Weibull分布,风力发电功率与风速关系为^[23]:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, \quad v > v_{out} \\ P_c \frac{v - v_{in}}{v_c - v_{in}} & v_{in} \leq v \leq v_c \\ P_c & v_c \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

$$f(v) = \left(\frac{a}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^a\right] \quad (2)$$

式(1)、(2)中: P_w 为 t 时刻风电出力情况; P_c 为额定功率; v_{in} 、 v_{out} 、 v_c 为风电风速、切出风速、额定风速; v 为风速; a 、 b 分别为风机的形状、比例参数。

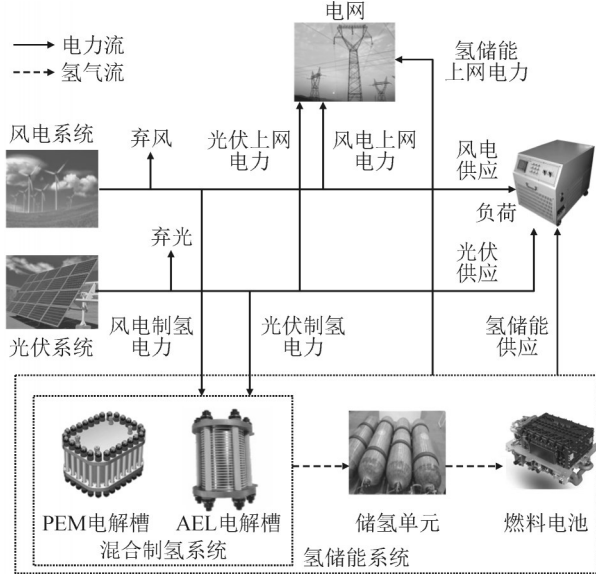


图1 含氢微网系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of a microgrid system with Hydrogen energy storage

1.3 光伏系统

光伏场景光照强度满足 Beta 分布,其输出功率和光照强度关系为^[24-25]:

$$P_{pv} = r_t \sum_{n=1}^N \eta_n S_n \quad (3)$$

$$f(r_t) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r_t}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r_t}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: P_{pv} 为 t 时刻光伏出力情况; r_t 为 t 时刻光照强度; n 为光伏系统中光伏组件个数; N 为光伏组件总个数; η_n 和 S_n 分别为第 n 个光伏组件光电效率与面积; α 和 β 分别为光伏 Beta 分布的形状参数; $r_{\max}$ 为最大光照强度。

1.4 电解制氢系统

碱性电解槽设备成本低,但动态响应慢,与波动性电源适配性差,而质子交换膜电解槽具备优良的动态特性,但价格昂贵,平均每kW是碱性电解槽的3倍之多^[26-27]。因此结合两种电解槽制氢优势,组成响应性和低成本比的混合电解制氢阵列。

电解槽输入功率的制氢转化率主要和电解槽自身反应极化特性有关^[28],而电解制氢量的多少与电解电流相关,因此需要构建制氢单元工作功率与电解电流关系。根据碱性电解槽极化特性^[29],其工作功率下的电解电流关系为

$$P_{AEL} = I_{AEL} \left[U_0 + \frac{r_1 + r_2 T_{AEL}}{A} I_{AEL} + \frac{k_1 + \frac{k_2}{T_{AEL}} + \frac{k_3}{T_{AEL}^2}}{s \lg \left(\frac{P_{AEL}}{A} I_{AEL} + 1 \right)} \right] \quad (5)$$

式(5)中: I_{AEL} 为输入电流; U_0 为电解槽电压; T_{AEL}

为电解槽温度; r_1, r_2, k_1, k_2, k_3 为电解槽功率—电流的经验系数; A 为电解槽电解反应面积; s 为电压相关系数。

而质子交换膜电解槽工作功率受开路电压、活化电压、扩散电压以及欧姆电压影响^[30-31],其工作功率下的电解电流关系为:

$$P_{PEMEL} = I_{PEMEL} (U_{ocv} + U_{act} + U_{ohm} + U_{diff}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} U_{ocv} = U_0 + \frac{RT_c}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \\ U_{act} = \frac{RT_c}{\alpha_a F} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{2i_{a0}} \right) + \frac{RT_c}{\alpha_c F} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{2i_{c0}} \right) \\ U_{ohm} = \frac{\delta_m}{\sigma_m} i \\ U_{diff} = \frac{RT_c}{4F} \ln \left(\frac{x_{O_2,m}}{x_{O_2,e}} \right) + \frac{RT_c}{2F} \ln \left(\frac{x_{H_2,m}}{x_{H_2,e}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: U_{ocv} 为电解槽反应的开路电压; R 为理想气体常量; P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 分别为氢、氧、水的压力; T_c 为电解槽反应温度; U_{act} 为电解槽反应的活化电压; i_{a0} 、 i_{c0} 为电解槽内交换电流密度; α_a 、 α_c 为电荷转移系数; U_{ohm} 为电解槽反应的欧姆电压; δ_m 为质子膜的厚度; σ_m 为离子电导率; $x_{O_2,e}$ 、 $x_{H_2,e}$ 为反应中膜与两侧电极的氧气、氢气体积分数标准值; U_{diff} 为电解槽内部反应时的扩散电压; $x_{O_2,m}$ 、 $x_{H_2,m}$ 为反应中膜与两侧电极的氧气、氢气体积分数; F 为法拉第常数。

两种类型电解槽产氢速率与制氢效率公式为

$$n_{H_2} = \eta_m \frac{N_E I_E}{zF} \quad (8)$$

式(8)中: N_E 为电解槽个数; η_m 为电解槽反应的法拉第效率; F 为法拉第常数; z 为反应电子数。

1.5 燃料电池系统

质子交换膜燃料电池输出功率主要由氢氧反应生成,燃料电池输出功率与耗氢模型为^[32]

$$P_{fc} = \frac{v_{H_2} \eta_{fc}}{b_{H_2}} \quad (9)$$

式(9)中: P_{fc} 为燃料电池反应输出功率; v_{H_2} 为燃料电池反应耗氢量; b_{H_2} 为燃料电池生成每度电的平均耗氢量; η_{fc} 为燃料电池反应效率。

1.6 储氢系统

储氢罐储氢压强数学模型为

$$\begin{cases} P_{H_2} = \frac{RT_s}{V_s} \times \left[\int_{t_1}^{t_2} v_{cl,H_2} dt - \int_{t_1}^{t_2} v_{fc,H_2} dt + n_{H_2}(t_0) \right] \\ SOH = \frac{P_{H_2}}{P_{H_2,max}} \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: v_{cl,H_2} 为制氢流速; v_{fc,H_2} 为耗氢流速;

