

风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统 容量配置优化

李永毅¹, 王子晗¹, 张磊^{1*}, 雷彤彤¹, 梁颖琦², 张国强³, 许诚³

(1. 华北电力大学动力工程系, 河北省保定市 071003; 2. 河北省低碳高效发电技术重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003; 3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市昌平区 102206)

Capacity Allocation Optimization of Integrated Hydrogen-electric Coupling System of Wind-solar-hydrogen-gas Turbine

LI Yongyi¹, WANG Zihan¹, ZHANG Lei^{1*}, LEI Tongtong¹, LIANG Yingqi², ZHANG Guoqiang³, XU Cheng³

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Higher demands on the flexibility of the power grid have been posed by the large-scale grid connection of renewable energy, and the issue of wind and solar abandonment under the high penetration rate of renewable energy has gained prominence. This paper proposes an integrated hydrogen-electric coupling system based on “electric-hydrogen” two-way coupling for wind-solar-hydrogen-gas turbines. The hydrogen-blend gas turbine combined cycle model is established in part working conditions using the data-driven method. The wind generator, photovoltaic panel, and electrolyzer mechanism models are integrated to establish the system full-working condition model based on the fusion of data and mechanism. The multi-objective capacity configuration optimization model based on NSGA-II algorithm is established. Under typical environmental conditions and load demand, the Pareto optimal solution set with the goals of greatest annual profit and minimum CO₂ emission is obtained. The findings indicate that the lowest power loss rate is 0.004 5, the lowest power abandonment rate is 0.010 5, and the CO₂ emission may be decreased to 396 g/(kW·h). Growing wind power's installed capacity is a more effective way to lower CO₂ emissions than growing PV. The lowest level of CO₂ emissions, which is 948,300 tons/year, can be achieved when wind power reaches

72.89 MW installed capacity. The pursuit of reduced CO₂ emissions will cause economic gains to decline, and the unwarranted pursuit of economic benefits will harm the system's ability to produce power reliably. The configuration scheme that yields the maximum economic benefits has an annual profit of 35.86 million yuan and a power supply loss rate of 0.104 9. This integrated wind-solar-hydrogen-gas turbine system can efficiently absorb renewable energy, lower CO₂ emissions, and increase power supply reliability.

KEY WORDS: hydrogen-electric coupling; hydrogen energy storage; hydrogen-blend gas turbine; gas turbine combined cycle; capacity allocation optimization

摘要: 可再生能源的大规模并网给电网的灵活性提出了更高的要求, 高可再生能源渗透率下的弃风弃光问题凸显。该文提出一种基于“电-氢”双向耦合的风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统, 使用数据驱动方法建立掺氢燃气轮机联合循环部分工况模型, 并融合风力发电机、光伏电池板和电解槽的机理模型建立系统全工况模型, 构建系统运行调控策略, 并建立基于 NSGA-II 算法的多目标容量配置优化模型。获得了典型环境参数和负荷需求下以年利润最大、CO₂ 排放量最低为目标的 Pareto 最优解集。结果表明: CO₂ 排放量可降低至 396 g/(kW·h), 缺电率最低为 0.004 5, 弃电率最低为 0.010 5; 相比于光伏, 提高风电装机容量更有利于降低 CO₂ 排放, 在风电装机容量达到 72.89 MW 时, CO₂ 排放量达到最低的 94.83 万 t/年; 追求低 CO₂ 排放将导致经济效益恶化, 而过度追求经济效益则不利于系统供电的可靠性, 经济效益最高的配置方案年利润为 3 586 万元, 功率供应缺失率达到 0.104 9。提出的风-光-氢-燃气轮机一体化系统, 可有效消纳

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0009-0009); 国家自然科学基金项目(52306010, 52076079)。

National Science and Technology Major Project (J2019-I-0009-0009); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52306010, 52076079).

可再生能源,降低CO₂排放,提高供电可靠性。

关键词: 氢电耦合; 氢储能; 掺氢燃气轮机; 燃气轮机联合循环; 容量配置优化

0 引言

绿色、稳定的能源供给体系是世界各国在能源领域的发展目标。中国在第75届联合国大会上提出“碳达峰,碳中和”的战略目标^[1]。截至2022年底,我国新建风光发电装机容量达1.2亿kW·h,风光发电装机总容量达到7.5亿kW^[2]。以风电和光伏为代表的可再生能源,因受地理、环境因素的多重影响,表现出较强的时间间歇性、功率波动性、空间分散性^[3-4],可再生能源并网规模不断扩大,给电网提出了更高的稳定性和灵活性要求,大规模可再生能源消纳问题日益凸显^[5-8]。优化可再生能源发展方式,促进存储消纳,坚持创新驱动,高质量发展可再生能源,是我国“十四五”时期可再生能源发展的主旋律^[9]。

氢能作为理想的清洁能源载体,是一种优异的储能介质,其具有储能规模灵活、可跨季节储能等优势,在电力系统中可起到平滑可再生能源波动、提高可再生能源消纳的作用^[10-11]。基于氢电耦合的能源转化模式,可进一步促进可再生能源的规模化开发和灵活、高效利用。单向的氢电耦合在系统灵活性和效率上存在不足。例如,曹蕃等^[12]从离网型和并网型等不同角度总结风电制氢技术研究进展,指出风电制氢技术在效率、可靠性、响应速度上还需要进一步提高。双向的氢电耦合技术尚不成熟,未能展现系统成本和效率优势,例如Angelo等^[13]研究微电网的kW级氢电系统,结果发现,微网氢储能发电系统效率略高于10%。霍现旭等^[14]分析目前可应用氢转电技术,指出燃料电池交直流转换器工作可靠性、稳定性问题还未解决。

我国风能、太阳能资源丰富,石油、天然气等优质化石资源短缺^[15],如何以氢为媒介,强化可再生能源与化石能源利用方式的高效、灵活耦合,是实现能源结构转型的重要途径。燃气轮机在启停速度、升降负荷速率、污染物排放等方面较燃煤机组有巨大优势^[16],燃气轮机联合循环在继承了简单循环灵活性优势的前提下将热效率提高到60%以上^[17]。近年来,世界三大燃气轮机制造厂商都开发了各自掺氢燃烧的微混燃烧器^[18]。而氢气在燃烧过程中具有零碳排放的特性,可作为燃气轮机的替代

燃料^[19-20]。燃气轮机灵活、高效、掺氢燃烧技术成熟,这些优势使燃气轮机具备氢电双向耦合的潜力,适合承担电网调峰等高灵活性任务,并能实现氢-电高效转换。Bahawan等^[21]开发了包含光伏发电、燃气轮机、燃气锅炉组件的混合能源工厂,以意大利帕尔马大学校园为研究案例,以一次能源消耗量最少为目标,优化混合能源工厂设备容量和运行策略,实现84%平均热电联产效率;利用燃气轮机性能优势,林俐等^[22]建立了基于氢燃气轮机的氢储能单元,通过氢燃气轮机直接实现氢电热互联,进而构建一个电-热-氢多能互补系统,实现了以系统电热运行成本最低、最大化消纳弃风为目标的优化调度。鲁明芳等^[23]建立了一种制氢-季节性氢储能-混氢燃气轮机系统,利用随机规划场景设计包含混氢燃气轮机的系统配置,求得最佳掺氢比为11%。

目前,通过氢储能解决风电、光伏等可再生能源消纳的研究与应用多局限在“电-氢”和“氢-电”的单向转化层面,难以形成灵活的调峰消纳能力。因此,从低碳发电和“电-氢-电”双向耦合角度出发,本文提出风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统,建立采用带精英策略的非支配排序的遗传算法的一体化氢电耦合系统配置多目标优化模型。以年利润最大和二氧化碳排放量最小为目标,对系统中风电、光伏、电解槽和储氢单元的容量配置进行了优化,从结果中分析获得了容量配置与碳排放情况、弃电率、缺电率、年利润之间的关系。研究结果可为发电碳减排、绿氢高效利用、多能电站开发建设提供理论指导。

