

基于氢燃料储能的离网式风-光-储混合能源系统 配置规划及运行策略研究

杨倩鹏^{1,2}, 陈晓文^{1,2}, 王辉^{1,2}, 贾鹏程³, 岳宗宇^{2,3}, 尧命发^{2,3}

(1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司光伏产业技术分公司, 西宁 810007;

2. 青海省先进储能实验室有限公司, 西宁 810007;

3. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300354)

摘要: 针对风-光-储可再生综合能源系统不同储能时间尺度配置规划问题, 构建了基于风-光-电池-储氢的综合能源系统模型, 并进行了综合能源系统配置规划-运行策略协同的多目标优化研究. 现有综合系统规划模型方面研究在考虑经济性和稳定性多目标优化的同时对于兼顾跨季节储能的研究较少, 并存在无法兼顾和平衡经济性和稳定性以获得最优配置规划方案的问题. 为了解决上述问题, 引入了储氢和氢内燃机发电作为储能系统的一部分, 减少了电池的配置容量, 同时氢内燃机在成本和技术成熟度上比燃料电池存在一定的优势, 既降低了系统成本, 又实现了长时储能. 首先通过单目标优化, 在保证系统稳定性的前提下, 确定系统经济性最优的条件, 再通过多目标优化, 基于粒子群算法以系统运行负荷缺电率最小和系统平准化度电成本最小为目标获取最优配置方案. 通过模拟在天津大学北洋园校区建立风-光-储综合能源系统, 基于当地气象数据与用电数据进行算例验证, 结果证明了所得优化配置和运行策略的优越性.

关键词: 光伏-风电-电池-储氢综合能源系统; 负荷缺电率; 平准化度电成本; 跨季节储能; 粒子群优化算法
中图分类号: T73.42 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2025)02-0138-12

Configuration Planning and Operation Strategy of Off-Grid Wind Solar Storage Hybrid Energy System Based on Hydrogen Fuel Energy Storage

Yang Qianpeng^{1,2}, Chen Xiaowen^{1,2}, Wang Hui^{1,2}, Jia Pengcheng³, Yue Zongyu^{2,3}, Yao Mingfa^{2,3}

(1. Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd. Photovoltaic Industry Technology Branch, Xining 810007, China; 2. Qinghai Advanced Energy Storage Laboratory Co., Ltd., Xining 810007, China;

3. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Aiming at different energy storage time scales for wind, solar and storage renewable energy systems, this paper constructs a hybrid energy system model based on wind, solar, battery and hydrogen storage, and proposes a multi-objective planning model for cooperative optimization of integrated energy system configuration planning and operation strategies. Existing studies on hybrid system planning models usually neglect the consideration of the demand in cross seasonal energy storage and fail to balance economy and stability to obtain the optimal

收稿日期: 2024-04-09.

基金项目: 新能源多场景制氢技术研究科技项目(KY-C-2023-CN03).

作者简介: 杨倩鹏(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 353732571@qq.com.

通信作者: 岳宗宇, 男, 博士, 副教授, zongyuyue@tju.edu.cn.

configuration planning scheme for different time scale. To address the aforementioned issues, this paper introduces hydrogen storage as part of the energy storage system, thus reducing battery usage, lowering system costs, and achieving long-term energy storage. Firstly, through single objective optimization, with system stability ensured, the optimal economic conditions for the system are determined. Then, through multi-objective optimization, based on particle swarm optimization algorithm, the optimal configuration scheme is obtained with the objectives of minimizing the power outage rate of the system operation load and minimizing the cost of leveling the system. Finally, the advantages of the optimized configuration and operation strategy are verified by simulating a wind-solar-storage integrated energy system at the Peiyangyuan campus of Tianjin University based on local meteorological and power consumption data.