$n_{H_2}(t_0)$ 为 t_0 时刻储氢罐内的氢气体积分数; P_{H_2} 为储氢罐内的压强; $P_{H_2, \max}$ 为储氢罐额定压强; SOH 为氢气内部氢体积分数; V_s 为储氢罐容量。

2 含氢微网容量配置优化模型

2.1 基于博弈论的各主体容量配置模型

含氢微网中的出力主体为风电站、光伏电站以及氢储能电站三方, 当含氢微网运行时分为3个工况, 当微网内部可以实现完全消纳时, 微网正常运行可维持自身电能平衡; 当微网内部功率过剩, 且售电传输功率上限时, 风光发电弃风弃光; 当微网内部功率缺额时, 微网系统向电网购电以保证电能供应。

2.1.1 目标函数

文中以该三方博弈主体的收益最大化为目标函数, 考虑个体的投资、运维、购电、弃电惩罚以及负荷供应中断惩罚等因素, 来保证微网整体运行的经济性和稳定性。目标函数为

$$W_n = C_{n,s} + C_{n,sub} - C_{n,w} - C_{n,b} - C_{n,d} - C_{n,in} - C_{n,r} \quad (11)$$

式(11)中: W_n 为 n (风电、光伏、氢储能) 主体参与总体收益; $C_{n,s}$ 为 n 主体售电收益; $C_{n,sub}$ 为 n 主体政府补贴收益; $C_{n,w}$ 为 n 主体弃电惩罚; $C_{n,b}$ 为 n 主体购电成本; $C_{n,d}$ 为 n 主体负荷中断惩罚; $C_{n,in}$ 为 n 主体购置成本; $C_{n,r}$ 为 n 主体运行成本。

1) 售电收益。售电收益是各主体盈利的主要收益来源, 其包括负荷需求以及电网传输功率, 当微网总体功率高于电网传输功率上限时, 微网内风光就可能会发生弃风弃光现象; 当微网总体功率缺额高于电网传输功率上限时, 微网内部电源功率实现全部利用, 出现负荷中断现象; 微网内总体功率为

$$P_{net}(t) = P_w(t) + P_p(t) - P_{load}(t) - P_e(t) - P_g(t) \quad (12)$$

式(12)中: $P_{net}(t)$ 为 t 时刻微网与电网交互后总功率; $P_w(t)$ 为 t 时刻风电功率; $P_p(t)$ 为 t 时刻光伏功率; $P_e(t)$ 为 t 时刻制氢功率; $P_{load}(t)$ 为 t 时刻负荷功率; $P_g(t)$ 为 t 时刻电网功率。当微网内功率不足时, 各主体收益功率为其产电功率, 即 $P_{n,s}(t)$, t 时刻 n (风电、光伏) 主体功率, 当微网内功率需求充足时, 此时风光主体收益功率与收益分别为:

$$P_{n,s}(t) = \frac{P_{n,s}(t)}{P_w(t) + P_p(t)} [P_{load}(t) + P_e(t) + P_g(t)] \quad (13)$$

$$C_{n,s} = c_s \sum_{t=1}^T [P_{n,s}(t) \Delta t] \quad (14)$$

式(13)、(14)中: T 为微网系统运行周期; $C_{n,s}$ 为风电、光伏系统售电收益; c_s 为系统单位售电电价。

当风光出力高于负荷需求时, 氢储能单元无购

电收益; 当风光出力低于负荷需求时, 氢储能售电功率为燃料电池 t 时刻的功率 $P_{fc}(t)$, 同时氢储能反应过程产生的氢气和氧气也可以通过售卖产生额外收益, 氢储能主体售电收益为

$$C_{H,s} = C_{s,O_2} n_{O_2} + C_{s,H_2} n_{H_2} + c_s \sum_{t=1}^T P_{fc}(t) \quad (15)$$

式(15)中: $C_{H,s}$ 为氢储能系统售电收益; C_{s,O_2} 、 C_{s,H_2} 为售氧、售氢收益, 分别取 2.4、3 元/($N \cdot m^3$)。

2) 购置成本。含氢微网购置成本包括风电、光伏以及氢储能的安装成本为

$$\begin{cases} C_{W,in} = N_w E_w n_w \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \\ C_{P,in} = N_p E_p n_p \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \\ C_{H,in} = N_{m1} E_{m1} n_{m1} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} + \\ N_{m2} E_{m2} n_{m2} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} + N_{m3} E_{m3} n_{m3} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: $C_{W,in}$ 、 $C_{P,in}$ 、 $C_{H,in}$ 为风电、光伏以及氢储能投资成本; 氢储能投资成本中下标 m_1 、 m_2 、 m_3 分别代表混合电解槽、燃料电池和储氢罐; N_w 、 N_p 、 N_H 分别代表各博弈主体的组件个数; E_w 、 E_p 、 E_H 分别代表各博弈主体的容量; n_w 、 n_p 分别代表各博弈主体的容量单价; r 为各博弈主体折旧率, 取 5%; y 为使用年限, 取 15 年。

3) 运行成本。运行成本包含博弈各主体运行时出力损耗, 各主体运行成本为

$$\begin{cases} C_{W,r} = N_w P_w m_w \\ C_{P,r} = N_p P_p m_p \\ C_{H,r} = N_{m1} P_{m1} m_{m1} + N_{m2} P_{m2} m_{m2} + N_{m3} P_{m3} m_{m3} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: $C_{W,r}$ 、 $C_{P,r}$ 、 $C_{H,r}$ 为风电、光伏以及氢储能运行成本, 氢储能运行成本中下标 m_1 、 m_2 、 m_3 分别代表混合电解槽、燃料电池和储氢罐; m_w 、 m_p 分别代表各博弈主体的运行时单位功率成本。

4) 购电成本。当含氢微网净功率之和小于 0 时, 此时各博弈主体出力之和不能满足负荷供应, 因此需要向电网购电产生购电成本, 购电成本计算方法为:

$$\begin{cases} P_r(t) = P_{load}(t) - P_{wt}(t) - P_{pv}(t) - P_{fc}(t) \\ P_b(t) = P_r(t) & 0 \leq P_b(t) \leq P_{g,max} \end{cases} \quad (18)$$

$$C_{n,b} = \frac{E_n(t) c_b \sum_{t=1}^T [P_b(t) \Delta t]}{P_w(t) + P_p(t) + P_{fc}(t)} \quad (19)$$

