

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406123

基于 MOPSO 算法的风光氢燃气轮机 互补系统优化研究

王亚平¹, 王雨田¹, 李永毅^{2,3}, 王子晗⁴, 张磊^{2,3}

- (1. 国能国华(北京)燃气热电有限公司, 北京 100018;
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 保定 071003;
3. 华北电力大学动力工程系, 河北 保定 071003;
4. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 为满足高比例可再生能源对电网调节能力提升的迫切需求, 解决荷源不平衡问题, 针对风光氢燃气轮机互补系统的优化配置方法进行了研究。构建了考虑启停和掺氢燃烧的燃气轮机联合循环机组数据驱动模型和光伏、风机与电解槽理论模型, 提出了互补系统能量分配策略, 基于多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法建立了系统容量配置优化模型。以平准化度电成本 A、荷源偏差和年碳排放量为优化目标, 对互补系统进行了容量配置优化。结果表明, 在选取气象数据和负荷数据下, 系统配备风机 85.28 MW、光伏 108.69 MW、电解槽 78.02 MW、储氢罐 139 302 m³ 时, 全年运行最高可实现碳减排 6%, 荷源偏差仅 0.02%, 验证了由电解槽-燃气轮机组成的系统架构能够有效解决电网荷源偏差问题。

[关键词] 燃气轮机联合循环; 氢燃气轮机; 氢电转化; 可再生能源消纳; 多目标粒子群优化

[引用本文格式] 王亚平, 王雨田, 李永毅, 等. 基于 MOPSO 算法的风光氢燃气轮机互补系统优化研究[J]. 热力发电, 2025, 54(1): 35-45. WANG Yaping, WANG Yutian, LI Yongyi, et al. Optimization of wind-solar-hydrogen gas turbine complementary system configuration based on MOPSO algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(1): 35-45.

Optimization of wind-solar-hydrogen gas turbine complementary system configuration based on MOPSO algorithm

WANG Yaping¹, WANG Yutian¹, LI Yongyi^{2,3}, WANG Zihan⁴, ZHANG Lei^{2,3}

- (1. Guoneng Guohua (Beijing) Cogeneration Power Co., Ltd., Beijing 100018, China;
2. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;
3. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
4. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To meet the urgent need for enhanced grid regulation capabilities due to the high penetration of renewable energy and to resolve load-source imbalances, the optimization configuration method for a wind-solar-hydrogen gas turbine complementary system is investigated. The data-driven model for a gas turbine combined cycle unit that considering start-stop dynamics and hydrogen-blending combustion is developed, along with theoretical models for photovoltaic arrays, wind turbines, and electrolyzers. An energy distribution strategy for the system is proposed, and the system capacity configuration optimization model based on MOPSO algorithm is established. With the objectives of minimizing the levelized cost of electricity, load-source deviation and annual carbon emissions, the capacity configuration of the complementary system is optimized. The results demonstrate that, using selected meteorological and load data, the system equipped with 85.28 MW wind turbines, 108.69 MW photovoltaic arrays, 78.02 MW electrolyzers, and a 139 302 m³ hydrogen storage tank can achieve up to a 6%

收稿日期: 2024-06-06 网络首发日期: 2024-12-09

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB4102600)

Supported by: National Key Research and Development Program of China for Young Scientists (2023YFB4102600)

第一作者简介: 王亚平(1983), 男, 高级工程师, 主要研究方向为发电技术及电力智能监控等, 16170096@ceic.com。

通信作者简介: 李永毅(1990), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为热力系统优化及燃气轮机联合循环运行特性等, liyongyi@ncepu.edu.cn。

reduction in annual carbon emissions and a load-source deviation of only 0.02%. This validates that the system architecture integrating electrolyzer-gas turbine can effectively mitigate load-source deviation issues in power grid.

Key words: gas turbine combined cycle; hydrogen gas turbine; power-to-hydrogen conversion; renewable energy consumption; multi-objective particle swarm optimization

为实现 2030 年碳达峰及 2060 年碳中和目标, 中国电网的发电设备朝低碳化和多元化趋势发展, 可再生能源装机容量不断提高^[1]。风能和光能等可再生能源发电具有很强的不确定性和间歇性^[2], 为满足稳定供电需求, 传统电厂的运行负担扩大, 电厂的调节频率加快, 运行在低效率区间的时间越来越长, 以煤电为主的能源结构难以解决荷源在时空上的不平衡问题^[3-4]。通过新型电力技术来平抑电网波动, 帮助可再生能源稳定消纳显现出重要的现实意义。

氢能作为一种清洁、高效的能源, 正迅速成为全球能源体系的重要组成部分^[5]。氢气作为一种高效的储能介质, 可以通过电解水将电能转化为氢气储存, 从而在电力供应过剩时进行储能, 可长时间储存并在需要时迅速释放, 发挥调峰作用^[6]。氢气可以通过燃气轮机实现“氢-电”灵活转换, 此前有学者研究了通过燃气轮机及其联合循环进行“氢-电”转换的经济可行性。其中, Jülch 等人^[7]以平准化储能成本为参考指标, 分析了各种储能方案的经济性, 研究发现以 2030 年的长期储能为背景, 氢储能搭配燃气轮机联合循环是最优选择。Welder 等人^[8]评估了 4 种不同的重整技术(燃气轮机(GT)、燃气轮机联合循环(GTCC)、燃气发动机和燃料电池), 发现通过燃气轮机联合循环进行“氢-电”转换在发电成本上最具竞争力且投资成本更低。

“氢-电”转换中燃气轮机及其联合循环在动态性能和污染排放方面也具有优势。无论是燃气轮机简单循环还是联合循环, 燃气轮机机组在国内电网中承担重要调峰任务, 燃气轮机平均综合调频性能指标为 0.94, 9F 级联合循环机组能够实现 21 MW/min 的变负荷速率^[9]。在材料和结构设计不断突破的背景下, 燃气轮机简单循环和联合循环的效率能够达到 44% 和 65%^[10], 联合循环机组掺氢还可进一步提高满负荷运行状态时的效率。通过改进低氮燃烧室和优化低氮燃烧技术, 在燃料掺氢体积比 30% 时燃气轮机可大幅降低一氧化碳排放, 且不会造成 NO_x 排放显著增加^[11]。对燃气轮机掺氢动态性能的探索发现, 掺氢比变化并不会显著影响压气机运行安全, 在低负荷下掺氢比变化对机组发生部件超温的影响较小^[12]。