1 风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统模型

1.1 系统结构

本文提出的风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统,由发电单元和氢储能单元两部分组成,发电单元由风电模块、光伏模块、掺氢燃气轮机联合循环模块组成,氢储能单元由电解槽、储氢模块组成,如图1所示。

1.2 系统运行逻辑

风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统供电来源为风电、光伏、燃气轮机联合循环。系统优先满足电网负荷,并优先选择可再生能源上网,燃气轮机联合循环根据负荷波动调节输出。当电网负荷下探超过燃气轮机联合循环调节范围时,燃气轮机

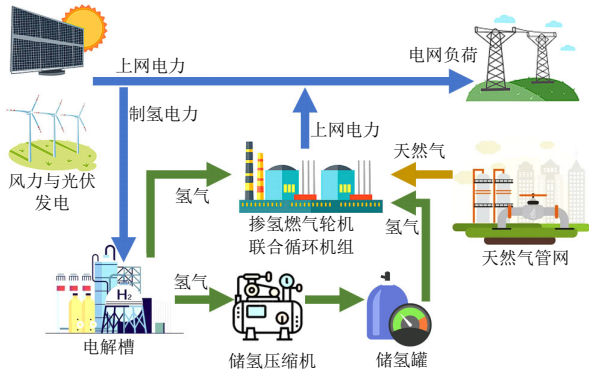


图 1 风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of integrated hydrogen-electric coupling system of wind-solar-hydrogen-gas turbine

联合循环不再降低负荷，盈余电力制氢。若制氢电力超过制氢或储氢单元容量限制，则产生弃电。制氢电力根据上网电价判断，优先选择高价电力上网。系统运行逻辑如图 2 所示。

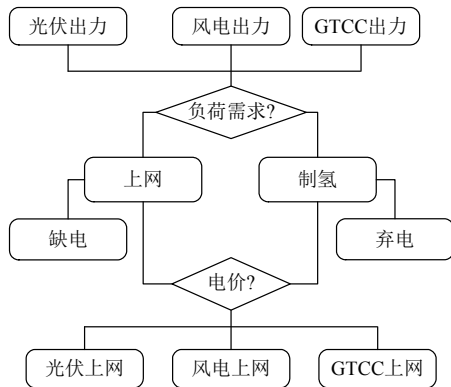


图 2 系统运行逻辑图

Fig. 2 System running logic diagram

1.3 风力发电机模型

风力发电机输出功率取决于发电机特性和轮毂高度处的风速，计算方式如下：

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0, v(t) < v_{in} \text{ or } v(t) > v_{out} \\ P_r \frac{v(t) - v_{in}}{v_r - v_{in}}, v_{in} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, v_r \leq v(t) \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{wt}(t)$ 为风机当前出力，kW； P_r 为风机的额定功率，kW； $v(t)$ 为轮毂高度处的实时风速，m/s； v_{in} 、 v_{out} 、 v_r 分别为风机的切入风速、切出风速、额定风速，m/s。

1.4 光伏电池板模型

光伏电池板的实际功率主要取决于板面太阳辐射强度和环境温度。具体计算如式(2)所示：

$$P_{pv}(t) = P_{sta} f_{pv} \frac{G(t)}{G_{sta}} \{1 + \alpha_T [T_a(t) - T_{a,sta}]\} \quad (2)$$

式中： $P_{pv}(t)$ 为当前光伏板出力，kW； P_{sta} 为光伏板

在标准参数下的额定功率，kW； f_{pv} 为功率衰退系数； $G(t)$ 为当前光照强度， kW/m^2 ； α_T 为功率温度系数； $T_a(t)$ 和 $T_{a,sta}$ 分别为当前光伏电池板温度和标准环境温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

光伏板温度 $T_a(t)$ 是由如下计算方式得到的：

$$T_a(t) = T(t) + \lambda G(t) \quad (3)$$

式中： $T(t)$ 为当前环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ 为辐射温度系数，本文取 0.025 6。

1.5 燃气轮机联合循环机组模型

燃机在偏离额定工况运行时，其效率和排放参数会产生较大波动，为精确模拟掺氢燃烧的燃机在不同工况下运行时的表现，本文采用数据驱动开发模型。BP 神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络，具有强大的多维函数映射能力^[24]。BP 神经网络算法包括信号的前向传播和误差的反向传播两个过程。输入信号通过隐含层的计算作用于输出层，产生输出信号，若输出与期望差距过大，则进入反向传播过程，反向传播是把误差信号按原来通路反向传回，并对每个隐层的各个神经元的权系数进行修改，直至输出达到期望。

BP 神经网络算法结构如图 3 所示。

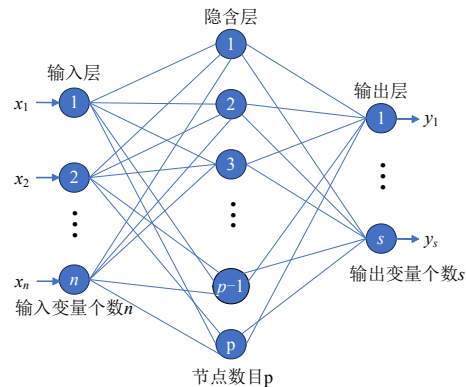


图 3 BP 神经网络算法结构示意图

Fig. 3 BP neural network algorithm diagram

本文利用 BP 神经网络算法开发燃气轮机联合循环机组模型，共使用 7560 组工况数据，训练数据涵盖 $-30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 环境温度、30%~100% 负荷率、0~10% 掺氢比例范围^[25-27]。模型可以根据计算需求，输入环境温度、负荷率、功率、掺氢比例，输出功率、负荷率、燃料流量、碳排放量。根据模型需要，设置输入层节点数目为 3 或 4，隐含层节点数目为 5，输出层节点数目为 1 或 2。取全部训练数据的 15% 作为验证集，15% 作为测试集，利用 Matlab 神经网络工具箱进行学习。验证集与测试集相关系数 R 达到 0.99 以上，均方误差(mean square error, MSE)

小于 10^{-3} , 见图4。

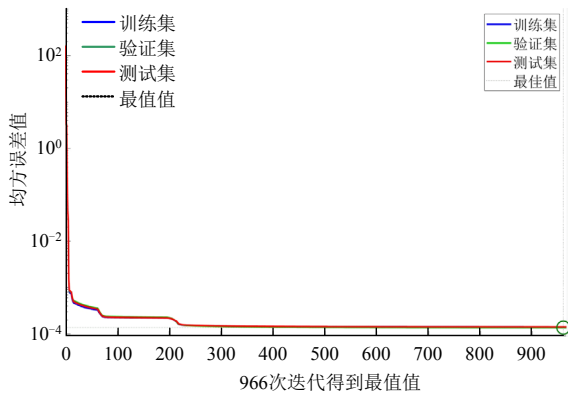


图4 BP神经网络数据相关度与模型均方差

Fig. 4 BP neural network data correlation and model mean square error

1.6 电解槽模型

本文选择使用碱性电解槽简化模型模拟制氢过程, 制氢量与电解槽输入功率成正比关系, 简化表达式如下(4)所示:

$$Q_{ac}(t) = P_{ac}(t) / \eta_{ac} \quad (4)$$

式中: $Q_{ac}(t)$ 为当前时段电解槽制氢量, $N \cdot m^3$; $P_{ac}(t)$ 为当前电解槽的输入功率, kW; η_{ac} 为电解槽的制氢效率, kW/Nm^3 。

1.7 储氢单元模型

氢气从电解槽输出后分为两路, 一部分进入燃机燃烧, 一部分经压缩存入储氢罐。氢气压缩机模型如式(5)所示:

$$W_{comp}(t) = \frac{[H_{s,in}(t) - H_{s,out}(t)]Q_{in}(t) \cdot \rho(t)}{3600 \cdot \eta_{s,comp}} \quad (5)$$

式中: $W_{comp}(t)$ 为当前压缩机耗功, $kW \cdot h$; $H_{s,out}(t)$

和 $H_{s,in}(t)$ 分别为当前电解槽出口氢气焓和存入储氢罐氢气的等熵焓, kJ/kg ; $Q_{in}(t)$ 为 t 到 $t+1$ 时段存入氢量, $N \cdot m^3$; $\rho(t)$ 为当前存入氢气的密度, $kg/N \cdot m^3$; $\eta_{s,comp}$ 为压缩机等熵效率, 取 0.8。