Keywords: PV-wind-battery-hydrogen storage hybrid energy system; LPSP; LCOE; cross seasonal energy storage; PSO

能源是现代发展的推动力。然而,面临着诸如资源短缺、环境恶化以及气候灾害频发等多重挑战,传统的能源结构已逐渐不再适应社会发展的需要。因此,寻找一种新的能源模式来满足人类社会能源的可持续供给并减少对环境 and 气候的负面影响,已成为全球政府和学者普遍关注的焦点和共识。然而,随着世界经济的持续发展和人民生活水平的不断提高,人类社会对能源的需求不断攀升,这导致了碳排放水平持续居高不下的现状。以中国为例,目前二氧化碳排放最主要的来源是传统化石燃料的使用,占比高达 88%^[1]。在这一背景下,可再生能源因其零碳排放且取之不尽的特点成为替代传统化石能源的理想选择。因此,大力发展可再生能源,降低传统化石能源在能源结构中的比重,提高可再生能源的占比和利用率,已成为未来能源转型的重要方向。

风能和太阳能被认为是极具发展前景的可再生能源,但其大规模使用仍面临诸多困难。风能虽然可能实现全天发电,但其短期内的随机性和波动性极大,不适合作为能源系统的单一能量输入;而太阳能资源虽然能够较为准确地预测,但其只能在白天发电,因此也具有一定局限性;此外,可再生能源还有一些共同的缺点,如过度依赖气象因素、较高的初始投资成本等。为了尽可能地解决可再生能源这些弊端,带有储能的分布式混合能源系统提供了一个可行的解决方案。一方面,多种能源统一调配可以实现多能互补,满足各能源间的相互补充和梯级利用,达到提高能源系统综合利用效率的目的^[2];另一方面,分布式能源系统可以充分结合当地的资源条件,实现因地制宜,同时可以摆脱电网的束缚,实现近零碳排放^[3]。储能系统可以实现削峰填谷的功能,解决可再生能源发电与用户用电不匹配的问题,并且可以提高

可再生能源的利用率,减少风光电的装机容量与投资成本。电池储能因其高能量转化率和 high 储能密度,是目前较为常见的储能方式,但存在储能时间短,成本高的缺点。氢能是一种非常有潜力的储能载体,与电池储能相比,氢能更易于实现长周期、大规模、低成本的储能,与氢内燃机、氢燃料电池等转化利用装置结合,具备规模化应用的潜力。

离网式分布式能源系统的发展还面临很大的挑战,为满足对电网较低的依赖度,同时保证系统的稳定运行并减少装机量冗余,对系统各部分的装机容量配置规划和储能周期有更高的要求。目前已有相关学者对离网式分布式能源系统的构型和优化展开研究。冉亮等^[4]针对风光出力不确定性对离网型供能系统可靠性的影响,提出了基于风/光-火电耦合的联合供能系统。吴啸等^[5]综合考虑投资、运行成本及闭环动态调控性能,提出了一种离网式综合能源系统配置-运行一体化优化方法,可用于离网型光伏-燃料能源系统的优化运行。这些系统实现了离网稳定运行,但为了保证系统长期稳定运行,均在系统中保留了化石燃料发电,使其实际减碳效果大打折扣。

氢能是化石燃料的理想替代能源,氢在燃烧过程中不会产生碳排放,并且可以通过多余的可再生能源电力制备,实现长时储能以及对可再生电力的调节。然而氢能的引入使系统多能量耦合变得更加复杂,不少学者提出了不同的优化调度方法与策略以解决含氢综合能源系统的配置优化复杂的问题。鄢仁武等^[6]提出了一种电转氢热(P2HH)与二维激励需求响应(DR)机制相结合的优化调度方法,针对不同可调负荷的特点提出不同的运行策略,结果表明该方法可以提高综合能源系统中电转氢的能源利用效率和改善系统的需求响应潜力。谭玲玲等^[7]通过考虑综合

能源系统中各主体间交互关系的复杂性和利益冲突问题,提出了基于主从博弈的电-热-氢综合能源系统优化调度模型,该模型可用于实现含氢综合能源系统的优化运行.高宇歌等^[8]针对电-氢混合储能系统未充分考虑电解槽动态效率运行特性的问题,提出了一种考虑电-氢混合储能运行特性的区域电力系统优化运行方法,仿真结果表明,该方法能提高系统整体运行效率和电解槽利用率,充分发挥电-氢储能互补优势,提高新能源高效经济消纳.