燃气轮机及其联合循环具备灵活、高效、掺氢、低碳排放等优势, 适合作为“氢-电”灵活转换的系统组件, 近年针对燃气轮机耦合氢储能系统的研究逐渐成为热点。李永毅等^[13]设计了一种可再生能源与掺氢联合循环耦合的供电系统, 掺氢比在一定范围内可调, 实现了“电-氢-电”双向耦合, 提高了区域供电稳定性, 并在一定程度上减少了 CO₂ 排放。林俐等^[14]提出一种基于燃氢燃气轮机的氢储能单元, 进而构建“电-热-氢”多能互补系统, 以电热运行成本最低和最大弃风消纳为目标开展调度优化, 实现了氢储能单元电能利用率 75%, 具有较大性能优势。Bahlawan 等人^[15]设计了一种包含 PV/GT/ASHP/AC/PEM/HS/BES/TES 的孤岛可再生能源系统, 该系统燃气轮机使用纯氢燃料, 利用优化后的粒子群算法研究位于意大利和广州的 2 种气候条件案例, 证明了基于 100% 可再生能源孤岛系统的可行性。Brey^[16]提出了一种季节性氢储能计划, 利用西班牙春季和夏季可再生能源产生的剩余能量制得氢气并存储, 用于秋季和冬季燃气轮机运行, 其中燃气轮机使用天然气混氢燃料, 该方案能大大减少天然气进口需求。

使用掺氢燃料的燃气轮机在可再生能源制氢再利用方面具有经济优势和性能优势, 但以上系统设计还存在一定局限性: 燃气轮机具有动态性能优势, 但在系统层级设计上往往忽略机组启停过程; 对于区域供电系统, 考察其可再生能源消纳能力通常忽视了系统供电稳定性。基于以上问题, 本文提出一种风光氢燃气轮机互补系统, 建立考虑燃气轮机启停和燃料掺氢比例变化的系统全工况模型, 进一步构建了以平准化成本(A)、荷源偏差和年碳排放量为目标的系统优化模型, 使用多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法对算例地区开展容量配置优化, 并分析了可再生能源装机容量和制氢设备装机容量与优化目标之间的关系。

1 系统介绍

1.1 系统结构

本文围绕既有燃气轮机联合循环机组设计了

可再生能源耦合制氢储氢的风光氢燃气轮机互补系统。该系统通过风力发电机、太阳能电池板和掺氢燃气轮机产生电力，在谷时负荷，由质子交换膜（proton exchange membrane, PEM）电解水制氢设备和储氢设备承担系统电力消纳存储任务。系统能够充分发挥 PEM 电解水系统的快速启停特性与燃气轮机使用掺氢燃料的特性，通过调节掺氢比与储氢罐充放氢过程摆脱制氢与用氢的相互制约，实现“电-氢-电”灵活转化。系统设备组成如图 1 所示。

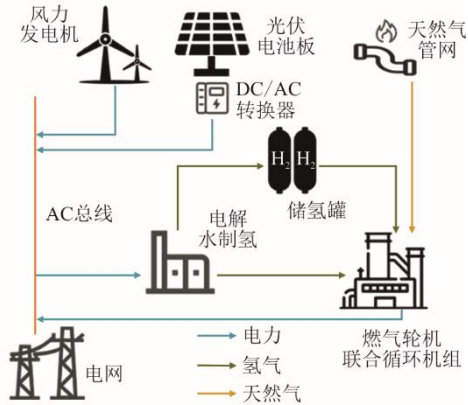


图 1 风光氢燃气轮机互补系统结构

Fig.1 Architecture diagram of the wind-solar-hydrogen gas turbine complementary system

1.2 运行策略

风光氢燃气轮机互补系统模型运行策略如图 2 所示。

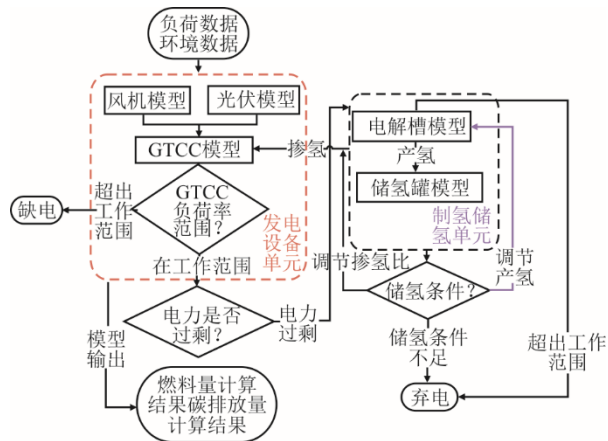


图 2 系统运行策略

Fig.2 Operation strategy of the system

首先根据该时刻风电、光伏的出力之和，得到可再生能源出力；将可再生能源出力与该时刻的电力负荷进行比较，根据需求调节联合循环机组出力；联合循环机组运行在功率上下限范围内，帮助系统初始调节；当联合循环机组运行负荷低于下限

时，机组保持最低 40% 负荷率运行，此时由制氢系统消纳盈余电力；当任意连续 2 h 内超过半数时间负荷需求低于运行下限此时停机，单次停机不少于 2 h；氢气可以与天然气掺混供给燃气轮机使用，也可以将过剩氢气存储，待制氢量不足时使用；当储氢容量不足时，逐渐调节天然气氢气掺混比例，最低可使用纯天然气燃烧，以避免因为储氢容量限制造成联合循环机组停机。

1.3 设备模型

1.3.1 风力发电机模型

风力发电是利用风力带动发电机转动产生电能，其出力主要受到风速等因素的影响，同时受到风机的切入风速、额定风速和切出风速等参数的制约，风电出力模型为^[17]：

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

式中： $P_{WT}(t)$ 为风机当前出力； P_r 为风机的额定功率； $v(t)$ 为实时风速； v_{in} 、 v_{out} 、 v_r 分别为风机的切入风速、切出风速、额定风速，分别取 3、22、16 m/s。

1.3.2 光伏电池板模型

光伏发电是利用太阳能光伏组件的光电效应产生电能，其出力主要受光照强度、温度等因素的影响，通常使用经验系数公式表达其模型出力^[18]：

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

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

式中： $P_{PV}(t)$ 为光伏板当前出力； P_{sta} 为光伏板模型在标准状态下的额定功率； f_{PV} 为功率衰退系数，取 0.8； $G(t)$ 为当前光照强度； α_T 为功率温度系数，取 0.005； $T_a(t)$ 和 $T_{a,sta}$ 分别为当前光伏板温度和标准环境温度，取 25 °C； $T(t)$ 为当前环境温度； λ 为温度辐射系数，取 0.025 6。

1.3.3 燃气轮机联合循环模型

本文采用 BP 神经网络法建立 GTCC 数据驱动模型。模型输入端由负载率、天然气混合氢气体积比和进气温度构成，输出端由输出功率、燃料消耗、烟气排放量和烟气成分构成。

模型的神经网络结构包含 4 层隐含层，隐含层神经元数为 5。模型训练数据来自于文献[19-21]搭建模型产生的结果，参考 GTCC 机组的设计参数见表 1。

训练数据共 20 160 组,取其中随机 70%数据点用作模型训练集,剩余 30%数据点用作测试集和验证集。训练数据涵盖宽泛,环境温度覆盖-30~40 °C,负荷率 30%~100%,氢气混合体积比 0~30%,这能避免使用模型时因数据超出训练范围引起的外推失真。模型训练过程如图 3 所示,示意了信号的正