式(18)、(19)中: $P_r(t)$ 为 t 时刻微网内部净功率; $P_b(t)$ 为 t 时刻微网购电功率; $E_n(t)$ 为 t 时刻(风电、光伏、氢储能)各主体装机成本; c_b 为系统购电电价;

5) 负荷中断惩罚。当微网购电达电网传输功率上限时仍不能满足负荷供应, 此时会出现负荷中断现象, 微网各主体需要对中断负荷给予经济补偿即惩罚, 中断惩罚见式(20)、(21):

$$P_d(t) = \begin{cases} 0 & P_r(t) \leq P_{g, \max} \\ P_r(t) - P_{g, \max} & P_r(t) > P_{g, \max} \end{cases} \quad (20)$$

$$C_{n,d} = \frac{E_n(t)c_d \sum_{t=1}^T [P_d(t)\Delta t]}{P_w(t) + P_p(t) + P_{fc}(t)} \quad (21)$$

式(20)、(21)中: $P_d(t)$ 为 t 时刻微网负荷中断功率; c_d 为系统负荷中断惩罚因子, 取 $0.9 \text{ (kW} \cdot \text{h)}^{-1}$ 。

6) 弃电惩罚。由于容量的合理配置问题, 当微网内风光出力大于负荷与制氢需求之和时, 会出现弃风弃光现象, 因此需要追加弃电惩罚, 弃电惩罚见式(22)、(23):

$$P_{n,w}(t) = \begin{cases} 0 & P_{\text{net}}(t) \leq 0 \\ P_n(t) - P_{n,s} & P_{\text{net}}(t) > 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$C_{n,w} = c_w \sum_{t=1}^T [P_{n,w}(t)\Delta t] \quad (23)$$

式(22)、(23)中: $P_{n,w}(t)$ 为 t 时刻 n (风电、光伏)弃电功率; c_w 为系统弃电惩罚因子, 取 $0.3 \text{ (kW} \cdot \text{h)}^{-1}$ 。

7) 政府补贴。为鼓励新能源和氢能发展, 国家政府提供相关政策来补贴相应装机容量发电个体, 给与对应发电功率补贴, 装机补贴为

$$C_{n,\text{sub}} = c_{n,\text{sub}} \sum_{t=1}^T [P_{n,s}(t)\Delta t] \quad (24)$$

式(24)中: $C_{n,\text{sub}}$ 为 n (风电、光伏以及氢储能)各主体博弈者参与发电的政府补贴; $c_{n,\text{sub}}$ 为系统单位出力补贴电价。

2.1.2 约束条件

1) 配置个数约束

$$\begin{cases} N_{w,\min} \leq N_w \leq N_{w,\max} \\ N_{p,\min} \leq N_p \leq N_{p,\max} \\ N_{e,\min} \leq N_e \leq N_{e,\max} \\ N_{fc,\min} \leq N_{fc} \leq N_{fc,\max} \\ N_{hy,\min} \leq N_{hy} \leq N_{hy,\max} \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中: $N_{w,\min}$ 、 $N_{p,\min}$ 、 $N_{e,\min}$ 、 $N_{fc,\min}$ 、 $N_{hy,\min}$ 分别为风电光伏氢储能各主体博弈者最小装机数量; $N_{w,\max}$ 、 $N_{p,\max}$ 、 $N_{e,\max}$ 、 $N_{fc,\max}$ 、 $N_{hy,\max}$ 分别为风电光伏氢储能各主

体博弈者最大装机数量。

2) 能量守恒约束

$$P_w(t) + P_p(t) + P_{fc}(t) + P_g(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{el}}(t) + P_d(t) \quad (26)$$

3) 电解槽出力约束

$$0 \leq P_{\text{el}}(t) \leq P_{\text{el},\max} \quad (27)$$

式(27)中, $P_{\text{el},\max}$ 为电解槽最大工作功率。

4) 燃料电池出力约束

$$0 \leq P_{\text{fc}}(t) \leq P_{\text{fc},\max} \quad (28)$$

式(28)中, $P_{\text{fc},\max}$ 为燃料电池最大工作功率。

5) 储氢罐运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq n_{h,\text{cha}}(t) \leq \alpha_h^{\text{cha}} \mu_h^{\text{cha}} E_h \\ 0 \leq n_{h,\text{dis}}(t) \leq \alpha_h^{\text{dis}} \mu_h^{\text{dis}} E_h \\ \alpha_h^{\text{cha}} + \alpha_h^{\text{dis}} = 1, \alpha_h^{\text{cha}}, \alpha_h^{\text{dis}} \in \{0, 1\} \\ \eta_{h,\min} E_h \leq E_h(t) \leq \eta_{h,\max} E_h \\ E_{h,\text{start}} = E_{h,\text{end}} \end{cases} \quad (29)$$

式(29)中: E_h 为储氢罐容量; α_h^{cha} 、 α_h^{dis} 为制氢和用氢的状态量; μ_h^{cha} 、 μ_h^{dis} 为储氢和耗氢系数; $\eta_{h,\min}$ 、 $\eta_{h,\max}$ 为储氢容量上下限系数; $E_{h,\text{start}}$ 、 $E_{h,\text{end}}$ 为储氢容量始末值。

2.1.3 基于博弈论的容量优化配置模型

含氢微网在运行过程中风光氢三方投资主体均希望自己配置更大来获得更多的收益, 但总负荷需求不变的前提下配置越高可能成本越高。因此各方主体属于公平竞争、互相博弈的关系, 且由于系统内不存在各方主体之间的利益交换, 属于一种非合作博弈类型。

博弈三方主体为风电光伏和氢储能, 博弈中各投资者的容量为各投资方案, 属于策略集 $E = \{E_w, E_p, E_h\}$, 而三方主体的目标均为实现自己收益的最大化, 因此非合作博弈模式下的三方博弈主体应满足的 Nash 均衡解为

$$\begin{cases} W_w(E_w, E_p, E_h) \\ W_p(E_w, E_p, E_h) \\ W_h(E_w, E_p, E_h) \end{cases} \quad (30)$$