为保证分布式能源系统长期稳定运行且低碳排放,可以通过大规模储氢实现季节性储能.Gabrielli等^[9]研究表明未来氢能可以在季节性储能中发挥重要作用.Monteiro等^[10]研究了氢供应链的现状与前景,研究表明未来可再生能源发电领域可能会广泛使用氢作为储能燃料.传统能源系统的规划问题通常使用聚类算法将年度负荷数据聚类成具有代表性的典型日负荷数据.王毅等人提出了一种高效且长期存储的局部多能源系统规划方法,通过将时间序列季节性趋势分解纳入时间序列聚合,降低了优化问题的复杂性^[11].然而这种方法简化了系统的边界条件,导致解决方案的规模大大降低,甚至损失最优解.为了克服这一问题,有学者对多时间尺度进行优化,提出了考虑氢储能的综合能源系统多时间尺度随机优化方法,在典型日、季度、年度等不同时间尺度上进行全时间序列系统建模,结果表明可以显著提升模型计算精度,但也导致较大的计算量.

综上所述,考虑跨季储氢的离网式分布式能源系统具有较好的降碳潜力,为此本文设计了一个光伏-风电-电池-储氢综合能源系统,通过电池储能满足多能量流快速切换,通过电解水制氢储氢实现跨季节储能,并利用内燃机发电高效率、高响应、高紧凑、低维护成本特点实现氢燃料的转化利用.基于历史数据,以年为时间尺度进行配置运行优化,在可接受范围内实现计算精度与系统优化计算量的平衡.本论文的组织结构如下.首先介绍了本论文设计的光伏-风-电池-储氢的混合能源系统的构成和各子系统(包括光伏发电、风力发电、电池储能、储氢系统)的数学模型.其次介绍了衡量混合能源系统稳定性和经济性的指标 LPSP 和 LCOE,同时给出了本论文中储能系统的控制策略.最后给出了本文进行仿真模拟所使用的数据清单,同时基于 PSO 算法对系统进行了单目标稳健优化和多目标稳健优化,得出并分析了系统的仿真结果,验证了所得优化配置和优化运行方案的可行性和优越性.

1 模型的建立

本文所研究的混合能源系统包括光伏阵列、风电机组、储能电池、电解槽、氢气发电机组子系统和逆变器及其他配件(如输电线路、运气管道等).图 1 给出了上述混合能源系统的示意图.图 1 中的箭头展示了该混合能源系统中各个部件之间的能量流.当光伏发电和风力发电不足以满足该园区负荷时,电池开始供电,之后氢气发电机组开始供电;当光伏发电和风力发电大于该园区负荷时,开始给电池充电并进行电解水制氢.

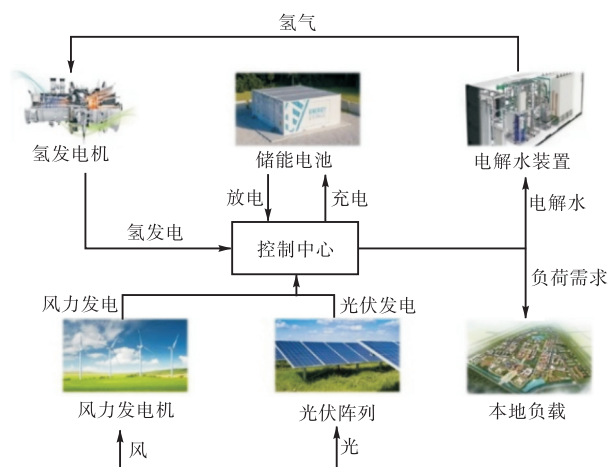


图 1 光伏-风电-电池-储氢综合能源系统

Fig.1 Schematic diagram of photovoltaic wind power battery hydrogen storage integrated energy system

为满足混合系统配置及运行方案的优化设计,分别对系统各部件进行了数学建模,具体如下所述.