向传播和误差的反向传播。输入信号穿过隐藏层并作用于输出层,产生输出信号。如果输出和预期输出之间的差异太大,则启动反向传播过程。在反向传播中,误差信号沿着原始路径传输回来,并修改隐藏层中每个神经元的权重系数,直到输出达到预期值。

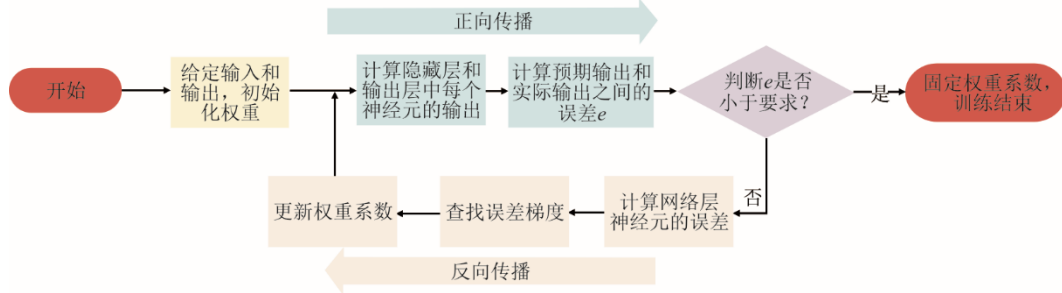


图 3 BP 神经网络训练流程
Fig.3 Training flowchart of BP neural network

表 1 联合循环机组设计参数
Tab.1 Design parameters of the combined cycle unit

项目	数值
发电频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
iso 输出功率/MW	400
压气机级数	15
压比	16.9
透平级数	4
基本负荷透平入口温度/°C	1 230.0
主蒸汽压力/MPa	12.33
主蒸汽温度/°C	564.4
再热蒸汽压力/MPa	2.91
再热蒸汽温度/°C	549.4

经验证,GTCC 神经网络模型均方误差(mean squared error, MSE)在训练过程的 1 000 次循环后达到最优值 1.28×10⁻⁵。模型误差分布直方图如图 4 所示,其中 99%误差集中在±0.02 范围内。

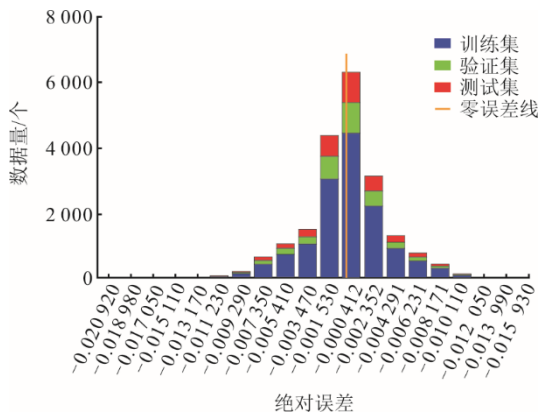


图 4 神经网络模型误差直方图
Fig.4 Error histogram of the neural network model

1.3.4 电解水制氢储氢单元模型

从以往模拟经验可知,PEM 电解槽效率与电压效率、电流效率有关,电压效率与电流效率又与质子交换膜厚度、工作温度、电解质导电率等因素有关。在不考虑性能衰减的前提下,本文使用的 PEM 电解槽模型,整机由多组电解模块串联组成,每个模块额定功率 320 kW。单模块模型计算方式如下^[22]。

PEM 电解槽效率 ϵ_{ELE} 由电流效率 ϵ_I 与电压效率 ϵ_U 乘积计算得到:

$$\epsilon_{ELE} = \epsilon_I \cdot \epsilon_U \tag{4}$$

$$\epsilon_I = \frac{I - I_{loss}}{I} = \frac{iA - I_{loss}}{iA} \tag{5}$$

$$I_{loss} = 2F \cdot A \cdot D_H \cdot S_H \cdot \Delta p / e_M \tag{6}$$

式中: i 为电流密度; A 为质子交换膜有效面积,取 0.016 m²; F 为法拉第常数,取 9.65×10⁴; D_H 为氢气扩散系数; S_H 为氢气溶解系数; Δp 为膜两侧压差,取 3×10⁶ Pa; e_M 为质子交换膜厚度,取 1.78×10⁻⁴ m。

结合式(5)和式(6),电解槽电流效率可表达为:

$$\epsilon_I = 1 - \frac{2F \cdot D_H \cdot S_H \cdot \Delta p}{i \cdot e_m} \tag{7}$$

电压效率 ϵ_U 计算方式为:

$$\epsilon_U = \frac{U_m}{U_m + (E_A + E_C) + IR_0} \approx \frac{U_m}{U_m + E_A + IR_0} \tag{8}$$

式中: U_m 为热中性电压; E_A 为阳极过电压; E_C 为阴极过电压,由于数值较小通常忽略不计; R_0 为电解槽等效电阻, IR_0 构成欧姆电压。

阳极过电压 E_A 表达式为:

$$E_A = \frac{RT_e}{\alpha_A z F} \ln\left(\frac{i}{i_{0A} \mu_A}\right) \quad (9)$$

$$i_{0A} = z \cdot F \cdot k \cdot T_e \cdot e^{-A_{0A}/(RT_e)} \quad (10)$$

式中： i_{0A} 为阳极转换电流密度； z 为电解槽化学计量系数； k 为电解质导电率； T_e 为电解槽额定工作温度； A_{0A} 为阳极活化能； μ_A 为阳极活性面积比； R 为气体常数。

结合式(8)一式(10)可得电压效率 ε_U 为：

$$\varepsilon_U \approx \frac{U_m}{U_m + \frac{RT_e}{\alpha_A z F} \ln\left(\frac{i}{i_{0A} \mu_A}\right) + IR_0} \quad (11)$$