氢气经过压缩机加压后存入储氢罐内。由于不同时刻制氢流量和用氢流量在不断变化, 所以储氢罐内氢气量和压力时刻都发生变化。在 t 时刻, 储氢罐内氢气容量如下所示:

$$Q_{tank}(t) = Q_{tank}(t-1) + Q_{in}(t-1) - Q_{out}(t-1) \quad (6)$$

式中: $Q_{tank}(t-1)$ 和 $Q_{tank}(t)$ 分别表 $t-1$ 和 t 时刻储氢罐内氢气的量, $N \cdot m^3$; $Q_{out}(t-1)$ 表示 $t-1$ 到 t 时间段储氢罐流出的氢气量, $N \cdot m^3$ 。

1.8 系统计算逻辑

风速、光照、负荷作为系统输入数据, 经过发电单元功率调度、氢储能单元运行调控、掺氢比例调节三部分处理, 实现系统模型运转。系统模型处理数据流程如图5所示。

发电单元功率调度逻辑如图6所示。以满足电网负荷为首要目标, 优先保证可再生能源出力, 燃气轮机联合循环机组负责补充输出。为了在高效区间发挥燃气轮机调峰优势, 避免低负荷带来的底循环不稳定工况和排放超标情况, 燃气轮机联合循环在本系统中保持较高的负荷率下限运行。在燃气轮机联合循环调节范围外, 电解槽起到扩展系统调峰能力下限的作用。当系统负荷发生波动时, 首先调整燃气轮机联合循环输出功率, 当出现负荷不断下探的情况时, 燃气轮机联合循环保持最低负荷率运行, 此时盈余电力制氢, 氢气暂时存储在储氢罐内,

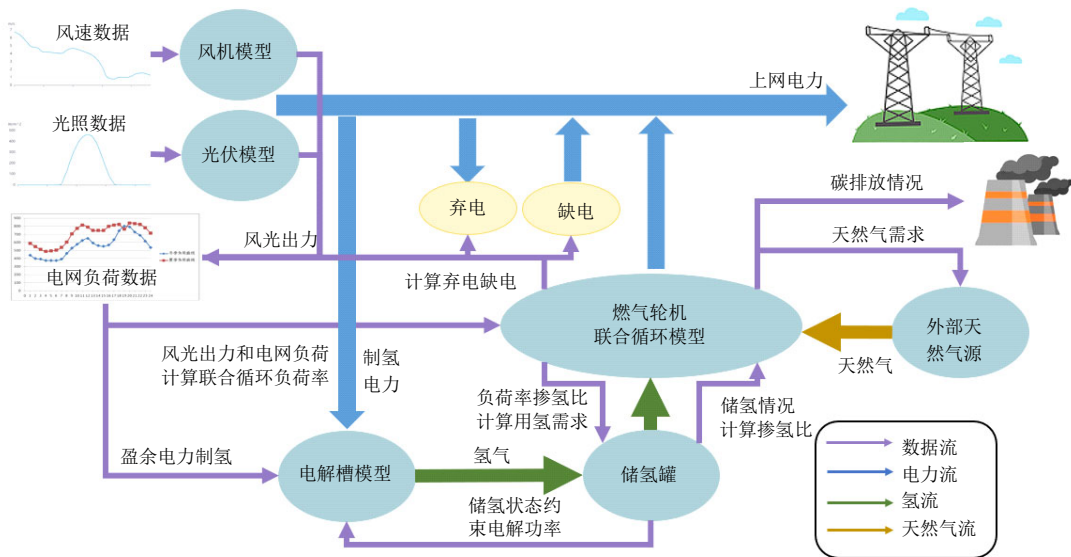


图5 数据处理流程图

Fig. 5 Data processing flowchart

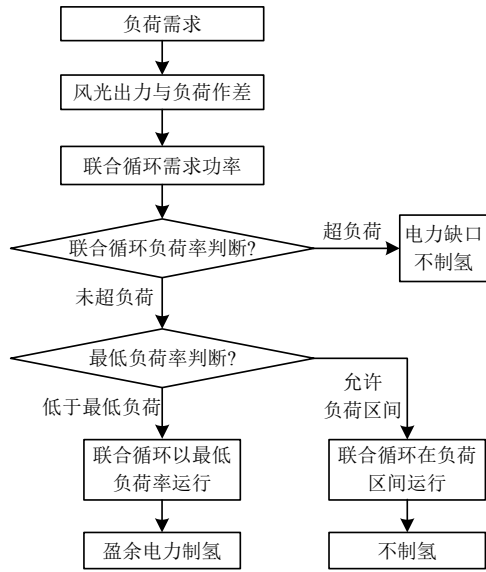


图 6 发电单元功率调度逻辑图

Fig. 6 Power scheduling logic diagram of power generation unite

最终由燃机掺烧消耗。

氢储能单元调控逻辑(见图 7)主要处理电解槽工作功率、制氢流量、储氢罐内容量情况和弃电量。当有盈余电力制氢时，首先判断盈余电力是否超过电解槽装机容量，超出部分则为弃电。电解槽输出氢气分为两路，一路不通过储氢单元，直接用于掺氢燃烧；另一路根据掺氢情况，多余氢气存入储氢罐。

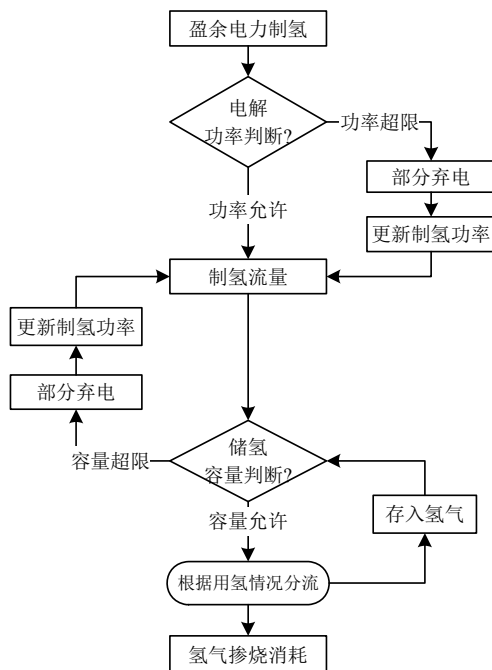


图 7 氢储能单元调控逻辑图

Fig. 7 Hydrogen energy storage unit regulation logic diagram

考虑到储氢单元的安全，前一时刻储氢量达到罐容量的安全上限时，本时刻的制氢量仅满足发电需求即可，不再存储。

掺氢比例调节逻辑(见图 8)主要处理燃机用氢流量、天然气流量和二氧化碳排放量。在氢气供应充足时，燃机以默认掺氢比运行。当本时刻储氢量低于储氢罐的安全冗余下限时，则不再从储氢罐内输出氢气，此时重新调整掺氢比。燃机的天然气消耗流量和烟气碳排放情况是根据掺氢比例、燃气轮机联合循环功率、环境温度等参数确定。

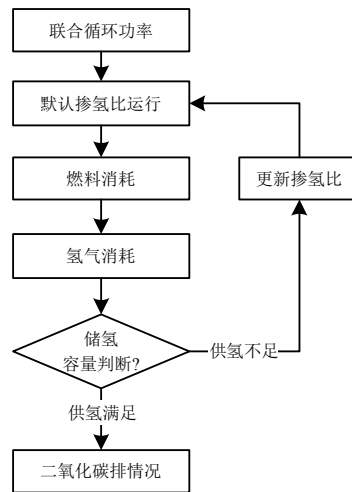


图 8 掺氢比例调节逻辑图

Fig. 8 Hydrogen blend ratio regulation logic diagram

2 多目标容量配置优化模型

2.1 多目标遗传算法

本文采用 NSGA-II 算法进行系统容量配置的多目标优化，计算流程如图 9 所示，其基本思想为：

1) 随机产生规模为 N 的初始种群，非支配排序后通过选择、交叉、变异操作得到第一代子代种群；

2) 从第 2 代开始，将父代种群与子代种群合并，进行快速非支配排序，同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算，根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群；