1.1 光伏发电输出功率模型

光伏发电由光照强度、温度、倾斜角度和风速等共同决定.在一些多风的地区,风速对光伏板有冷却效果,而在一些夏季高温地区,受最大功率温度系数的影响,温度对光伏板的运行温度影响较大.在进行系统配置规划阶段,往往使用更精确的光伏阵列模型^[12]来评估光伏面板的实际性能.光伏组件的发电量主要由光伏板表面的太阳辐照度($G_{\beta}/(\text{W}/\text{m}^2)$)、光伏面板温度($T/^\circ\text{C}$)、最大功率温度系数($\eta_T/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$)、逆变器效率($\eta_{\text{inv}}/\%$)以及其他损失率($\eta_{\text{loss}}/\%$)决定,光伏输出功率(P_{PV}/W)模型可以表示为式(1).

$$P_{\text{PV}} = [\eta_{\text{ref}} \cdot \eta_{\text{loss}} \cdot \eta_{\text{inv}} \cdot (1 - \eta_T \cdot |T - T_{\text{ref}}|)] \cdot G_{\beta} \quad (1)$$

式中: η_{ref} 表示光伏组件在 T 为 25°C 条件下的参考效率, $\%$,高于或低于此温度都会导致光伏组件功率降低.

式(1)中的参数可以在厂家提供的产品规格书中

找到, 本文所用的光伏组件的相关参数如表 1 所示^[13]. 为了方便计算, 本文假设不同工况下逆变器效率不变^[14].

表 1 光伏组件相关参数

Tab.1 Photovoltaic module related parameters

$\eta_{ref}/\%$	$\eta_{loss}/\%$	$\eta_{inv}/\%$	$\eta_T/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
11	85	95	0.34

1.2 风力发电机输出功率模型

风力发电量由风力发电机输出功率曲线、所在地区的风速和风力发电机塔高共同决定. 很多风力发电机输出功率模型已经在以往的文献中被提出, 在混合能源系统的配置规划中, 选择不同的风力电机输出功率模型会对仿真结果的可靠性和可行性有很大影响. 考虑到风力发电机存在启动的上、下风速阈值, 因此常使用分段函数来评估风机输出功率^[15], 如式(2)所示.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & (V < V_{ci}) \\ \frac{P_R}{V_R^3 - V_{ci}^3} \cdot V^3 - \frac{P_R}{V_R^3 - V_{ci}^3} \cdot V_{ci}^3 & (V_{ci} \leq V < V_R) \\ P_R & (V_R \leq V \leq V_{co}) \\ 0 & (V > V_{co}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: V 表示在风机轮毂高度的风速, m/s; P_R 表示所选风机的标定功率, kW; V_R 、 V_{ci} 、 V_{co} 分别表示所选风机的标定风速、切入风速和切出风速, m/s. 本文所选风机的功率输出曲线如图 2 所示. 由于气象站测得的风速数据为距地面 10 m 高度的风速, 而本文所选风机轮毂高度为 80 m, 可以通过式(3)来基于 10 m 高度的风速估计 80 m 高度的风速^[16].

$$V_{WT} = V_{ref} \cdot \left(\frac{h_{WT}}{h_{ref}} \right)^n \quad (3)$$

式中: V_{WT} 为风机轮毂所在高度的风速; V_{ref} 为气象站测得的风速; h_{WT} 为风机轮毂高度; h_{ref} 为气象站的监测高度; n 为幂律系数, 本文取 0.15.

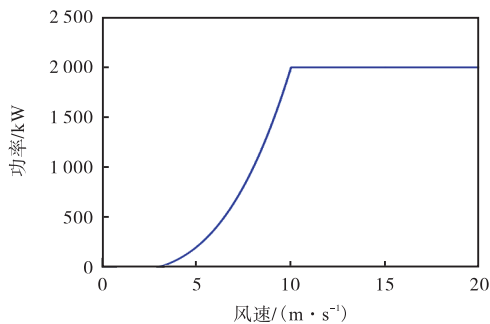


图 2 风机功率输出曲线

Fig.2 Schematic diagram of wind power output curve

1.3 储能蓄电池模型

由于光伏发电和风力发电具有很强的波动性, 因此储能电池中存储的电量在混合能源系统中是一个随时间动态变化的值, 其变化由电池的充、放电过程描述. 在本系统中, 电池的充电过程如式(4)表示^[17].