根据电解槽效率，可以求得不同功率下电解槽的制氢量：

$$q_H = M_H \cdot \varepsilon_{ELE} \cdot P_{ELE} / Q_H \quad (12)$$

式中： P_{ELE} 为电解槽的工作功率； Q_H 为氢气的高位发热量，取 286 kJ/mol； M_H 为氢气的摩尔质量，取 2.016 g/mol。

储氢单元模型根据储氢罐当前时刻存入氢气的量以及释放氢气的量，和前一时刻储氢罐内存氢气的量，来计算当前时刻储氢罐内存氢量：

$$M_{HT}(t) = M_{HT}(t-1) + M_{in}(t-1) - M_{out}(t-1) \quad (13)$$

2 配置优化策略

2.1 决策变量

风光氢燃气轮机互补系统在模型设计过程中根据参考文献使用 BP 神经网络算法构建联合循环模型，联合循环机组容量配置已经确定，所以本文设计的配置优化模型决策变量包括：风力发电机组装机容量 Q_{WT} 、光伏电池板装机容量 Q_{PV} 、电解槽装机容量 Q_{EL} 、储氢时长 T_{H_2} 。储氢时长是指按照配置电解槽装机容量全负荷运行产氢流量存储氢气的时长，单位为小时。如此设计，使储氢容量受电解槽装机容量和储氢时长 2 个因素控制，该方法能够保证在电解槽装机容量较大或较小时，都能设计与之匹配的储氢容量。保证系统能够在一定时间范围内存储氢气（式(14)）。

$$Q_{HT} = T_{H_2} \cdot f_{EL} (Q_{EL,full}) \quad (14)$$

式中： f_{EL} 为电解槽模型中输入功率计算产氢流量； $Q_{EL,full}$ 为电解槽满负荷的运行功率； Q_{HT} 为储氢容量。

2.2 目标函数

由风光出力的波动性与不确定性带来电力需求与系统出力之时空不匹配，在设置目标函数时，应当考虑到系统与负荷的供需平衡，提高供电保障

能力，以达到一定的可靠性。同时，还要考虑系统整体经济性与环保性，使优化结果具有投资价值，对电力系统减碳产生积极效果。

从经济性、可靠性和环保性角度出发，设置风光氢燃气轮机互补一体化供电系统优化目标函数。经济性目标体现为平准化度电成本（levelized cost of energy, LOCE），可靠性目标体现为系统源荷间的偏差，环保性目标体现为系统年运行碳排放量。

平准化度电成本是对项目生命周期内的成本和发电量进行平准化后计算得到的发电成本，即生命周期内的成本现值与生命周期内发电量现值之比。

平准化度电成本为：

$$C_{LOCE} = C_{CRF} \times T_{TNPC} + C_{FUEL} \quad (15)$$

$$C_{CRF} = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (16)$$

式中： C_{CRF} 为资本回收系数； r 为利率，取 0.1； y 为项目的生命周期，取 20 年； T_{TNPC} 为项目的总净现值，是整个生命周期中初始成本、运营和维护成本以及重置成本的组合； C_{FUEL} 为联合循环机组年燃料消耗成本。

由于项目由风力发电机组、光伏电池板、联合循环机组、电解槽和储氢罐组成，因此 T_{TNPC} 可表示为：

$$T_{TNPC} = NPC_{PV} + NPC_{WT} + NPC_{GTCC} + NPC_{ELE} + NPC_{HT} \quad (17)$$

项目周期为 20 年，参考使用的联合循环机组、风力发电机组、光伏电池板、电解槽和储氢罐默认寿命均为 20 年，因此不考虑设备重置成本。这里以光伏电池板为例计算设备净现值成本：

$$NPC_{PV} = I_{PV} + OM_{PV} \quad (18)$$

$$I_{PV} = IC_{PV} \cdot Q_{PV} \quad (19)$$

$$OM_{PV} = m_{PV} \cdot I_{PV} \cdot \sum_{n=1}^{20} \left(\frac{1+0.04}{1+r}\right)^n \quad (20)$$

式中： IC_{PV} 为电池板单位投资成本； m_{PV} 为电池板成本维护系数； I_{PV} 为电池板投资成本； OM_{PV} 为电池板维护成本。

荷源偏差是由于发电功率与负荷不一致造成的，所以偏差由缺电和弃电 2 部分构成。当系统出力大于负荷时，产生弃电；当系统出力小于负荷时，产生缺电。弃电和缺电占比越小，代表荷源偏差越小，模型可靠性越高，计算方式如下^[23]：

$$\theta = \frac{\sum_{t=1}^{26 \cdot 280} (P_{ins} + P_{sur})}{\sum_{t=1}^{26 \cdot 280} P_{load}} \quad (21)$$

式中： P_{ins} 为缺电时刻的缺电功率； P_{sur} 为弃电时刻的弃电功率； P_{load} 为负荷需求功率。对每一时刻功率求和累加再求比例，即为偏差总电量之和与负荷总电量之和的比。

本系统唯一引入含碳燃料的设备是联合循环机组，所以在计算碳排放时仅考虑燃气轮机运行产生的 CO_2 ，其表达式为：

$$F_{\text{co}_2} = \sum_{t=1}^{26\ 280} f_{\text{co}_2}(t) \quad (22)$$

式中： $f_{\text{co}_2}(t)$ 代表当前时刻联合循环机组排放烟气中 CO_2 的流量。

2.3 约束条件

约束条件包括对联合循环机组运行负荷范围约束，联合循环机组最低停机时间约束，联合循环机组变负荷速率约束，储氢罐安全使用范围约束以及燃料掺氢体积比约束。

$$\lambda_{\text{GTCC},\text{min}} \leq \lambda_{\text{GTCC}}(t) \leq \lambda_{\text{GTCC},\text{max}}, \forall t \quad (23)$$

$$t_{\text{GTCC},i}^{\text{off}} \geq t_{\text{GTCC},\text{min}}^{\text{off}} \quad (24)$$

$$|\lambda_{\text{GTCC}}(t+1) - \lambda_{\text{GTCC}}(t)| \leq \Delta\lambda_{\text{GTCC}}^{\text{max}}, \forall t \quad (25)$$

$$Q_{\text{HT},\text{min}} \leq Q_{\text{HT}}(t) \leq Q_{\text{HT},\text{max}}, \forall t \quad (26)$$

$$\varphi_{\text{min}} \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\text{max}}, \forall t \quad (27)$$

式中： $\lambda_{\text{GTCC}}(t)$ 为当前联合循环机组负荷率； $t_{\text{GTCC},i}^{\text{off}}$ 为联合循环机组单次停机时长； $Q_{\text{HT}}(t)$ 为当前储氢罐内存氢量； $\varphi(t)$ 为当前天然气中混入氢气的体积比。

2.4 优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 是一种受鸟类觅食启发的随机搜索算法。MOPSO 算法将 Pareto 支配概念引入基本的 PSO 中^[24]，相较于传统粒子群算法寻找的全局最优解。MOPSO 追求的是非劣解，通过分析其支配关系确定非支配解集，采用精英外部存档法保存当前非支配解集^[25-26]，用以解决多目标优化问题。MOPSO 算法具有参数简