3) 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群，依此类推，直到满足程序结束的条件。

2.2 决策变量

该系统采用额定功率为 400 MW 的燃气轮机联合循环机组，并以此为核心配置燃气轮机联合循环风电、光伏、电解槽、储氢单元的容量，因此容量配置模型的决策变量为风机装机容量 x_1 、光伏电池板装机容量 x_2 、电解槽装机容量 x_3 、储氢罐储能时

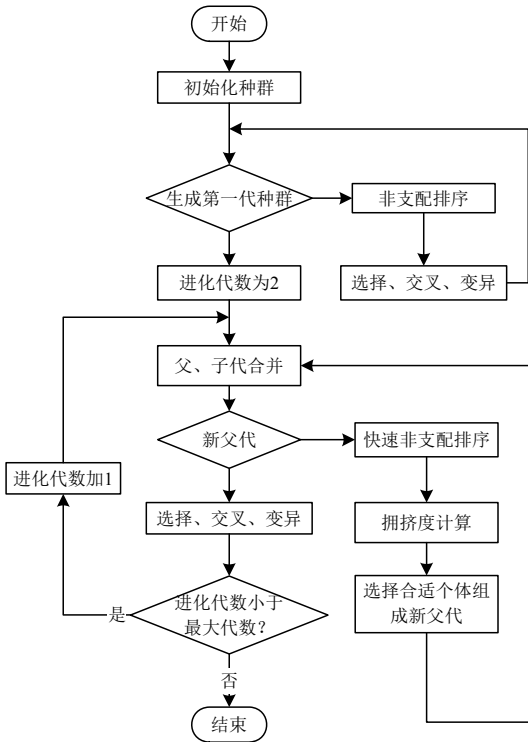


图9 NSGA-II 算法流程图

Fig. 9 NSGA-II algorithm flow chart

长 x_4 。其中，储氢罐储能时长表示所配置的电解槽以额定功率运行时储氢罐能连续存储的时长。

风-光-氢-燃气轮机一体化系统充分利用了燃气轮机掺氢燃烧和灵活的变负荷性能，风电、光伏的上网功率可通过电解槽的制氢功率和燃气轮机联合循环功率的双层调控，并且燃气轮机的用氢过程和负荷调节过程不存在严格的约束关系，在一定程度上实现了制氢与储氢的解耦，燃气轮机快速爬坡性能以及一定的灵活掺氢能力，具备了较强的氢-电解耦能力。

2.3 优化目标

本文以年利润为经济目标、年碳排放量为环境目标，建立了多目标优化模型。

年利润由发电成本与售电收入构成，如下：

$$B = R_{\text{net}} - C_{\text{LOCE}} \cdot W_s \quad (7)$$

式中： B 为年利润，元； R_{net} 为上网电量年收益，元； C_{LOCE} 为平准化度电成本，元/(kW·h)； W_s 为系统年发电量，kW·h。

上网电量收益包含三部分，分别为风机收益、光伏上网收益、燃气轮机联合循环上网收益，收益计算方式以风机为例，如式(8)所示：

$$R_{\text{net}} = \sum R_{\text{pv,net}}(t) + \sum R_{\text{wt,net}}(t) + \sum R_{\text{gtcc,net}}(t) \quad (8)$$

$$R_{\text{wt,net}}(t) = \frac{1}{4} P_{\text{wt,net}}(t) \cdot p_{\text{wt,net}}(t) \quad (9)$$

式中： $R_{\text{pv,net}}$ 、 $R_{\text{wt,net}}$ 、 $R_{\text{gtcc,net}}$ 分别为光伏上网收益、风机上网收益和燃气轮机联合循环上网收益； $R_{\text{wt,net}}(t)$ 为当前风机的上网收益，元； $P_{\text{wt,net}}(t)$ 为当前风机上网功率，kW； $p_{\text{wt,net}}(t)$ 为当前风机上网电价，元/(kW·h)。

平准化度电成本计算方式如下：

$$C_{\text{LOCE}} = \frac{n_{\text{CRF}} \cdot C_{\text{TNPC}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{wast}} + C_{\text{gap}}}{W_s} \quad (10)$$

$$n_{\text{CRF}} = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (11)$$

$$C_{\text{TNPC}} = C_{\text{TNPC-pv}} + C_{\text{TNPC-wt}} + C_{\text{TNPC-gtcc}} + C_{\text{TNPC-ac}} + C_{\text{TNPC-comp}} + C_{\text{TNPC-tank}} \quad (12)$$

式中： n_{CRF} 为资本回收因子； r 为利率，取 10%； y 为项目周期，取 20 年； C_{TNPC} 为项目总净现值成本元，其中包含光伏电池板、风机、燃气轮机联合循环机组、电解槽、氢气压缩机和储氢罐的现值成本； C_{fuel} 、 C_{wast} 、 C_{gap} 分别为天然气成本、弃电成本、缺电成本，元。

所有设备寿命默认 20 年，与项目周期相等，不考虑设备替换成本。所有设备现值成本计算方式相同，这里以光伏电池板 $C_{\text{TNPC-pv}}$ 为例，计算如下：

$$C_{\text{TNPC-pv}} = C_{\text{I-pv}} + C_{\text{OM-pv}} \quad (13)$$

$$C_{\text{I-pv}} = C_{\text{PR-pv}} \cdot N_{\text{pv}} \quad (14)$$

$$C_{\text{OM-pv}} = m_{\text{pv}} \cdot I_{\text{pv}} \cdot \sum_{n=1}^{20} \left(\frac{1+0.04}{1+r} \right)^n \quad (15)$$

式中： $C_{\text{I-pv}}$ 代表光伏设备投资成本； $C_{\text{OM-pv}}$ 代表光伏设备维护成本； $C_{\text{PR-pv}}$ 代表光伏设备单位投资成本，元/kW； N_{pv} 代表光伏装机容量，kW； m_{pv} 代表光伏设备维护系数。

天然气成本、弃电惩罚、缺电惩罚计算如下：

$$C_{\text{fuel}} = C_{\text{PR-fuel}} \times \sum F_{\text{fuel}}(t) \quad (16)$$

$$C_{\text{wast}} = e_{\text{waste}} \times \sum P_{\text{waste}}(t) \quad (17)$$

$$C_{\text{gap}} = e_{\text{gap}} \times \sum P_{\text{gap}}(t) \quad (18)$$

式中： $C_{\text{PR-fuel}}$ 表示单位天然气价格； $F_{\text{fuel}}(t)$ 代表当前天然气流量(kg/s)； e_{waste} 、 e_{gap} 分别代表弃电惩罚系数和缺电惩罚系数； $P_{\text{waste}}(t)$ 、 $P_{\text{gap}}(t)$ 分别代表当前弃电功率和缺电功率(kW)。

由于系统内只有燃机是碳排放源，所以系统年碳排放量表达式为

$$F_{\text{CO}_2} = \sum f_{\text{CO}_2}(t) \quad (19)$$

式中： $f_{CO_2}(t)$ 代表当前时刻燃机烟气排放 CO_2 的量， kg/s 。

2.4 约束条件

容量配置优化模型考虑的约束条件包括电力平衡约束、燃气轮机联合循环负荷约束、储氢容量约束、燃料掺氢比例约束，具体如下。

1) 电力平衡约束：

$$P_{ac}(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gtcc}(t) - P_{load}(t) + P_{gap}(t) - P_{waste}(t), \forall t \quad (20)$$

$$P_{load}(t) = P_{wt,net}(t) + P_{pv,net}(t) + P_{gtcc,net}(t) + P_{gap}(t), \forall t \quad (21)$$

式中： $P_{gtcc}(t)$ 为当前燃气轮机联合循环机组出力， kW ； $P_{load}(t)$ 为当前电负荷需求， kW 。

2) 燃气轮机联合循环负荷约束：

$$\lambda_{gtcc,min} \leq \lambda_{gtcc}(t) \leq \lambda_{gtcc,max}, \forall t \quad (22)$$