基于构建的三方博弈下的非合作博弈模型, 采用 NSGA-II 算法, 实现对模型中多变量、多约束的多目标优化模型进行求解, 求解步骤如下, 具体流程见图2。

1) 初始化种群。输入相关场景数据, 初始化各主体装机量, 即配置个数。

2) 目标函数计算。计算各博弈主体目标函数值(其中各博弈主体目标函数计算时选取其他主体的

上一轮优化配置数据进行求解计算)。

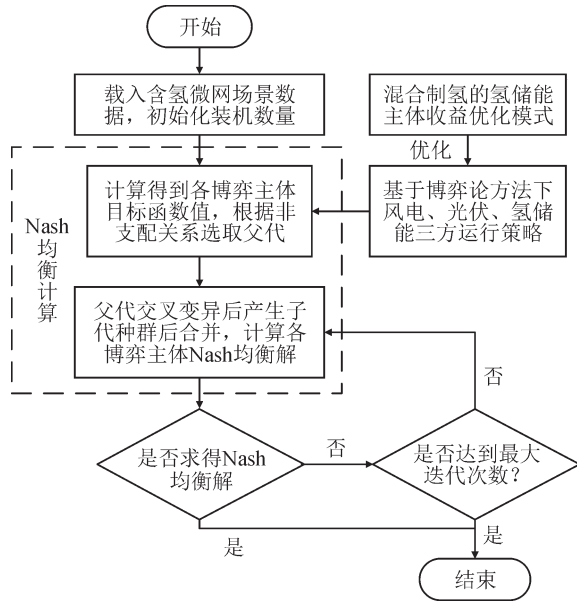


图2 基于博弈论的容量优化配置求解流程图

Fig. 2 Flowchart for solving capacity optimization allocation based on game theory

3)迭代进化。父代经过交叉变异形成子代,从第二代开始,将子代和父代合并后进行非支配排序并计算拥挤度,根据非支配结果与拥挤度关系选取新的个体作为父代进行计算。

4)均衡求解。在迭代次数内,如果满足 Nash 均衡的平衡点,即临近两次迭代种群数据一致,说明求解出了非合作博弈模型下的最优配置,计算目标函数后结束流程,否则,判断是否达到最大迭代次数,未达到则返回步骤3。

2.2 基于混合制氢的氢储能主体容量配置模型

为进一步提升氢储能系统的运行优势,采用了一种 AEL 与 PEMEL 混合使用的制氢模型,其中, AEL 电解槽低廉但其在高电流密度以及响应速度方面不如 PEMEL,结合前文构建两者模型,由两者模型选取 2:1 配比形成混合电解槽^[15],综合对比 3 种类型电解制氢一功率特性见图 3。

由图 3 可以看出,当功率为 500、1 000、1 500 MW 时,PEMEL 制氢量最高,混合制氢组合制氢量是同等功率下 AEL 制氢量的 1.63、1.31、1.2 倍。但由于 PEMEL 成本大约为 AEL 的 3 倍左右,利用高额成本换取制氢量的提升不具有经济性,而采用混合制氢方式可以实现氢储能主体经济性以及制氢量的提升。因此本节构建基于混合制氢系统氢储能消纳风光能源以及制氢成本模型,以提升氢储能整体能

源利用率来保证负荷供应。

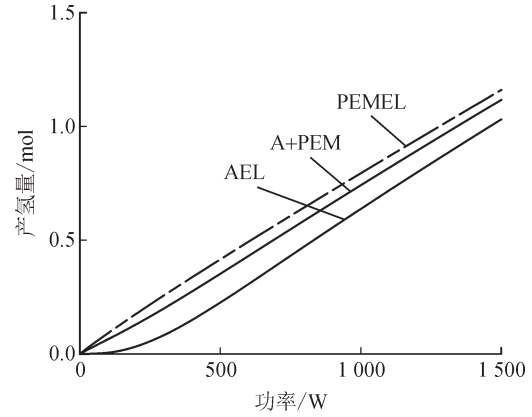


图3 不同类型电解槽制氢一功率特性图

Fig. 3 Hydrogen production in different types of electrolyzers-power characteristics diagram

2.2.1 目标函数

考虑混合制氢系统的单位制氢成本 $C_{A-P_{EL}}$ 、以混合制氢主体电能消纳率 σ 为目标函数,具体公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{A-P_{EL}} = \frac{R_{in} \times C_{in} - C_r + \sum_{i=1}^y C_{run,i}}{\sum_{i=1}^y n_{H2,i}} \\ \sigma = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{all,t} - P_{EL,t})}{\sum_{t=1}^T P_{all,t}} \end{array} \right. \quad (31)$$

式(31)中: R_{in} 和 C_{in} 分别为氢储能主体设备投资系数与初始投资成本; C_r 为设备回收成本; $C_{run,i}$ 为设备第 i 年的运行维护成本; y 为使用年限; $n_{H2,i}$ 为第 i 年产氢量; $P_{all,t}$ 为 t 时刻新能源需要消纳功率。

2.2.2 约束条件

1)能量守恒约束。在三方博弈主体运行时,混合制氢系统运行也满足功率能量守恒

$$\begin{aligned} P_w(t) + P_p(t) + P_{fc}(t) + P_g(t) = \\ P_{load}(t) + P_{AEL}(t) + P_d(t) + P_{PEMEL}(t) \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)中: $P_{AEL}(t)$ 为 t 时刻 AEL 输出功率; $P_{PEMEL}(t)$ 为 t 时刻 PEMEL 输出功率。

2)混合电解槽出力约束

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{AEL}(t) \leq E_{AEL} \\ 0 \leq P_{PEMEL}(t) \leq 1.1 \times E_{PEMEL} \end{array} \right. \quad (33)$$

式(33)中, E_{AEL} 、 E_{PEMEL} 分别为 AEL、PEMEL 容量。

2.2.3 混合制氢模型求解流程

基于构建的混合制氢的氢储能主体配置模型,文中采用 NSGA-II 算法,实现对基于博弈论的容量配置下的多类型电解制氢设备容量进行求解,求解

步骤如下:

1)初始化种群。获取上层博弈求解得到的配置制氢设备总容量,初始化两种类型电解制氢配置容量。

2)目标函数计算。计算混合制氢模型目标函数值,通过非支配排序生成第一代父代。

3)迭代进化。从第二代开始,将子代和父代合并后进行非支配排序并计算拥挤度,根据非支配结果与拥挤度关系选取新的个体作为父代进行计算。

4)非支配解选取。在迭代次数内,选取熵权法对多目标进行权重赋值,选取最优评价方案,返回步骤3,当达到最大次数后,输出最优方案。

3 算例结果与分析

3.1 风—光—荷出力场景及参数

考虑含氢微网实际工作可行性,选取西北某工业园区风速、光照强度以及负荷功率30天的预测数据标么值,采样时间为1 h。以第一天为例,考虑风速、光照强度、和负荷功率之间的预测标准差为0.15倍,均值为0的正态分布,利用蒙特卡洛抽样生成1 000个随机场景,见图4,采用K-means对场景数据进行聚类,选取概率最高典型场景作为仿真数据,全周期概率最高场景见图5。