单、收敛速度快的优点，适合电力系统多目标容量配置问题。MOPSO 算法流程如图 5 所示。

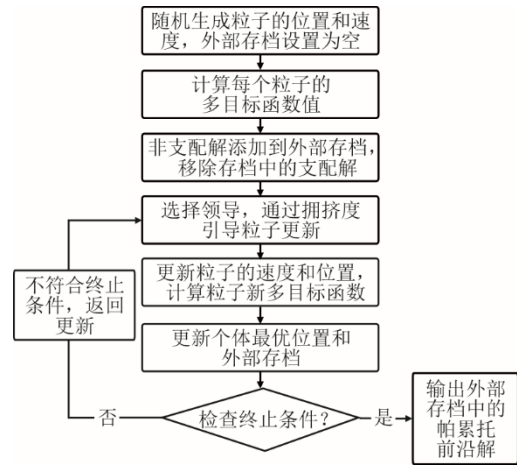


图 5 MOPSO 算法流程

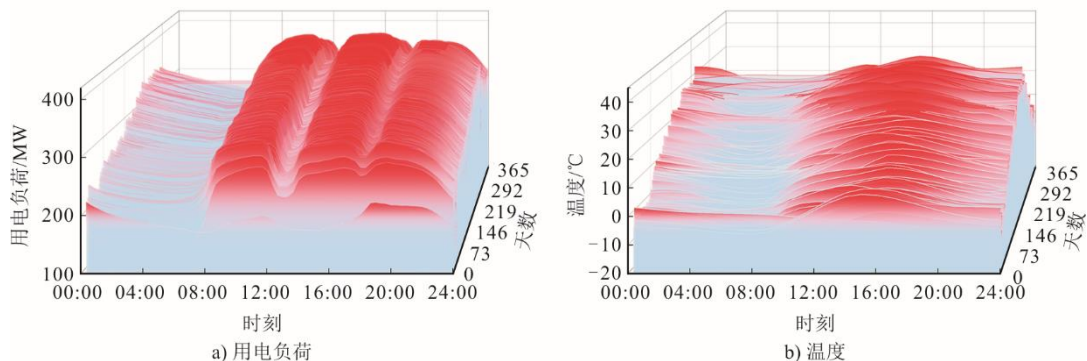
Fig.5 Flowchart of the MOPSO algorithm

3 算例分析

3.1 环境数据

以确定的数据驱动联合循环模型为基础搭配风光发电设备及制氢储氢设备构成风光氢燃气轮机互补系统模型，开展配置优化研究，并对优化结果进行分析。环境数据包括温度、风速、光照强度以及该地区 (本文算例为中国西部某地) 用电负荷，数据以 20 min 为节点，全年共 26 280 个数据点。负荷和环境数据如图 6 所示。

该地全天用电负荷主要集中在 200~400 MW 区间，夏季负荷最高，白天工作时间电力需求高于夜间；环境温度主要集中在 -10~35 °C，冬夏温度差距明显，冬季最低温度可达 -15 °C，夏季最高温度可达 38 °C；全年风速主要集中在 0~15 m/s，极端天气情况风速可达 22 m/s；光照强度随季节变化呈现夏季日照时间长冬季日照时间短的特点，夏季白天光照强度普遍超过 500 W/m²。



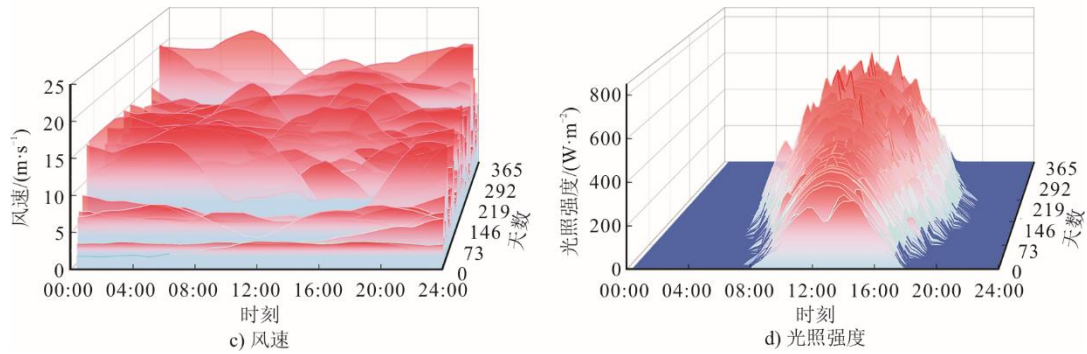


图 6 负荷和环境数据
Fig.6 Power load and environmental data

3.2 决策变量范围

使用燃气轮机联合循环机组模型 iso 工况发电功率为 400 MW。为满足算例地区最高用电负荷，对风力发电机及光伏电池板配置容量下限进行约束；考虑安装设备空间体积有限，对决策变量配置容量上限进行约束。具体约束条件见表 2。

表 2 决策变量约束条件
Tab.2 Constraints on decision variables

决策变量	下限	上限
风力发电机配置容量/MW	16	200
光伏电池板配置容量/MW	16	200
电解槽配置容量/MW	0	100
储氢罐储能时长/h	0	12

3.3 系统关键参数

设备投资成本及运维成本参数见表 3。

表 3 投资及运维成本参数
Tab.3 Investment and O&M cost parameters

项目	数值
燃气轮机联合循环机组投资成本 $I_{GTCC}/\text{元}$	6×10^8
燃气轮机联合循环设备维护系数 m_{GTCC}	0.02
燃气轮机联合循环单次启停成本 $I_{GTCC,stop}/\text{元}$	1×10^5
光伏设备单位投资成本 $IC_{PV}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	$4\ 000^{[27]}$
光伏设备维护系数 m_{PV}	$0.02^{[28]}$
风电设备单位投资成本 $IC_{WT}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	$5\ 000^{[29]}$
风电设备维护系数 m_{WT}	$0.02^{[27]}$
制氢设备单位投资成本 $IC_{ELE}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	$2\ 500^{[29]}$
制氢设备维护系数 m_{ELE}	$0.01^{[27]}$
储氢设备单位投资成本 $IC_{HT}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	$280^{[29]}$
储氢设备维护系数 m_{HT}	$0.01^{[28]}$
天然气价格 (标准状态, 下同) $I_{FUEL}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	2.8

3.4 容量配置优化

经 MOPSO 算法对算例进行 30 次迭代优化，最终生成 185 组非支配解的 Pareto 解集，将这 185 组解的目标值对应点位绘制在三维图像上，结果如图 7 所示。由图 7 发现，优化结果均匀覆盖了 0.559~0.597 元

C_{LOCE} 范围，0.002%~2.211% 荷源偏差范围和 86.87~100.60 万 t/年碳排放量范围。Pareto 前沿三维图像在 3 个方向上的投影均匀分布，说明 3 目标之间有互相制约关系。