式中 $\lambda_{gtcc}(t)$ 为当前燃气轮机联合循环机组负荷率。

3) 储氢安全性约束：

$$Q_{tank,min} \leq Q_{tank}(t) \leq Q_{tank,max}, \forall t \quad (23)$$

$$Q_{tank,max} = x_4 \cdot \frac{x_3}{\eta_{ac}} \quad (24)$$

式中 $Q_{tank,max}$ 代表以电解槽装机容量 x_3 满负荷制氢、此制氢流量连续存储时长为 x_4 的储氢容量， Nm^3 。

4) 燃料掺氢约束：

$$\varphi_{min} \leq \varphi(t) \leq \varphi_{max}, \forall t \quad (25)$$

$$Q_{use}(t) = Q_{ac}(t) - Q_{in}(t) + Q_{out}(t), \forall t \quad (26)$$

式中： $\varphi(t)$ 为当前体积分数的掺氢比； $Q_{use}(t)$ 为当前燃烧使用的氢气量， Nm^3 。

3 算例分析

3.1 算例分析

以我国某地历史全年风速、光照、环境温度和全年用电负荷数据作为模型的输入，以 15 min 为数据时间步长，全年共 35040 个时间节点，如图 10—13 所示。可知，该地区全年风速集中在 0~20 m/s 之间，偶尔极端天气风速突破 25 m/s；白天光照强度集中在 500 kW/m^2 附近，夏季光照最好；年最低气温出现在在 1 月份，约 -10 $^{\circ}C$ ，夏季温度集中在 25~35 $^{\circ}C$ ；电力负荷与节假日有相关性，春节期间、五一期间和十一期间出现明显波谷。

负荷数据显示，全年最低负荷点为 109 MW、最高负荷点为 433 MW，而本文采用的燃气轮机联合循环机组设计容量为 400 MW。为了满足最高负

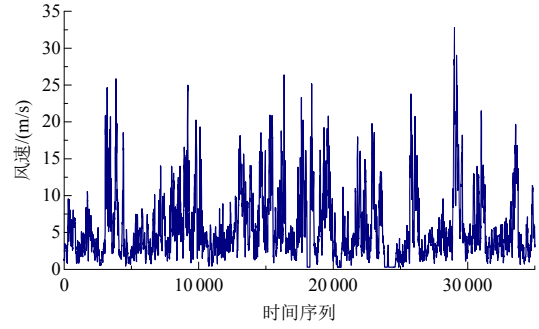


图 10 全年风速数据

Fig. 10 Annual wind speed data

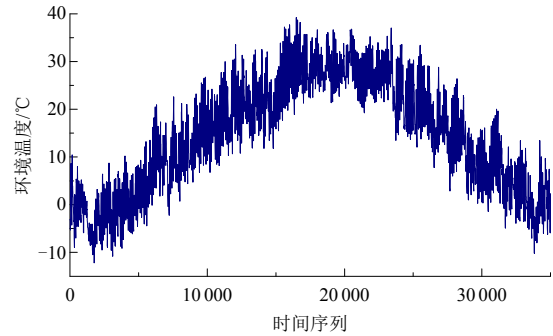


图 11 全年环境温度数据

Fig. 11 Annual ambient temperature data

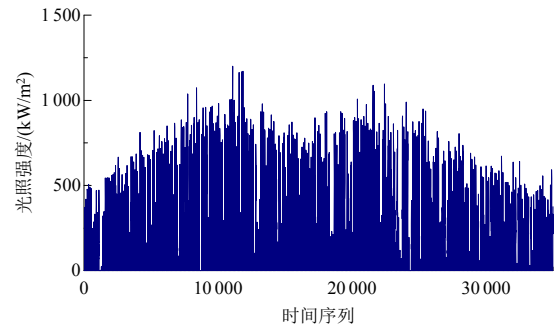


图 12 全年光照强度数据

Fig. 12 Annual solar intensity data

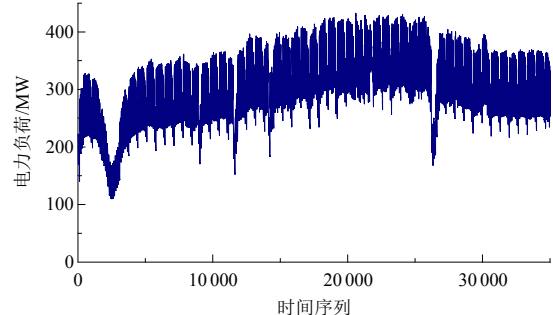


图 13 全年电力负荷数据

Fig. 13 Annual power load data

荷需求并考虑设备空间体积，本文对决策变量取值范围按照表 1 做出以下限制。

由于系统存在弃电情况，而上网电价也随时间呈阶梯型变化。在第 1 节系统运行逻辑中出现弃电情况，所以需要判断每种设备上电情况，弃电优先舍弃低价电力，上网电价如表 2 所示，其余系

表1 决策变量约束

Table 1 Decision variable constraint

决策变量	下限	上限
风机装机容量/MW	0	73
光伏电池板装机容量/MW	0	73
电解槽装机容量/(N·m ³ /h)	0	20 000
储氢罐储能时长/h	1	3

表2 上网电价

Table 2 Feed-in tariff

时段	风电/ (元/(kW·h))	光电/ (元/(kW·h))	联合循环发电/ (元/(kW·h))
00:00~08:00	0.33	0.34	0.62
08:00~10:00	0.37	0.34	0.71
10:00~15:00	0.35	0.34	0.67
15:00~20:00	0.37	0.34	0.71
20:00~24:00	0.35	0.34	0.67

统关键参数如表3所示。

表3 系统关键参数

Table 3 System key parameter

参数	数据
燃气轮机联合循环机组投资成本 C_{I_gtcc} /元	3×10^8
燃气轮机联合循环设备维护系数 m_{gtcc}	0.066
光伏设备单位投资成本 C_{PR_pv} /(元/kW) ^[28]	4 000
光伏设备维护系数 m_{pv} ^[29]	0.02
风电设备单位投资成本 C_{PR_wt} /(元/kW) ^[30]	5 000
风电设备维护系数 m_{wt} ^[28]	0.02
制氢设备单位投资成本 C_{PR_ac} /(元/kW) ^[30]	2 500
制氢设备维护系数 m_{ac} ^[28]	0.01
氢气压缩机投资成本 C_{I_comp} /元	3×10^6
氢压缩机维护系数 m_{comp}	0.02
储氢设备单位投资成本 C_{PR_tank} /(元/N·m ³) ^[30]	280
储氢设备维护系数 m_{tank} ^[29]	0.01
弃电惩罚系数 e_{waste}	0.5
缺电惩罚系数 e_{gap}	2
天然气价格 C_{PR_fuel} /(元/N·m ³)	3

3.2 计算结果及分析

3.2.1 方案选择

采用 NSGA-II 算法多目标容量配置优化, 设置种群大小为 500, 最大迭代次数 30。最终得到了一组包含 175 个数据点的分布均匀、变化规律、范围宽广的 Pareto 最优解集, 如图 14 所示。

观察 Pareto 前沿分布图发现, 系统碳排放量随年利润增长而增加, 且呈现逐渐加快的趋势。主要原因是燃气轮机联合循环发电上网价格高于可再生能源发电, 即可再生能源上网占比越低售电收入越高、碳排放量越大。

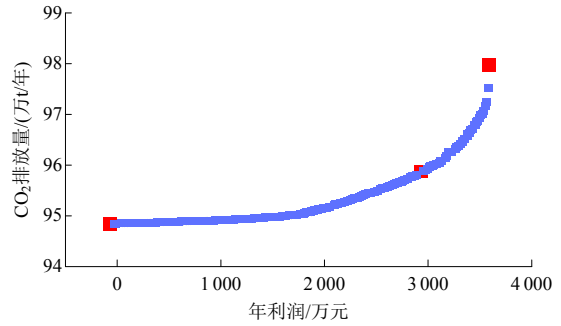


图14 帕累托前沿分布图

Fig. 14 Pareto front distribution map

电网负荷需求是有限的, 这意味着总上网电力是有限的, 无限增加可再生能源装机量虽然可以降低碳排放, 但带来的结果是更高的投资成本、更多的弃电惩罚和更低的利润, 所以在 Pareto 前沿图线最左端出现了利润为负的情况。