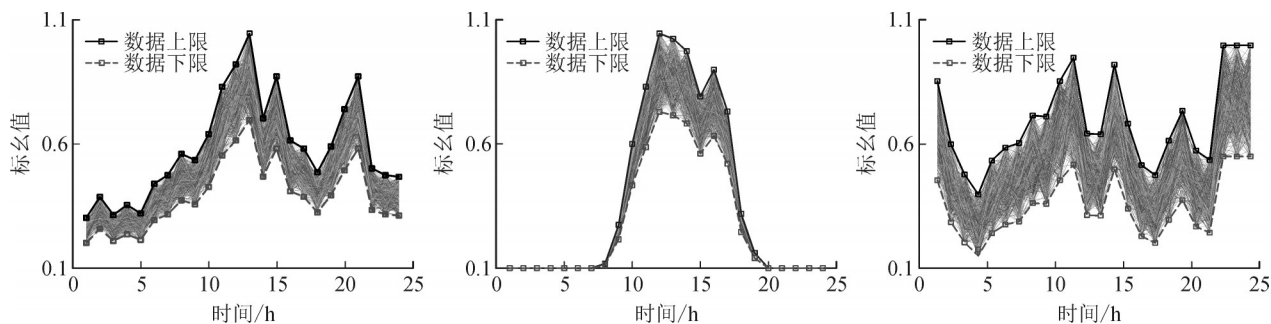


图4 负荷、风光数据随机场景

Fig. 4 Randomized scenarios for load, wind, and PV data

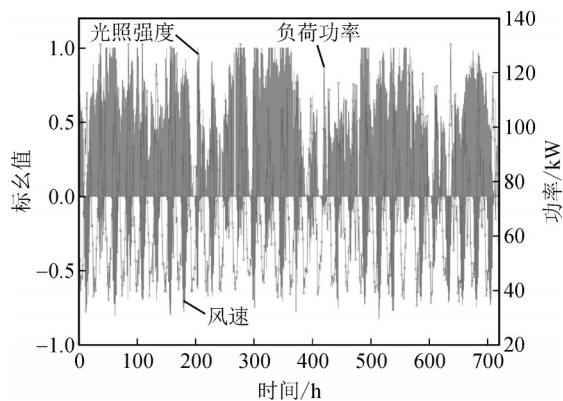


图5 全周期概率最高场景特性曲线

Fig. 5 Full-cycle probability highest scenario characteristic curve

依据选取场景,选取含氢微网整体运行寿命为15年。具体参数见表1^[14,33]。

3.2 含氢微网容量配置优化仿真结果

为研究含氢微网工作下多主体能源博弈运行的容量配置与经济性问题,选取4种不同类型主体能源组成微网方案。

方案1为风电、光伏微网;方案2为风电、碱性制氢的氢储能微网;方案3为风电、光伏、碱性制氢的氢储能微网;方案4为风电、光伏、含混和制氢系统的氢储能微网。

表1 系统主要参数

Table 1 Main system parameters

设备	参数	指标
光伏机组	型号	XH-03
	单位功率/kW	5
	单价/(元·kW ⁻¹)	3 000
风电机组	型号	FD6-5
	单位功率/kW	5
	单价/(元·kW ⁻¹)	4 500
AEL电解槽	单位额定产氢量/[Nm ³ ·(kW·h) ⁻¹]	1.54
	效率/%	75
PEMEL电解槽	单位额定产氢量/[Nm ³ ·(kW·h) ⁻¹]	1.89
	效率/%	75
储氢罐	单位容量/m ³	10
	单位成本/(元·个 ⁻¹)	3 500
	存氢效率/%	95
燃料电池	单位额定耗氢量/[Nm ³ ·(kW·h) ⁻¹]	2
	效率/%	45

分别针对4种方案运行模式进行求解计算,仿真配置结果见表2,各场景收益以及场景源荷特性见表3;各系统运行状态以及负荷中断状态见图6、7。

综合对比表2、3与图6、7可知,当采取方案1组

表2 4种方案的优化配置结果

Table 2 Optimized configuration results for 4 programs

方案	风机数量	光伏数量	电解槽数量		燃料电池数量	储氢个数
			AEL	PEMEL		
1	48	40	0	0	0	0
2	80	0	60	0	36	44
3	64	41	46	0	33	28
4	64	41	27	13	35	30

表3 4种方案的收益及特性对比

Table 3 Comparison of the benefits and characteristics of the 4 programs

方案	风电收益/万元	光伏收益/万元	氢储能收益/万元	负荷中断率/%	弃电率/%
1	4.285	0.534	0.000	6.58	21.5
2	9.273	0.000	3.357	1.69	0.1
3	7.535	2.160	3.795	0.87	0.0
4	7.545	2.165	3.895	0.76	0.0

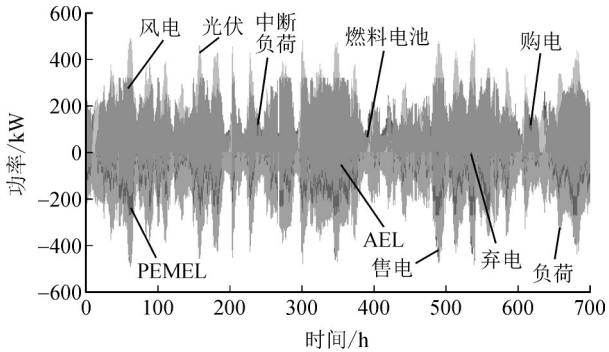
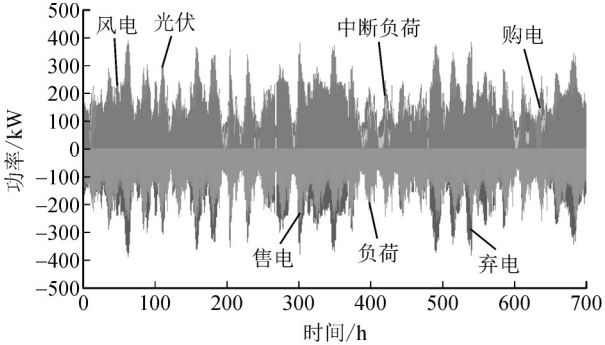