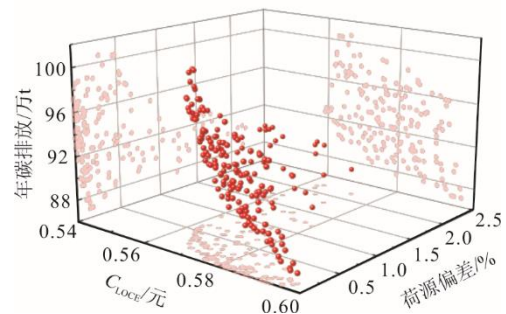


图 7 Pareto 解集三维分布
Fig.7 3D distribution of Pareto solution set

选择其中 4 组解，并分别列举其详细配置方案。表 4 展示 4 组解目标函数值，表 5 展示 4 组解的配置情况。

表 4 最优解目标函数值
Tab.4 Objective function values of the optimal solution

项目	$C_{LOCE}/\text{元}$	荷源偏差/%	年碳排放量/万 t
C_{LOCE} 最优解	0.559 1	1.700	92.57
荷源偏差最优解	0.592 2	0.002	95.88
年碳排放量最优解	0.596 8	0.140	86.87
主观最优解	0.582 7	0.020	94.55

表 5 最优解设备容量配置
Tab.5 The optimal solution for equipment capacity configuration

项目	风力发电机容量/MW	光伏电池板容量/MW	电解槽容量/MW	储氢罐容量/ m^3
C_{LOCE} 最优解	183.31	16.00	0	0
荷源偏差最优解	37.49	175.48	100.00	217 824
年碳排放量最优解	200.00	200.00	100.00	219 824
主观最优解	85.28	108.69	78.02	139 302

其中，3 组解分别为 C_{LOCE} 最优、荷源偏差最优

和年碳排放量最优配置；另外 1 组解为 TOPSIS 方法确定的主观权重下全局最优解，权重分配为 C_{LOCE} 权重 0.6，荷源偏差权重 0.2，年碳排放量权重 0.2。

C_{LOCE} 最优解配置选择在满足基本负荷前提下尽可能减少设备投资，所以光伏设备和制氢储氢设备装机容量皆为决策变量下限；荷源偏差最优解配置选择在平衡弃电和缺电的前提下搭配可再生能源发电设备，尽可能多的配置电解槽，以满足消纳

弃电的需求；年碳排放量最低解配置选择决策变量上限，以实现可再生能源发电占比最高及产生最多的氢，来降低碳排放。主观最优解配置，产生 94.55 万 t/a 碳排放量，相较于最大年碳排放量减少 6%，荷源偏差仅 0.02%，实现 0.58 元 C_{LOCE} ，相较于最大 C_{LOCE} 降低 2.3%。

将 Pareto 前沿分别按照 2 个不同的优化目标绘制于平面图像上，结果如图 8—图 10 所示。

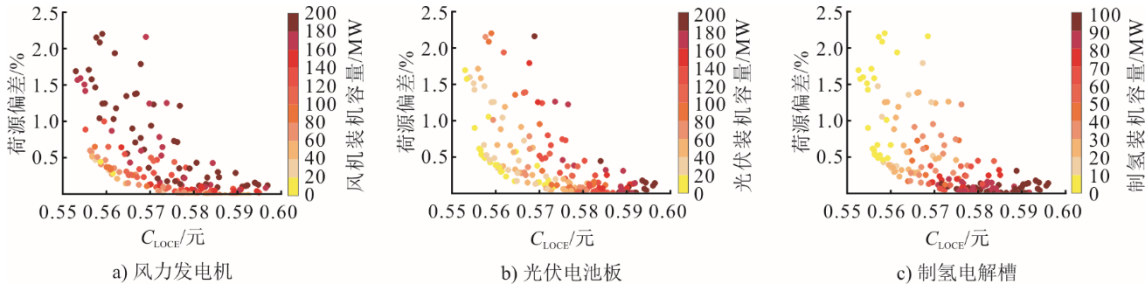


图 8 C_{LOCE} 和荷源偏差投影

Fig.8 The C_{LOCE} and load source deviation projection

由图 8 发现： C_{LOCE} 为 0.55~0.60 元，广泛存在风电装机容量大于 140 MW 的解；但 C_{LOCE} 低于 0.57 元，光伏装机普遍小于 100 MW，且全程随 C_{LOCE} 增长而增加；而 C_{LOCE} 增长的全程电解装机容量不断增加。这是因为系统发电量取决于可再生能源与联合循环机组出力，与制氢储氢设备无关，所以增加电解装机容量会显著提高

电成本；风力发电机全天候发电的属性使其对比光伏电池板在同样发电量下，投资成本更低，即度电成本更低，所以在 C_{LOCE} 低于 0.57 元的解中，风电装机容量普遍大于光伏装机容量，在 C_{LOCE} 高于 0.57 元的解中，受成本更高的电解槽容量不断增加的影响，这一现象不再明显。

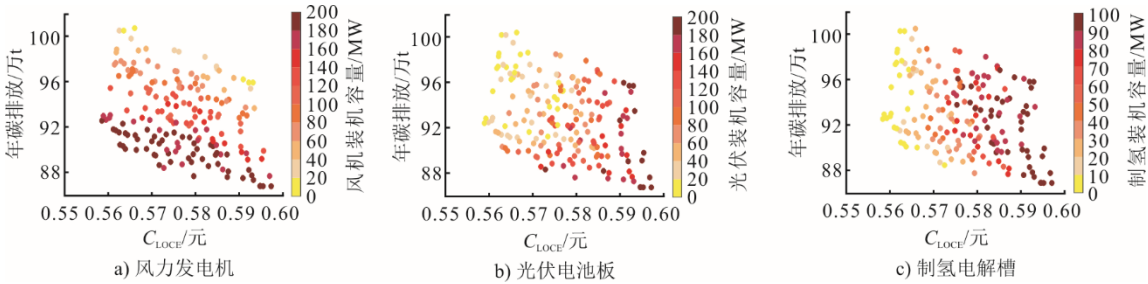


图 9 C_{LOCE} 和年碳排放量

Fig.9 The C_{LOCE} and annual carbon emissions

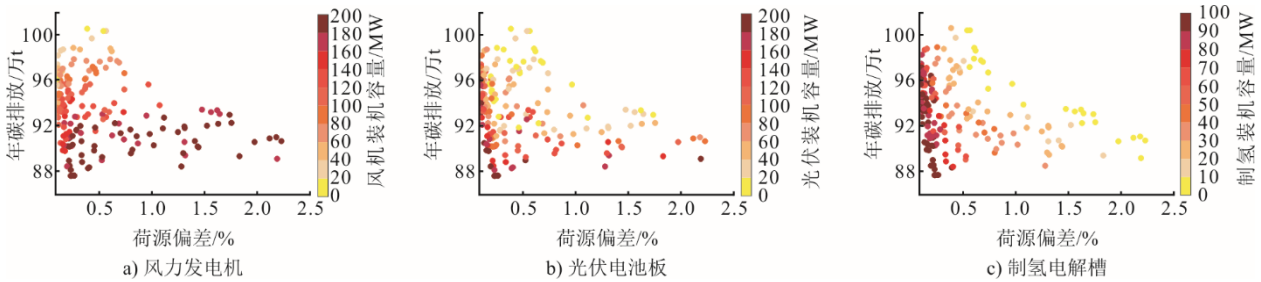


图 10 荷源偏差和年碳排放量

Fig.10 The load source deviation and annual carbon emissions

由图 9 和图 10 发现：荷源偏差大于 1% 时，所有解配置的电解槽装机容量都低于 40 MW；随制氢

设备容量的增加，荷源偏差出现显著下降，电解槽装机容量大于 70 MW 的解荷源偏差均在 0.5% 以下。这证明通过电解槽-燃气轮机打通“电-氢-电”灵活转化的系统架构，能够有效缓解电网供需不平衡与时空不匹配造成的荷源偏差现象。