功率供应缺失率(loss of power supply probability, LPSP), 其定义为系统产电不能满足负荷需求的时间所占总时间的比例, 可作为系统可靠性的评价指标^[31]。计算 175 组最优解的 LPSP, 从中选择最优数据作为配置方案 1, 另外选择碳排放量最低的一组解和利润最大的一组解分别作为配置方案 2 和配置方案 3。配置方案数据如表 4 所示,

表4 3种配置方案比较

Table 4 Compare the three configuration schemes

方案	参数	数值
方案 1	LPSP	0.079 88
	风电装机容量/kW	41 494
	光伏装机容量/kW	58 294
	电解槽装机容量/(N·m ³ /h)	5 203
	储氢罐储能时长/h	2.183 4
	设计储氢容量/Nm ³	11 361
	年利润/万元	2 932.861 3
方案 2	CO ₂ 排放量/(万吨/年)	95.86
	LPSP	0.082 81
	风电装机容量/kW	72 890
	光伏装机容量/kW	26 950
	电解槽装机容量/(N·m ³ /h)	18 078
	储氢罐储能时长/h	2.98
	设计储氢容量/Nm ³	53 927
方案 3	年利润/万元	-66.078 5
	CO ₂ 排放量/(万吨/年)	94.83
	LPSP	0.104 88
	风电装机容量/kW	8 186
	光伏装机容量/kW	50 089
	电解槽装机容量/(N·m ³ /h)	3 412
	储氢罐储能时长/h	1.47
设计储氢容量/Nm ³	5 017	
年利润/万元	3 586.455 0	
CO ₂ 排放量/(万吨/年)	97.96	

图 14 中红色五角星标记了 3 种配置方案在 Pareto 前沿分布图中的位置。

3.2.2 不同方案的供电效果

不同配置方案的供电效果如图 15 所示。可知，3 种配置方案的整体图线外观与负荷情况吻合，在 1 月份附近出现供电最低情况，此时 3 种配置的都没有可再生能源电力上网；夏季上网电量最高，随后，在十月份再次出现明显波谷；风电由于偶发大风天气原因，在上网电量中频繁表现出尖峰情况。

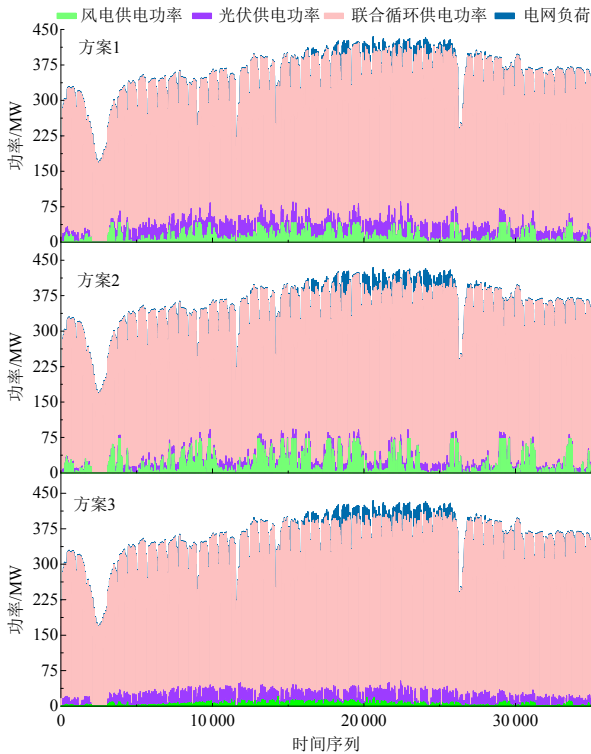


图 15 3 种方案供电效果比较

Fig. 15 Compare the power supply effect of three schemes

从图 15 的蓝色区域面积来看，方案 1 对电网负荷覆盖面积最大，符合最低的功率供应缺失率；方案 2 和 3 虽然负荷覆盖面积差不多，但可以看出，方案 3 明显蓝色范围更宽，不满足负荷需求的时间占比更多，所以功率供应损失率更大。方案 1 的风电装机容量与光伏装机容量较为接近，其可再生能源上网电量也表现出较为均匀的情况。反观方案 2，风电装机容量远大于光伏装机容量，其风电上网尖峰表现最突出。方案 3 风电装机容量过小，风电上网电力占比太低，尖峰表现不明显。

3.2.3 不同方案的制氢功率

制氢电力来源如图 16 所示。由于风光发电设备和制氢设备装机容量不同，3 种方案制氢功率表现不一。方案 2 的风光电力制氢瞬时最大功率突破 80 MW，且风光电力制氢的比例是 3 种方案中最高

的，这与其风光发电装机量最大相吻合。方案 1 与 3 制氢电力比例接近，其最大制氢功率受电解槽装机容量限制，所以出现了多处功率尖峰值相等。由于系统逻辑优先选择低价电力制氢，当风光发电出力较少时，其可用于制氢的电力也较少，所以方案 1 和 3 的风光电力制氢比例更低。

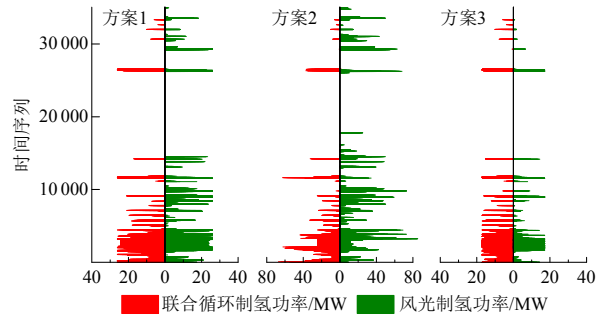


图 16 3 种方案制氢电力来源比较

Fig. 16 Compare the hydrogen power sources of three schemes

3.2.4 电解槽装机容量与设计储氢容量的关系

由图 17 可知，电解槽装机容量与设计储氢容量呈现出类似正比例的关系。在电解槽装机容量小于 8 000 Nm³/h 的时候，此时储氢容量并不完全随电解槽容量增大而增大，在此范围储氢罐的储能时长是有波动的；当电解槽装机容量大于 8 000 Nm³/h 后，储氢罐储能时长受约束限制，都接近上限 3 h，所以出现了类似正比例的关系。

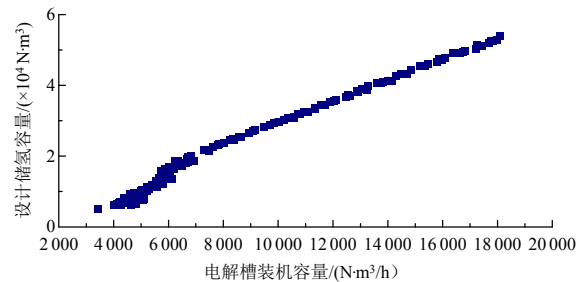


图 17 电解槽装机容量与设计储氢容量的关系

Fig. 17 Relationship between the electrolytic cell capacity and the hydrogen storage capacity

3.2.5 容量配置与碳排放情况的关系

图 18 展示了容量配置与碳排放情况的关系，图中，X 轴为风电装机容量，Y 轴为光伏装机容量数，Z 轴为碳排放量，散点颜色变化代表电解槽装机容量变化。

从 XZ 轴投影面和 YZ 轴投影面可以看出，碳排放量增加与风电装机容量减少有明显关系，光伏装机容量在 50 MW 以下时，其容量增加并不能弥补风电装机容量减小带来的碳排放恶化，当光伏装机容量大于 50 MW 后，开始改变碳排放恶化现象。