$$\begin{cases} E_B(0) = 0 \\ E_B(t) = E_B(t - \Delta t) \times (1 - \sigma) + \\ \left[E_{PV}(t) \times \eta_{inv} + E_{WT}(t) \times \eta_{inv} - \frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \times \eta_{Bin} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_B(t)$ 和 $E_B(t - \Delta t)$ 分别表示储能电池在时刻 t 和 $t - \Delta t$ 的电量; σ 为每 Δt 时间段的电池自放电率; η_{inv} 表示逆变器效率; $E_{PV}(t)$ 、 $E_{WT}(t)$ 和 $E_{load}(t)$ 分别表示 t 时刻光伏发电量、风机发电量和负载所需电量; η_{Bin} 为储能电池的充电效率, 本文取 90%.

电池放电过程如式(5)所示.

$$\begin{cases} E_B(0) = 0 \\ E_B(t) = E_B(t - \Delta t) \times (1 - \sigma) + \\ \left[\frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} - (E_{PV}(t) \times \eta_{inv} + E_{WT}(t) \times \eta_{inv}) \right] \times \eta_{Bout} \end{cases} \quad (5)$$

式中: η_{Bout} 为储能电池的放电效率, 本文取 90%.

1.4 储氢系统模型

光伏发电量和风力发电量有剩余时可以为电解槽供电以产生氢气, 再通过增压器压缩存储到储氢罐中^[2].

与储能电池一样, 储氢罐中的氢气储量在混合能源系统中也是一个动态变化的值. 在本系统中电解水制氢气并压缩的过程如式(6)所示.

$$\begin{cases} M_H(0) = 0 \\ M_H(t) = M_H(t - \Delta t) \times (1 - \tau) + \\ \left[E_{PV}(t) \times \eta_{inv} + E_{WT}(t) \times \eta_{inv} - \frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \times \xi_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: $M_H(t)$ 和 $M_H(t - \Delta t)$ 分别表示储氢罐在时刻 t 和 $t - \Delta t$ 的摩尔质量; τ 表示储氢罐的泄露率, 本文取 0.03%/d^[18]; ξ_p 表示单位电能电解水制氢并压缩氢气的量, 本文取 8.86 mol/(kW·h)^[19].

1.5 氢发电系统模型

当氢发电机发电时, 储氢罐中的氢气容量发生变化, 其变化过程可由式(7)表示.

$$\begin{cases} M_H(0) = 0 \\ M_H(t) = M_H(t - \Delta t) \cdot (1 - \tau) - \\ \left[\frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} - (E_{PV}(t) + E_{WT}(t)) \cdot \eta_{inv} \right] \cdot \zeta_H \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_H(t)$ 和 $M_H(t - \Delta t)$ 分别表示 t 时刻和 $t - \Delta t$ 时刻储氢罐中所存储氢气的体积. ζ_H 表示氢发电机发

单位电能所消耗氢气的体积. 综合考虑氢内燃机、氢燃料电池等作为发电装置的技术路线, 氢发电机整体效率取 45%^[20].

2 方法学

2.1 技术经济指标

本文以技术经济指标为目标函数, 对混合能源系统各部分进行优化, 包括光伏装机容量、风电装机容量、储能电池容量、制氢能力和氢气发电机功率需求. 对于离网型光伏-风电-电池-储氢的混合能源系统, 供电可靠性和投资成本经济性是两个关键的评价指标. 一般认为, 最佳方案的离网型光伏-风电-电池-储氢的混合能源系统是同时具有最大的供电可靠性和最小的投资成本.

2.1.1 系统供电可靠性

一个可靠的供电系统应该尽可能地满足负载需求, 尽可能保证不会出现负载损失的发生. 本文基于负荷缺电率(loss of power supply probability, LPSP)来评估混合能源系统的供电可靠性. LPSP 在文献中被广泛用于评估供电系统是否能满足负荷需求^[17]. LPSP 定义为供电系统一年内不能满足负荷需求的概率, 如式(8)所示. 可以看出, 当供电系统在每一时刻均能满足负荷需求时, 负荷缺电率等于零, 此时混合能源系统具有最大的供电可靠性. 相反, 负荷缺电率越大, 说明负载缺失得越多, 混合能源系统的供电可靠性就越差.