分析图 9 和图 10 发现：年碳排放量与风电装机容量相关性最强，年碳排放低于 92 万 t 的解风电装机容量全部大于 100 MW，提高风电装机容量能显著减少碳排放；提高光伏装机容量也能一定程度减少碳排放，但效果不如风电显著；而电解槽容量大小与年碳排放量之间却未能体现明显关系。这是由系统逻辑和设备出力特性两方面因素引起的：一方面系统优先选择可再生能源发电，联合循环机组调节输出，致使提高风光装机容量直接影响天然气燃料使用量，从而影响碳排放情况；另一方面风力发电机全天候发电特性，即相同配置容量下风力发电机发电量更高，盈余电力还可通过“电-氢-电”

流程转化变成无碳的氢燃料，进一步减少天然气的使用。

根据优化结果，选择主观最优解配置方案模拟系统在 1 年的 4 个典型日设备运行情况，结果如图 11 所示。由图 11 可见，2 月 1 日情况较为特殊，00:00—08:00 负荷大幅低于系统出力，此时联合循环机组维持在 40% 最低负荷率运行，且未达到停机要求，所以这段时间有大量过剩电力，电解槽处于满负荷运行状态，但依旧产生大量弃电。5 月 1 日、11 月 1 日 2 天的 00:00—08:00 依旧出现电力过剩状态，但此时电解槽可以消纳这部分电力，所以没有产生弃电。8 月 1 日全天负荷高于 250 MW，处于用电高峰期，无弃电产生，也没有产生缺电。2 月 1 日、11 月 1 日风力发电机全天处于发电状态，且发电功率大于光伏发电功率，符合春冬季节大风情况，5 月 1 日、8 月 1 日由于当天气候条件不佳，可再生能源发电比例较低。

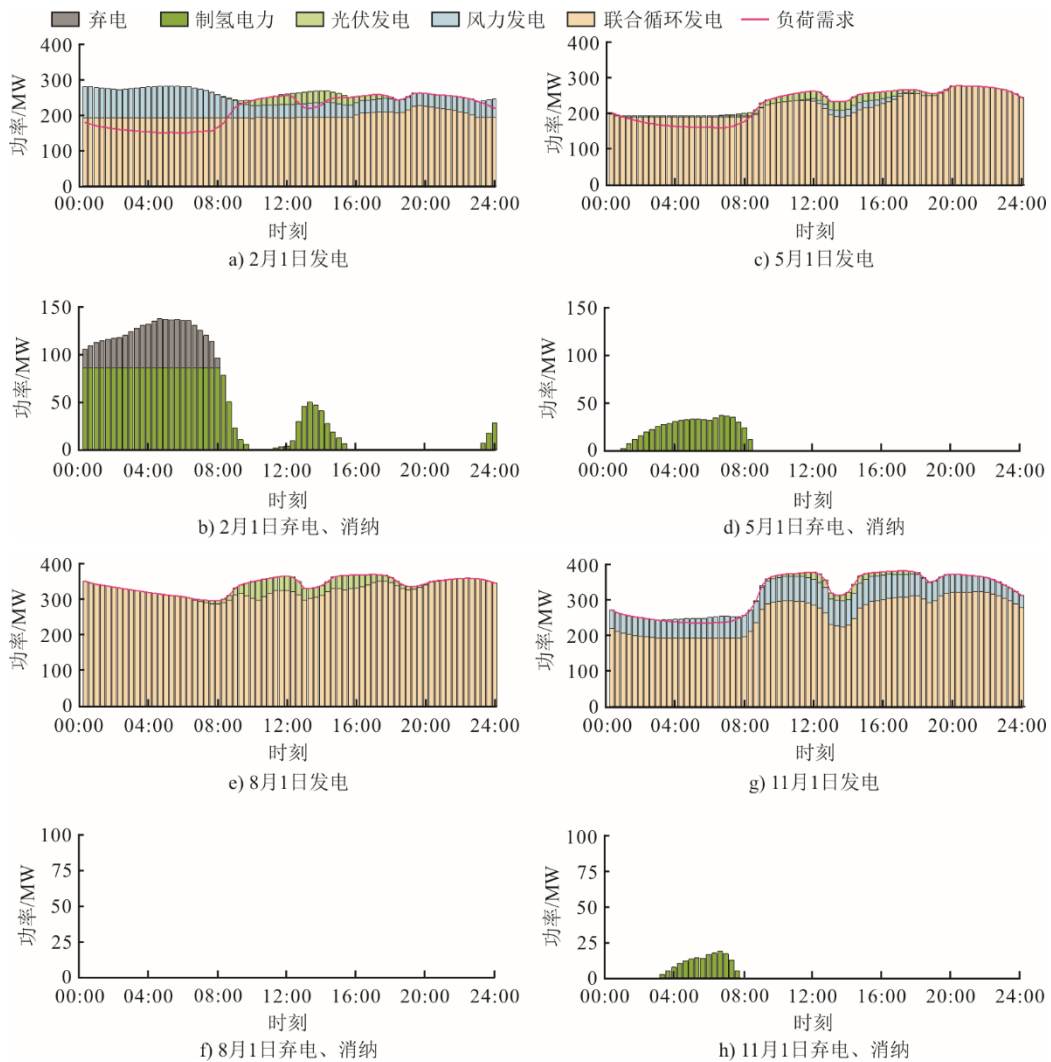


图 11 典型日设备运行情况
Fig.11 The equipment operation on typical day

4 结 论

为解决电网内不断增加的可再生能源设备带来的出力不确定与负荷不匹配问题,并进一步降低电力生产企业碳排放量,本文提出一种“风光氢燃气轮机互补系统”,构建了包含风光发电设备、制氢储氢设备与神经网络学习的联合循环机组的系统全工况仿真模型,基于经济性、可靠性与环保性3个目标,使用MOPSO算法对系统设备开展配置优化,得出以下结论。

1) 系统模型在本文算例中的主观权重全局最优解为:风电 85.28 MW, 光伏 108.69 MW, 电解槽 78.02 MW, 储氢罐 139 302 m³。在该容量配置下,全年运行可实现最高 6% 碳减排,其供电稳定性及可再生能源消纳能力表现优异,荷源偏差仅 0.02%。