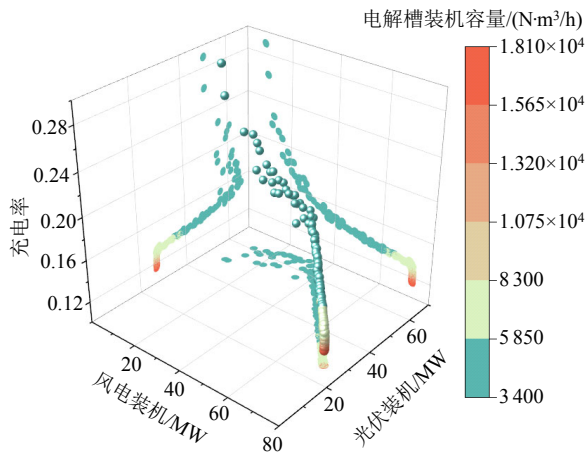


图 18 容量配置与碳排放情况的关系

Fig. 18 The relationship between capacity configuration and carbon emission

这是因为光伏发电存在明显周期性，夜间没有发电能力，而风机可以全天候发电，所以碳排放量对风电装机容量更敏感。

同理，从 XY 轴投影面可以看出，光伏装机容量在 50 MW 以下时，风电装机容量与光伏装机容量变化呈现类似反比例关系。这也是因为风机和光伏发电特性不同，在可再生能源装机总量约束的情况下，高比例风电能够带来更多可再生能源发电出力，上网电量中更多的可再生能源电力意味着更低的系统碳排放量。但随着光伏装机容量不断提高，其发电量逐渐超过风电，此时受上网电价和弃电惩罚等多种因素影响，这种反比例关系就不明显了。

观察散点颜色可以看出，在 Z 轴最低位置电解槽装机容量变化明显，但在 Z 轴较高位置处，可再生能源发电量受装机容量总和约束已经无提升空间，能够用于制氢的电力有限，无论如何提高制氢能力，都不能有效降低系统碳排放量。将年碳排放量折合成度电碳排放量，范围在 396~415 g/(kW·h) 之间，相较于燃煤电厂，度电碳排放量优势明显^[32]，对比独立的天然气电厂，度电碳排放量依然有所降低^[33]。

3.2.6 容量配置与弃电率的关系

图 19 展示了容量配置与弃电率的关系。弃电率表现出来的特性与碳排放特性类似，变化范围在 0.1~0.3 之间。在电解槽装机容量变化不大的情况下，可再生能源配置对弃电率起主导作用。光伏增加风电减少，意味着可再生能源发电每日的周期波动性增强，必然会导致更高的弃电率。风机容量加大会降低这种周期波动，也会带来更大的发电量，此时提高制氢设备容量，有助于消纳风电，所以弃

电率并没有增加。

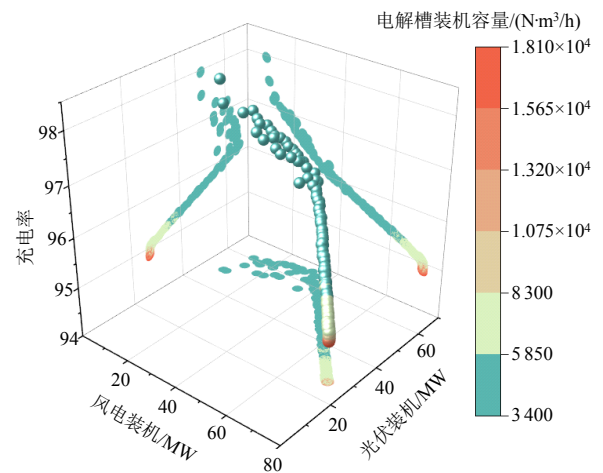


图 19 容量配置与弃电率的关系

Fig. 19 Relationship between capacity configuration and power abandonment rate

3.2.7 容量配置与缺电率的关系

图 20 展示了容量配置与弃电率的关系，这里缺电率定义为缺电量与年负荷需求电量之比。光伏装机容量在 50 MW 以下时，光伏装机容量越大，缺电率越低。这是因为在白天用电高峰期，也是太阳辐照最强的时段，而风速并不一定会在此时段内增强，所以增加光伏装机容量带来的效果提升明显。但随着光伏容量提高风机容量减小，低光照期间发电量不足的劣势逐渐显现，随后缺电率又有升高。缺电率变化范围在 0.004~0.007 之间，在并网的供电系统当中，无论是使用电化学储能技术还是使用燃料电池的“氢转电”技术，该系统供电更可靠性更高^[34-35]。

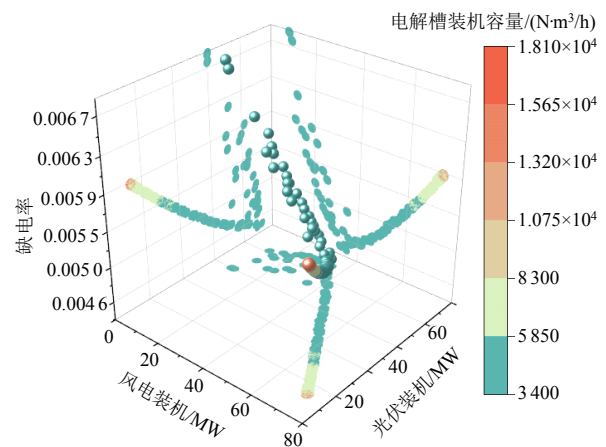


图 20 容量配置与缺电率的关系

Fig. 20 Relationship between capacity configuration and power shortage rate

3.2.8 容量配置与年利润的关系

图 21 展示了容量配置与弃电率的关系， Z 轴为

年利润数据。

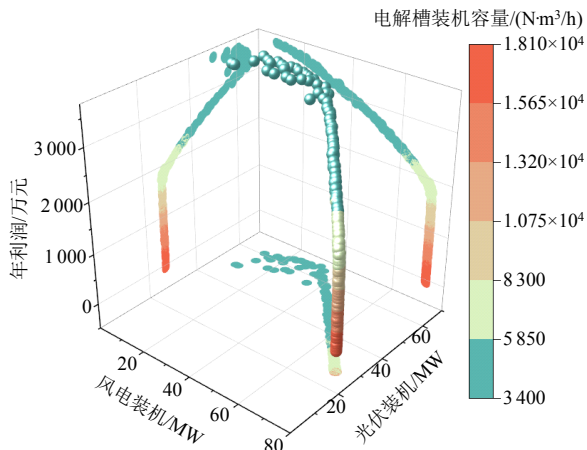


图 21 容量配置与年利润的关系

Fig. 21 Relationship between capacity configuration and annual profit

如图 21 所示,年利润变化范围在-67~359 万元之间。从图 21 中散点分布情况可以看出,并没有某一处数据聚集,各种设备容量的配比都会对利润产生影响。首先从可再生能源装机量上分析,由于燃气轮机联合循环上网电价更高,所以可再生能源上网电量越多,系统年收益越少。风电容量在 70 MW 以下、光伏容量在 30 MW 以上的范围内,利润与缺电率存在相关性,这是由高昂的缺电惩罚系数导致。在此范围之外,当可再生能源装机容量变化不大的情况下,利润随着电解槽容量增加而降低,说明制氢设备的成本对利润产生了主要影响。

4 结论

为提升可再生能源的消纳能力,平抑因可再生能源波动,本文提出一种风-光-氢-燃气轮机一体化系统,通过制储氢单元实现风光出力的灵活上网,掺氢燃气轮机的快速变负荷能力进一步提升了系统内功率分配的灵活调控能力。利用 BP 神经网络算法开发了掺氢燃气轮机联合循环高精度模型,构建了多目标容量配置优化模型,以年利润最大和年碳排放量最少为目标,对系统进行了容量配置优化,得出以下结论:

1) 提出的风-光-氢-燃气轮机一体化系统能够利用制氢储氢消纳可再生能源盈余电力,结合燃气轮机联合循环的灵活调峰能力,可有效消纳可再生能源,降低碳排放,提高供电可靠性。

2) 重点分析了 3 种典型配置方案在经济效益、碳排放、系统可靠性方面的相互制约关系,发现碳排放水平的降低将导致经济效益的恶化,过度追求

经济效益并不利于系统供电的可靠性。

3) 光照强度的周期性波动更加明显,因此提高系统风电的装机容量更有利于降低碳排放,但由于光照强度与用电负荷的周期性变化相似,提高光伏装机容量是降低缺电率的有效途径。