$$R_{\text{LPSP}} = \frac{\sum_{t=1}^T [E_{\text{load}}(t) - (E_{\text{PV}}(t) + E_{\text{WT}}(t) + E_{\text{B}}(t) + E_{\text{H}}(t))]}{\sum_{t=1}^T E_{\text{load}}(t)} \quad (8)$$

2.1.2 系统经济性

在混合能源系统的配置规划中, 如果只考虑将 LPSP 作为单一的优化目标, 那么在相同的 LPSP 下可能得到多个规划结果, 因此需要引入系统经济性指标来进行多目标优化, 以此找到最具系统可靠性和经济性的规划结果.

经济性是一个混合能源系统规划的重要指标, 它直接影响该规划结果能否用于实际工程应用. 除了使用总投资成本来衡量混合能源系统的经济性, 本文利用 NREL 提出的平准化度电成本(levelized cost of energy, LCOE)指标来度量混合能源系统的经济性^[21]. 平准化度电成本定义为生命周期内的成本现值与生命周期内发电量现值的比值, 单位为元/(kW·h), 如

式(9)所示.

$$R_{\text{LCOE}} = \frac{C_{\text{LCA}}}{E_{\text{LCA}}} \quad (9)$$

式中: C_{LCA} 表示系统的生命周期总成本, 包括风力发电系统、光伏发电系统、储能电池系统、制氢储氢系统、氢发电机系统的初始投资成本与运维成本; E_{LCA} 表示系统生命周期总发电量.

2.2 优化算法

AI 算法中, 粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)属于进化算法的一种, 与模拟退火算法相似, 该算法从随机解出发, 通过不断迭代寻找最优解, 通过适应度来评价解的优劣性. 它模拟了自然界中鸟群觅食的行为, 当一只鸟在其附近发现食物时, 会跟鸟群中的其他鸟共享自己的位置信息与食物信息, 通过这些信息, 其他鸟会通过不断调整自己的速度和位置来向食物的方向移动. 种群中粒子更新速度和位置的方法如式(10)和式(11)所示. PSO 算法中有以下几点假设^[22]:

(1) 粒子被假定为没有体积、没有质量, 只有速度和位置两个属性.

(2) 每个粒子在解空间中运动, 通过速度改变其方向和位置.

(3) 通常粒子将追踪当前的最优粒子以经过最少迭代次数寻找到最优解.

在 PSO 算法的进化过程中, 粒子一直追踪个体历史最优位置与种群历史最优位置两个极值. 由于 PSO 算法具有收敛速度快、计算效率高和容易实现等优点, 本文选择 PSO 算法进行规划问题的优化求解.

$$v_i(t) = \omega \cdot v_i(t-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_i^{\text{best}}(t-1) - x_i(t-1)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [g_i^{\text{best}}(t-1) - x_i(t-1)] \quad (10)$$

$$z_i(t) = z_i(t-1) + v_i(t) \quad (11)$$

式中: ω 为惯性权重; r_1 和 r_2 为介于 0 和 1 之间的随机数; p_i^{best} 和 g_i^{best} 分别表示粒子 i 的局部最优位置和全局最优位置. c_1 和 c_2 表示学习因子, 本文中假设 $c_1 = c_2$ ^[23].

由于本文中给出的光伏-风电-电池-储氢混合能源系统的配置规划中需要对稳定性指标(LPSP)和经济性指标(LCOE)两个目标进行优化, 而且二者之间又存在某些关联, 因此需要进行多目标优化. 图 3 给出了采用多目标 PSO 算法对本文中离网式光伏-风电-电池-储氢混合能源系统的优化流程. 该优化算法由主函数 PSO 算法和适应度函数组成, 在 PSO 主函数中, 将光伏装机容量、风电装机容量、储能电池容

量、制氢能力和氢气发电机功率需求表示为粒子的属性，通过更新粒子的位置和速度来更新这些属性的值。本文采用两步优化法，首先通过适应度函数对粒子的属性进行适应度计算，判断其负荷缺电率是否满足目标，如果不满足目标，通过更新粒子的速度和位置来更新粒子的属性，重复上一步操作；如果适应度函数 LPSP 满足目标，则再计算适应度函数 LCOE，并更新每一个粒子的极值。然后重复以上步骤，直至所有迭代结束。最后，可以得到混合能源系统的最优规划结果。