2) C_{LOCE} 低于 0.57 元时, C_{LOCE} 主要受可再生能源装机容量影响,优先选择配置风电比配置光伏经济性更好。 C_{LOCE} 高于 0.57 元后,电解槽成本影响扩大,风电和光伏的经济性差距影响缩小。

3) 碳排放与可再生能源装机容量有直接关系,但随着可再生能源装机容量提高,弃电量升高造成荷源偏差增大,此时增加电解槽装机容量能有效消纳过剩电力,并可通过“电-氢-电”通路进一步扩大可再生能源发电的降碳能力。

[参 考 文 献]

- [1] 国家发展和改革委员会. “十四五”现代能源体系规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2022: 1. National Development and Reform Commission. The 14th Five-Year Plan for a modern energy system[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022: 1.
- [2] MOHANDS B, MOURSI M S E, HATZIARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3140-3155.
- [3] 李国庆, 刘先超, 辛业春, 等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1165-1181. LI Guoqing, LIU Xianchao, XIN Yechun, et al. Review on frequency stability of power systems with high proportion of new energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1165-1181.
- [4] 王海杰, 罗伟, 鹿杰. 新能源发电项目消纳能力研究综述[J]. 电气开关, 2018, 56(5): 6-10. WANG Haijie, LUO Wei, LU Jie. Review on absorption capacity of new energy generation projects[J]. Electrical Switchgear, 2018, 56(5): 6-10.
- [5] KYRIAKOPOULOS G L, ARAVOSSIS K G. Literature review of hydrogen energy systems and renewable energy sources[J]. Energies, 2023, 16(22): 7493.
- [6] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 48-58. XUE Fu, MA Xiaoming, YOU Yanjun. Review of energy storage technology types and their application development[J]. Integrated Smart Energy, 2023, 45(9): 48-58.
- [7] JÜLCH V. Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method[J]. Applied Energy, 2016, 183: 1594-1606.
- [8] WELDER L, STENZEL P, EBERSBACH N, et al. Design and evaluation of hydrogen electricity reconversion pathways in national energy systems using spatially and temporally resolved energy system optimization[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(19): 9594-9607.
- [9] 潘志明, 薛志敏. 燃气轮机快速变负荷在调频市场中的研究与实践[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(3): 12-18. PAN Zhiming, XUE Zhimin. Research and practice of rapid load change of gas turbines in frequency regulation market[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(3): 12-18.
- [10] 徐亮, 孙子能, 席雷, 等. 先进重型燃气轮机冷却技术现状及发展[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(4): 1-10. XU Liang, SUN Zineng, XI Lei, et al. Current status and development of advanced heavy-duty gas turbine cooling technology[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(4): 1-10.
- [11] 秦琨, 王威, 李妍萍, 等. 掺氢比对低排放燃烧室性能影响研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(3): 47-56. QIN Kun, WANG Wei, LI Yanping, et al. Study on the effect of hydrogen blending ratio on the performance of low-emission combustion chambers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 47-56.
- [12] 林育超, 李永毅, 何怡冲, 等. 掺氢比例波动时氢混燃气轮机动态响应特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 95-104. LIN Yuchao, LI Yongyi, HE Yichong, et al. Study on the dynamic response characteristics of hydrogen-mixed gas turbines under hydrogen blending ratio fluctuations[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 95-104.
- [13] 李永毅, 王子晗, 张磊, 等. 风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统容量配置优化[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232133>. LI Yongyi, WANG Zihan, ZHANG Lei, et al. Capacity configuration optimization of wind-solar-hydrogen-gas turbine integrated hydrogen-electric coupling system [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232133>.
- [14] 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. LIN Li, ZHENG Xinyao, ZHOU Longwen. Optimization scheduling of wind-solar-fossil-energy storage multi-energy complementary system based on hydrogen-fueled gas turbines[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3007-3022.
- [15] BAHLAWAN H, LOSI E, MANSERVIGI L, et al. Analysis of a multi-generation renewable energy system with hydrogen-fueled gas turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(11): 111020.
- [16] BREY J J. Use of hydrogen as a seasonal energy storage system to manage renewable power deployment in Spain

- by 2030[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(33): 17447-17457.
- [17] MEHRJERDI H. Modeling, integration, and optimal selection of the turbine technology in the hybrid wind-photovoltaic renewable energy system design[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112350.
- [18] GUEZGOUZ M, JURASZ J, BEKKOUCHE B, et al. Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 112046.
- [19] LI Y, ZHANG G, WANG L, et al. Part-load performance analysis of a combined cycle with intermediate recuperated gas turbine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112346.
- [20] LI Y, LIN Y, HE Y, et al. Part-load performance analysis of a dual-recuperated gas turbine combined cycle system[J]. *Energy*, 2023, 269: 126744.
- [21] LI Y, ZHANG G, BAI Z, et al. Backpressure adjustable gas turbine combined cycle: a method to improve part-load efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 739-754.
- [22] 江岳文, 杨国铭, 陈宇辛, 等. 考虑电解槽动态制氢效率的氢网运行优化[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8): 3014-3027.
JIANG Yuewen, YANG Guoming, CHEN Yuxin, et al. Optimization of hydrogen network operation considering dynamic hydrogen production efficiency of electrolyzers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8): 3014-3027.
- [23] 廖超豪, 李根. 基于现有火电容量的多能互补能源基地风光储容量优化配置研究[J]. *水力发电*, 2024, 50(9): 74-81.
LIAO Chaohao, LI Gen. Flexible speed regulation strategy of axial flow fans in direct dry cooling system based on the principle of uniform distribution of heat load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 50(9): 74-81.
- [24] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(6): 745-753.
FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. A review of multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Engineering Science*, 2021, 43(6): 745-753.
- [25] 汪慎文, 王佳莹, 张佳星, 等. 应用精英档案和反向学习的多目标差分进化算法[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2020, 41(6): 40-45.
WANG Shenwen, WANG Jiaying, ZHANG Jiaying, et al. Multi-objective differential evolution algorithm with elite archives and reverse learning[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2020, 41(6): 40-45.
- [26] 王书峰, 钟明, 许贤泽, 等. 计及需求侧管理的新能源微电网多目标优化调度方法[J]. *智慧电力*, 2022, 50(12): 55-62.
WANG Shufeng, ZHONG Ming, XU Xianze, et al. Multi-objective optimization scheduling method for new energy microgrid considering demand side management[J]. *Smart Grid*, 2022, 50(12): 55-62.
- [27] XU C, KE Y, LI Y, 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.
- [28] 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.
- [29] 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: 1.
GAO Lingyu. Optimization of structure and capacity configuration of wind-fire coupled system based on hydrogen energy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)