参考文献

- [1] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. 中华人民共和国中央人民政府, 2020. https://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
- Xinhua News Agency. Xi Jinping delivers important speech at the general debate of the 75th UN general assembly[EB/OL]. Central People's Government of the People's Republic of China, 2020. https://www.gov.cn/xinwen/2020/09/22/content_5546168.htm(in Chinese).
- [2] 中国电力企业联合会. 2022 年全国电力工业统计快报一览表[EB/OL]. 中国电力企业联合会, 2023. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-317446>.
- China Electricity Council. 2022 National Electricity Industry Statistical Snapshot List[EB/OL]. China Electricity Council, 2023. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-317446>(in Chinese).
- [3] 张颖, 艾欣. 考虑风光出力不确定性及相关性的配电网规划方法[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 318-325.
- ZHANG Ying, AI Xin. Distribution network planning method considering uncertainty and correlation of wind-photovoltaic power output[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(2): 318-325(in Chinese).
- [4] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040(in Chinese).
- [5] 崔杨, 李崇钢, 赵钰婷, 等. 考虑风-光-光热联合直流外送的源-网-荷多时段优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 559-572.
- CUI Yang, LI Chonggang, ZHAO Yuting, et al. Source-grid-load multi-time interval optimization scheduling method considering wind-photovoltaic- photothermal combined DC transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 559-572(in Chinese).
- [6] LUO Guoliang, DAN Erli, ZHANG Xiaochun, et al. Why the wind curtailment of northwest China remains high[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 570.
- [7] CHENG Chuntian, YAN Lingzhi, MIRCHI A, et al. China's booming hydropower: systems modeling

- challenges and opportunities[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(1): 02516002.
- [8] 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 Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, 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(in Chinese).
- [9] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. “十四五”可再生能源发展规划[R]. 北京: 国家发展改革委, 2021. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance, et al. Renewable energy development plan for the 14th five-year plan[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2021(in Chinese).
- [10] 卢捷, 于立军, 郑培, 等. 风氢耦合系统超前控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(3): 53-60.
- LU Jie, YU Lijun, ZHENG Pei, et al. Research on advanced control strategy of wind hydrogen coupling system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 53-60(in Chinese).
- [11] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 1-10.
- PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accomodation of high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 1-10(in Chinese).
- [12] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2187-2200.
- CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2187-2200(in Chinese).
- [13] BOVO A, POLI N, TROVÒ A, et al. Hydrogen energy storage system in a multi-technology microgrid: technical features and performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(32): 12072-12088.
- [14] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. *储能科学与技术*, 2016, 5(2): 197-203.
- HUO Xianxu, WANG Jing, JIANG Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2016, 5(2): 197-203(in Chinese).
- [15] 方圆, 张万益, 曹佳文, 等. 我国能源资源现状与发展趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2018, 38(4): 34-42, 47.
- FANG Yuan, ZHANG Wanyi, CAO Jiawen, et al. Analysis on the current situation and development trend of energy resources in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018, 38(4): 34-42, 47(in Chinese).
- [16] GONZALEZ-SALAZAR M A, KIRSTEN T, PRCHLIK L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1497-1513.
- [17] WANG Zhen, DUAN Liqiang, ZHANG Zuxian. Environmental thermoeconomic performance analysis of gas turbine combined cycle under off-design conditions [J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(1): 127-142.
- [18] 邱朋华, 卢成, 张林瑶, 等. 氢燃料微混燃烧技术研究进展[J]. *热能动力工程*, 2023, 38(5): 14-23.
- QIU Penghua, LU Cheng, ZHANG Linyao, et al. Research progress of hydrogen micromix combustion technology[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(5): 14-23(in Chinese).
- [19] 李慧. GE 燃气发电集团: 低碳未来, 燃气轮机发电不可或缺[N]. *中国能源报*, 2022-06-06(006).
- LI Hui. GE Gas Power Group: low carbon future, gas turbine power generation is indispensable[N]. *China Energy News*, 2022-06-06(006)(in Chinese).
- [20] PASHCHENKO D. Hydrogen-rich gas as a fuel for the gas turbines: a pathway to lower CO₂ emission [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113117.
- [21] BAHLOWAN H, GAMBAROTTA A, LOSI E, et al. Sizing and operation of a hybrid energy plant composed of industrial gas turbines, renewable energy systems, and energy storage technologies[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(6): 061013, doi: 10.1115/1.4049652.
- [22] 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): 3007-3016.
- LIN Li, ZHENG Xinyao, ZHOU Longwen. Wind-PV-thermal-storage multi-energy complementary optimal dispatching based on hydrogen gas turbine[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3007-3016(in Chinese).
- [23] 鲁明芳, 李咸善, 李飞, 等. 季节性氢储能-混氢燃气轮机系统两阶段随机规划[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 6978-6992.
- LU Mingfang, LI Xianshan, LI Fei, et al. Two-stage stochastic programming of seasonal hydrogen energy storage and mixed hydrogen-fueled gas turbine system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 6978-6992(in Chinese).
- [24] WANG Xue. Power system short-term load forecasting

- based on BP neural network[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2378(1): 012068.
- [25] LI Yongyi, ZHANG Guoqiang, WANG Ligang, et al. Part-load performance analysis of a combined cycle with intermediate recuperated gas turbine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112346.
- [26] LI Yongyi, ZHANG Guoqiang, BAI Ziwei, et al. Backpressure adjustable gas turbine combined cycle: a method to improve part-load efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 739-754.
- [27] LI Yongyi, LIN Yuchao, HE Yichong, et al. Part-load performance analysis of a dual-recuperated gas turbine combined cycle system[J]. *Energy*, 2023, 269: 126744.
- [28] XU Chunbo, KE Yiming, LI Yanbin, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 215: 112892.
- [29] GHARIBI M, ASKARZADEH A. Size and power exchange optimization of a grid-connected diesel generator-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system considering reliability, cost and renewability[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 25428-25441.
- [30] 高玲玉. 基于氢能的风-火耦合系统结构优化与容量配置[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
GAO Lingyu. Structure optimization and capacity allocation of wind-thermal power coupling system based on hydrogen energy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022(in Chinese).
- [31] 明梦君, 张涛, 王锐, 等. 混合可再生能源系统多目标优化综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2908-2917.
MING Mengjun, ZHANG Tao, WANG Rui, et al. Review of multi-objective optimization for hybrid renewable energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2908-2917(in Chinese).
- [32] 王萍萍, 赵永椿, 张军营, 等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(10): 170-183.
WANG Pingping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(10): 170-183(in Chinese).
- [33] 李彬, 潘雨情, 文华杰, 等. 基于碳减排的氢电资源耦合发展现状及展望[J]. *供用电*, 2023, 40(10): 106-113.
LI Bin, PAN Yuqing, WEN Huajie, et al. Current status and prospects of hydrogen electricity resource coupling development based on carbon emission reduction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 106-113(in Chinese).
- [34] 张磊, 郭语, 石嘉豪, 等. 风火储一体化电站功率特性研究[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(6): 568-574, 581.
ZHANG Lei, GUO Yu, SHI Jiahao, et al. Study on power characteristics of wind-coal-battery coupling integrated power station[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(6): 568-574, 581(in Chinese).
- [35] 李伟, 刘立, 王豪琦, 等. 基于两阶段模型的风光互补系统储能容量配置优化方法[J]. *水电与新能源*, 2023, 37(1): 74-78.
LI Wei, LIU Li, WANG Haoqi, et al. Optimization of the energy storage capacity for wind-solar hybrid system based on a two-stage model[J]. *Hydropower and New Energy*, 2023, 37(1): 74-78(in Chinese).



李永毅

在线出版日期: 2023-12-28。

收稿日期: 2023-10-07。

作者简介:

李永毅(1990), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事热力系统优化, 燃气轮机联合循环运行特性, 固体氧化物燃料电池复合系统等方面的研究工作, liyongyi@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 张磊(1983), 男, 博士, 教授, 主要从事叶轮机械内部流动稳定性、超临界 CO₂ 布雷顿循环发电、风光火储一体化、关键设备稳定和高效运行等方面的研究工作, zhang_lei@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)