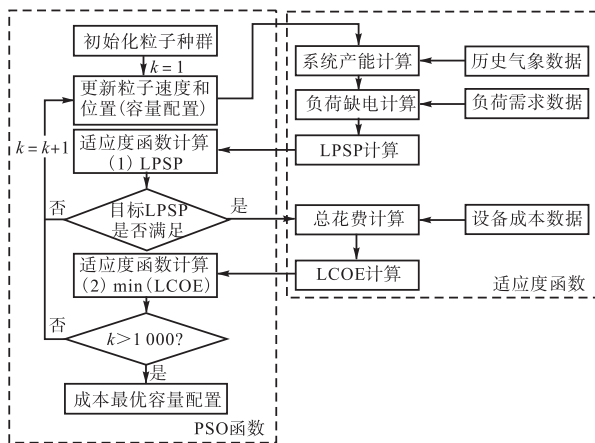


图3 混合能源系统优化流程示意

Fig.3 Optimization flowchart of hybrid energy system

2.3 控制策略

储能电池和储氢系统在离网式光伏-风电-电池-储氢混合能源系统中作为互补的储能系统，各有优

势。电池具有响应速度快、能量转化效率高的优点，而其成本、离网余电利用方面存在不足。储氢具有储存时间长、成本低与可将余电制氢或进一步转化为氨、甲醇等产品往系统外输送的优点，但存在能量转化率低、发电机响应速度慢的缺点。因此，充分发挥二者各自的优势，合理确定二者储能与放能的优先级与策略对混合能源系统的配置规划非常重要。图4给出了本文的储能系统控制策略。首先定义了一次能源余电量如式(12)所示：

$$\Delta E_1 = (E_{WT}(t) + E_{PV}(t)) \cdot \eta_{inv} - E_{load}(t) \quad (12)$$

可以看出，当 ΔE_1 大于等于零时，说明 t 时刻可再生能源发电量能够满足负荷需求，此时不需要储能系统出力，并且多余的电量会给电池充电和通过电解水制氢给储氢罐补充氢气；当 ΔE_1 小于零时，说明 t 时刻可再生能源发电量不能满足负荷需求，此时要靠储能系统提供能量来提供缺少的能量。此时定义二次能源余电量如式(13)所示：

$$\Delta E_2 = (E_B(t) + E_H(t)) \cdot \eta - |\Delta E_1| \quad (13)$$

式中： $E_B(t)$ 和 $E_H(t)$ 分别表示 t 时刻储能电池的剩余电量和储氢罐中氢气能提供的电量。可以看出，当 ΔE_2 大于等于零时，说明此时储能系统中的能量足以弥补可再生能源无法提供的部分电量，此时通过储能电池放电和氢气发电提供能量满足负荷需求；当 ΔE_2 小于零时，说明此时储能系统也无法满足负荷的能量需求，此时应将储能系统中的能量全部释放，以最大限度地保证负荷的能量需求，并记录缺少的电量 ΔE_2 ，用于后续计算系统缺电率(LPSP)。