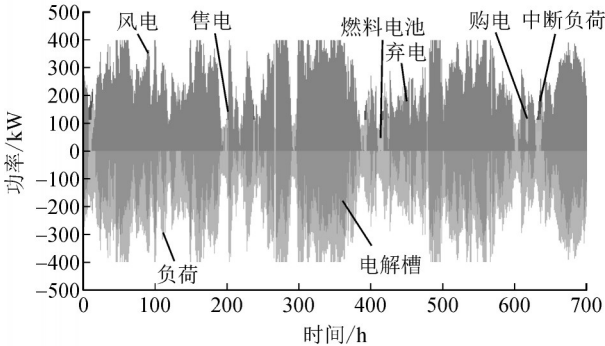
图6 方案4配置下各系统功率图

Fig. 6 Power diagram for each system under option 4

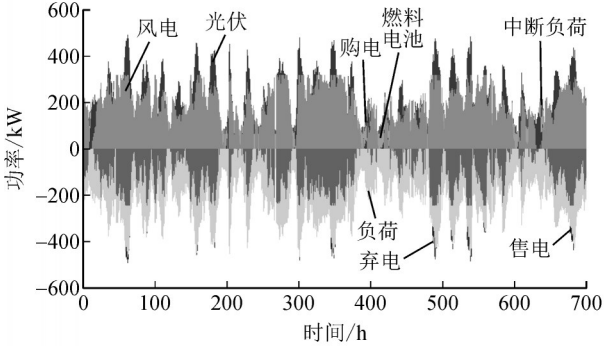
形成形式构建微网时,由仅有发电单元,为了避免弃电惩罚导致微网配置个数整体较低,在配置下的300~400 h发电量较大时,出现了较为严重弃电现象,且在400 h左右由于天气原因导致电能发电不足时,负荷中断现象较为严重,导致整体微网系统运行经济性与可靠性较低;当采取方案2风氢组成微网后,由于氢储能缓冲单元存在,300~400 h的弃电与负荷中断现象明显缓解,同时为了保证售电收益,风机数量明显提升,风电主体收益明显提升,但由于单一电源与氢储能出力的局限性,仍然存在负荷中断与弃电现象;当采用方案3风光碱性制氢主体组成微网后,由于两种电源的工作互补性以及氢储能缓冲单元存在,300~400 h的弃电与负荷中断现象基本没有,弃电率惩罚与负荷中断惩罚的降低致使微网总体收益提升,配置下的氢储能完全保证实



(a) 方案1配置下各系统功率图



(b) 方案2配置下各系统功率图



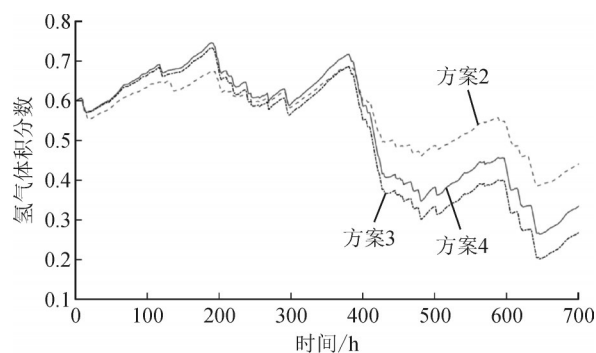
(c) 方案3配置下各系统功率图

图7 不同方案配置下各系统功率图

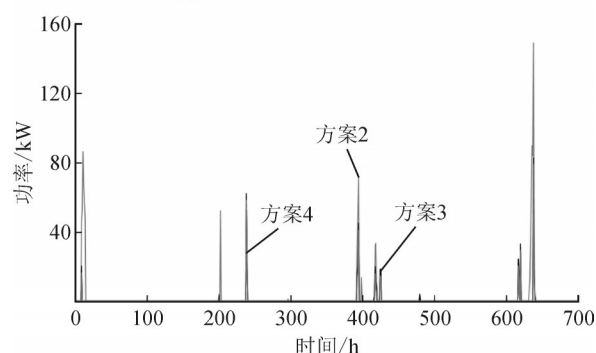
Fig. 7 Power diagrams for each system in different program configurations

现微网的能源消耗,但由于碱性制氢制氢量与工作特性较低,导致氢储能制氢收益不能最大化,仍需配置46组电解槽才能实现整体能源消纳,导致整体出力不足仍存在负荷中断现象,供氢量仅能保证33组燃料电池来补充微网缺额,方案4在使用PEMEL与AEL混合制氢的方式后,氢储能整体出力特性进一步提升,在优化配置后相比较方案3减少了6组电解槽的投入,300~400 h的弃电与负荷中断问题已然解决,由于具有优良制氢性能,保证了氢能供应后的燃料电池个数的增加,负荷中断惩罚的进一步降低保证了微网氢储能主体的收益提升,而风电、光伏收益相较于方案3也略微提升,但整体能量转化率得到了保证,系统供电可靠性进一步提升。

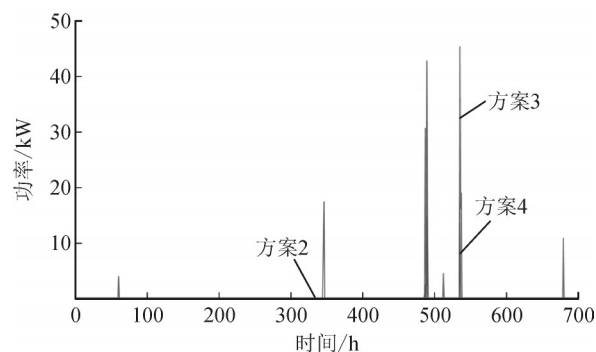
为了进一步分析混合制氢对系统整体性能影响,选取方案2、3、4储氢体积分数变化、弃风弃光以及负荷中断情况进行对比,对比曲线见图8。



(a) 不同方案下氢气体积分数变化



(b) 不同方案下负荷中断率曲线



(c) 不同方案下弃电率曲线

图8 含氢储能不同方案下系统运行特性曲线

Fig. 8 Characteristic curves of system operation under different scenarios of hydrogen-containing energy storage

由图8可以看出,在风+氢微网配置下,由于单一电源配置较高导致发电较大,导致系统整体制氢需求增多,但由于风光发电的随机性,在风电低功率段,负荷中断率提高致使需要更多的燃料电池发电,但由于同等容量的碱性制氢能力有限导致系统氢能供应不足负荷出现缺电状态,致使整体收益降低;而对于风+光+单一氢配置下,由于系统内能源供应充足且有足够的能量缓冲单元,因此能源供应整体裕度增大,氢储能配置降低,电网缺电较少,在400 h左右的用电高峰期氢储能可以出力供应微网缺电,保证系统内负荷供应,但由于单一制氢单元

的消纳能力有限,因此在350、500 h时刻出现了弃电现象;采用风+光+混合制氢配置下,在配置两种制氢单元前提下,氢储能消纳能力与氢能供应能力得到提升,从图8(a)中可以看出相对于单一制氢单元,混合制氢氢气体积分数变化速率明显更高,保障了在整个周期内的氢气供应保障储氢体积分数大于20%,从图8(c)中也可以发现弃电现象大幅度降低,保证了微网整体的负荷供应和能源消纳。

3.3 含氢微网配置下经济性因素分析

以方案4风+光+混合制氢场景为例,该场景下消纳率实现自给自足,因此需要研究不同混合制氢配置对系统收益与负荷中断率的影响。

为分析微网中混合制氢系统优势,设置制氢比例(AEL:PEMEL)为0到1,分析优化配置场景下系统负荷配置结果,配置结果见表4,收益及特性见表5,各系统收益曲线变化见图9。

表4 不同电解槽配比下的优化配置结果

Table 4 Optimized configuration results with different electrolyzer ratios

电解槽数量		风机	光伏	燃料电	储氢
AEL	PEMEL	数量	数量	池数量	个数
46	0	64	41	33	28
27	13	64	41	35	30
19	19	66	42	40	35
14	26	66	42	42	42
0	40	68	45	45	48

表5 不同配比下各主体收益及特性对比

Table 5 Comparison of returns and characteristics of subjects under different ratios

配比 (AEL: PEMEL)	风电收 益/万元	光伏收益/ 万元	氢储能收益/ 万元	负荷中断 率/%
1:0	7.535	2.160	3.795	0.87
2:1	7.545	2.165	3.895	0.76
1:1	7.753	2.170	3.546	0.52
1:2	7.759	2.176	3.372	0.45
0:1	8.012	2.260	2.314	0.36

由表4、5和图9分析可以看出当PEM电解槽配比不断提升时,由于PEM电解槽高效制氢特性,系统内产氢不断提升,为了保证氢储能主体氢体积分数稳定,需要增加储氢罐和燃料电池配套设备,因此光伏与风电主体能量利用不断提升,改善了整体消纳率,同时根据表5负荷中断率变化,随着AEL配比的减小,系统内可利用电能提高,可实现系统负荷电能供应,负荷中断率不断降低,但PEMEL主体制氢

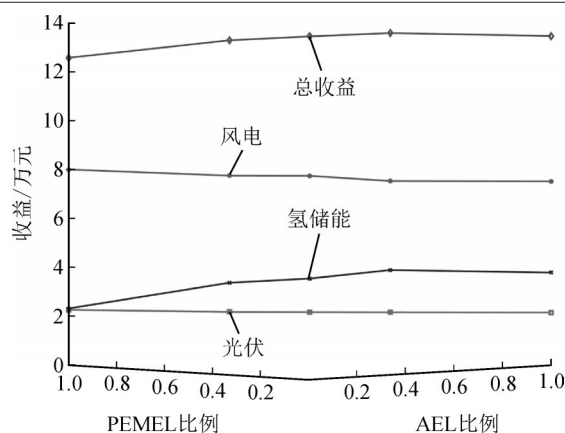


图9 不同电解槽配置下各主体收益曲线

Fig. 9 Revenue curves for each subject under different electrolyzer configurations

不具有经济性,导致购置成本提高,在配比高于一定比例后氢储能收益快速下降,虽然光伏与风电收益不断提升,但仅通过卖电制氢或者供给负荷的收益难以平衡PEM制氢成本,致使总体收益降低,因此合理配置氢储能系统内混合制氢配比对整体微网运行以及收益有着重要影响。

4 结论

含氢微网是实现氢能利用与新能源消纳的重要组成部分,为了实现含氢微网综合利用,以微网内各主体收益最大化为前提,文中提出了一种基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置方法,并结合相关算例进行仿真分析,结果表明:

1)为了保证微网内各主体利益,实现共同利益最大化,综合考虑三方收益模式,构建了基于博弈论的多主体收益模型,实现三方主体利益最大化,同时微网配备氢储能使得含氢微网系统收益提升6.8%,且实现了电能的完全消纳。

2)充分考虑氢储能特性,采用AEL+PEMEL组合制氢,一方面,随着电能利用率提升,氢储能主体收益提升2.6%,同时三方主体的收益提升;另一方面,制氢特性的提升改善了燃料电池出力氢需求问题,负荷中断率仅为0.76%。

3)混合制氢配比不同影响着含氢微网内各主体装机容量组成,PEM配比高时微网负荷供应稳定但总体收益低,AEL配比高时微网成本较低但总体收益低,文中通过NSGA-II算法对整体微网系统进行优化求解得到最优配置,改善了系统弃电与电能供应问题。

参考文献:

- [1] 代琼丹,邓昕,吴雪妍,等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器,2021,57(2):135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [2] 李建林,梁策,张则栋,等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器,2023,59(7):104-116.
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [3] 王士博,孔令国,蔡国伟,等. 电力系统氢储能关键应用技术现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报,2023,43(17):6660-6681.
WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Status, challenges and prospects of key application technologies for Hydrogen energy storage in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6681.
- [4] 余鹏飞,朱继忠,熊小伏,等. 基于储能的电力系统安全调控方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(19):173-186.
YU Pengfei, ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, et al. Regulating & control method of power system security based on battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 173-186.
- [5] 吴雄,贺明康,何雯雯,等. 考虑储能寿命的风—光—火—储打捆外送系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(15):66-75.
WU Xiong, HE Mingkan, HE Wenwen, et al. Optimal capacity of a wind - solar - thermo - storage - bundled power transmission system considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 66-75.
- [6] 张盛,郑津洋,戴剑锋,等. 可再生能源大规模制氢及储氢系统研究进展[J]. 太阳能学报,2024,45(1):457-465.
ZHANG Sheng, ZHENG Jinyang, DAI Jianfeng, et al. Research progress on renewable energy system coupled with large-scale Hydrogen production and storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 457-465.
- [7] 班潇凡,唐忠. 综合能源微网群的能量交互及多能市场建设效益分析[J/OL]. 现代电力: 1-13[2024-03-05].
https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0462.
BAN Xiaofan, TANG Zhong. Energy interaction of integrated energy microgrid cluster and benefit analysis of multi-energy market construction[J/OL]. Modern Electric Power: 1-13[2024-03-05]. https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0462.
- [8] 陈景文,周媛,李晓飞,等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力,2022,50(1):14-20.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid

- energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20.
- [9] 杨帆, 张章, 徐晶, 等. 面向可靠性提升的配电网分布式储能规划[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 188-196.
- YANG Fan, ZHANG Zhang, XU Jing, et al. Distributed energy storage planning of distribution network for reliability improvement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 188-196.
- [10] 张科杰, 张国彦, 徐宝昌, 等. 计及高比例新能源配电网电压风险的储能容量优化配置方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 85-93.
- ZHANG Kejie, ZHANG Guoyan, XU Baochang, et al. Optimal allocation method for energy storage capacity considering voltage risks with high proportion of new energy distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 85-93.
- [11] 胡臻达, 姜文瑾, 张林垚, 等. 基于改进猫群算法的氢储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 33-42.
- HU Zhenda, JIANG Wenjin, ZHANG Linyao, et al. Optimal allocation of Hydrogen storage capacity based on improved cat swarm optimization[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 33-42.
- [12] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516.
- XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of Hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [13] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity - Hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [14] 陈颢, 何山, 谢少华, 等. 基于合作博弈的风—光—电氢微网容量配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 395-405.
- CHEN Yi, HE Shan, XIE Shaohua, et al. Capacity configuration of wind - photovoltaic - electric Hydrogen microgrid based on cooperative game[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 395-405.
- [15] 李建林, 梁忠豪, 赵文鼎, 等. 混合电解槽制氢系统选型及评估方法[J/OL]. 高电压技术: 1-12[2024-03-05]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221949>.
- LI Jianlin, LIANG Zhonghao, ZHAO Wending, et al. Hybrid electrolyzer Hydrogen production system selection and evaluation methods[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2024-03-05]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221949>.
- [16] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8486-8495.
- ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8486-8495.
- [17] 李萃一, 韩莹, 李奇, 等. 计及效率特性的电—氢混合储能直流微网经济下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 69-80.
- LI Luoyi, HAN Ying, LI Qi, et al. Economic droop control strategy of a hybrid electric - Hydrogen DC microgrid considering efficiency characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 69-80.
- [18] 刘道兵, 袁野, 李世春, 等. 利用氢储能在含可再生能源系统容量配置综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 1-13.
- LIU Daobing, YUAN Ye, LI Shichun, et al. A review of capacity allocation of renewable energy system using Hydrogen storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 1-13.
- [19] 孙文杰, 武家辉, 张强. 基于双层博弈的配电网与多综合能源微网协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 26-38.
- SUN Wenjie, WU Jiahui, ZHANG Qiang. Coordinated optimization of a distribution network and multi-integrated energy microgrid based on a double-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 26-38.
- [20] 于飞, 葛思伟, 李梅航, 等. 工业园区微网调度研究与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 179-187.
- YU Fei, GE Siwei, LI Meihang, et al. Research on and simulation of microgrid scheduling in an industrial park[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 179-187.
- [21] 郑宇丁, 田桂珍. 直流微电网基于自适应下垂系数算法的多储能SOC均衡控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 131-138.
- ZHENG Yuding, TIAN Guizhen. SOC balancing control strategy based on adaptive droop coefficient algorithm for multi-energy storage units in DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 131-138.
- [22] 张开鹏, 杨雪梅, 张宏甜, 等. 考虑“光伏—储能”耦合参与调峰的配电网氢储能优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 95-103.
- ZHANG Kaipeng, YANG Xuemei, ZHANG Hongtian, et al. A study on the optimal configuration of hydrogen energy

- storage in the distribution network considering ‘photovoltaic-energy storage’ coupling participating and peak shaving[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(10):95-103.
- [23] 潘 军, 卢彦彬, 何彬彬, 等. 计及风、光出力不确定性的微电网经济调度研究[J]. *电工电能新技术*, 2024, 43(2): 56-64.
- PAN Jun, LU Yansha, HE Binbin, et al. Research on economic dispatch of microgrid considering uncertainty of wind and solar output[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2024, 43(2):56-64.
- [24] ZHANG X, SHEN J. Master-slave game operation scheduling strategy of an integrated energy system considering the uncertainty of wind and solar output[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024(11):1291728.
- [25] 包以哲, 李 薇, 张潇方, 等. 基于风、光联合出力仿真的多能联供系统鲁棒机会约束优化研究[J/OL]. *系统仿真学报*: 1 - 18[2024 - 03 - 05]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0848>.
- BAO Yizhe, LI Wei, ZHANG Xiaofang, et al. Robust opportunity constrained optimization of multi-energy combined supply system based on simulation of combined wind and photovoltaic outputs[J/OL]. *Journal of System Simulation*: 1 - 18[2024 - 03 - 05]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0848>.
- [26] MA Z, WITTEMAN L, WRUBEL J A, et al. A comprehensive modeling method for proton ex-change membrane electrolyzer development[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(34):17627-17643.
- [27] 张 真, 黎 妍. 氢储能经济性及应用前景研究[J]. *价格理论与实践*, 2023(2):93-97.
- ZHANG Zhen, LI Yan. Study on the economics and application prospects of Hydrogen energy storage[J]. *Price: Theory & Practice*, 2023(2):93-97.
- [28] OZDEMI-R N S, TAYMAZ I, SAN B G F, et al. Performance assessment and optimization of the PEM water electrolyzer by coupled response surface methodology and finite element modeling[J]. *Fuel*, 2024(365):131138.
- [29] 李洋洋, 邓欣涛, 古俊杰, 等. 碱性水电解制氢系统建模综述及展望[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4):567-582.
- LI Yangyang, DENG Xintao, GU Junjie, et al. Comprehensive review and prospect of the modeling of alkaline water electrolysis system for Hydrogen production[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4):567-582.
- [30] 李建林, 张则栋, 李光辉, 等. 基于模型层级分析的质子交换膜电解槽建模研究进展[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3):1105-1117.
- LI Jianlin, ZHANG Zedong, LI Guanghui, et al. Research on modeling of proton exchange membrane electrolyzer based on model hierarchical analysis[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3):1105-1117.
- [31] LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. Modeling and simulation of Hydrogen energy storage system for power-to-gas and gas-to-power systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2023, 11(3):885-895.
- [32] 马洋洋, 宋宛泽, 王鹏宇. 质子交换膜燃料电池建模研究综述[J]. *电源技术*, 2021, 45(12):1660-1664.
- MA Yangyang, SONG Wanze, WANG Pengyu. A review of modeling proton exchange membrane fuel cell[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(12):1660-1664.
- [33] 陈晚晴, 项康利, 林晓凡, 等. 基于主从博弈的综合能源系统电氢碳运行优化[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(11):143-151.
- CHEN Wanqing, XIANG Kangli, LIN Xiaofan, et al. Optimization of electricity, Hydrogen and Carbon operation in integrated energy system based on master-slave game[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(11):143-151.

侯永全(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事新型电力系统等方面的研究(E-mail:z15570679173@163.com)。