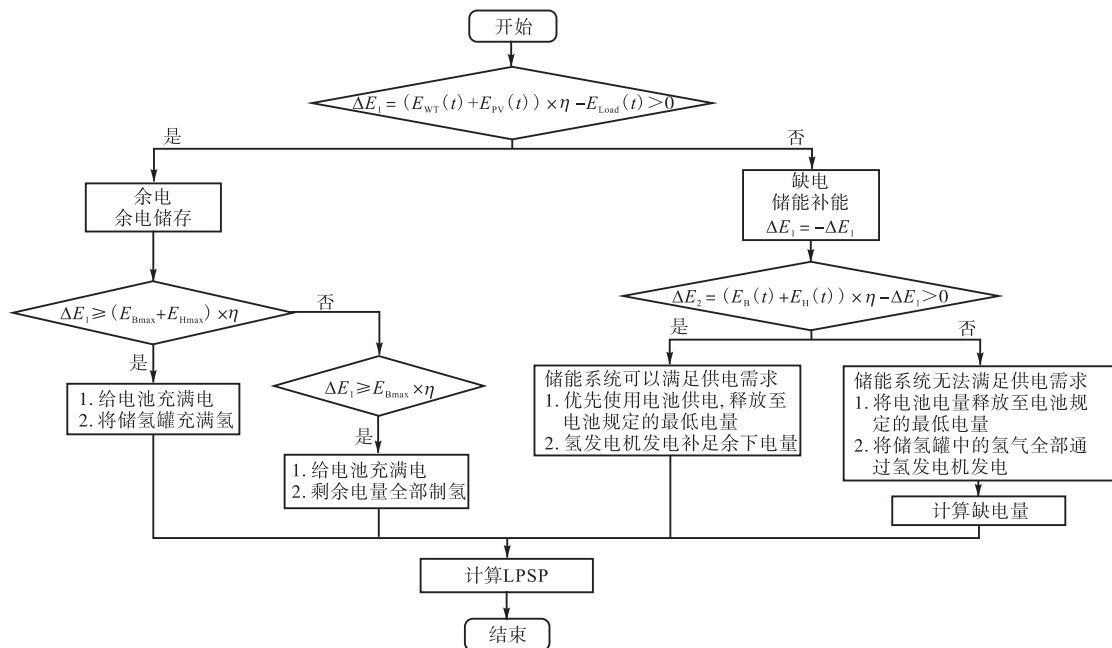


图4 储能系统控制策略

Fig.4 Energy storage system control strategy

2.4 约束条件

(1) 储能系统的储能量约束.

$$E_{Bmin} \leq E_B(t) \leq E_{Bmax} \quad (14)$$

$$E_{Hmin} \leq E_H(t) \leq E_{Hmax} \quad (15)$$

(2) 极端天气下的储能量约束.

$$E_H(t_\sigma - 1) + E_B(t_\sigma - 1) \geq \sum_{i=\sigma}^{\tau} [E_{load}(t_i) - (E_{WT}(t_i) + E_{PV}(t_i))] \quad (16)$$

式中, $t_\sigma \sim t_\tau$ 为连续极端天气时段.

(3) 负荷缺电率约束.

$$R_{LPSP} \leq R_{LPSP,max} \quad (17)$$

式中: $R_{LPSP,max}$ 为允许的最大缺电率, 本文取

$$R_{LPSP,max} = 5\% \quad [24].$$

3 算例分析

3.1 参数设置

本文以天津大学北洋园校区功能系统为设计对象, 针对校区所在位置气象参数和实际负荷数据, 对离网式光伏-风电-电池-储氢的混合能源系统进行配置规划. 本文选择规格为 550 W/unit 的光伏面板和规格为 2 MW/unit 的风力发电机. 系统主要设备的初始投资成本如表 2 所示^[25-27]:

表 2 综合能源系统设备投入价格

Tab.2 Input price of integrated energy system equipment

能源系统设备	设备价格	其他(全周期)
风电	400 万元/MW	300 万元
光伏	160 万元/MW	270 万元/MW
电池	150 万元/(MW · h)	67.5 万元/MW
氢发电机	300 万元/MW	135 万元/MW
储氢	1.4 万元/t	
制氢	600 万元/套 (200 m ³ /h)	270 万元/套

天津大学北洋园校区某年的用电量为 46 124.244 MW · h. 图 5 给出了天津大学北洋园校区逐时用电量曲线, 可以看出一年中用电高峰主要位于夏季和冬季. 由于学校每年设备的种类和使用时间基本不变, 所以此负荷需求功率具有一定的代表性, 因此本文基于此负荷需求进行模拟计算.

图 6 分别给出了天津大学北洋园校区所在位置 10 m 高度的逐时风速曲线. 从图 6 可以看出, 当地风力资源呈现春冬多夏秋少的特点. 图 7 和图 8 分别给出了天津大学北洋园校区所在位置逐时辐照度曲线, 从图 7 可以看出, 当地辐照资源呈现上凸型特点, 峰值出现在 5 月份; 图 8 显示了当地温度与辐照度资源呈相同趋势. 整体来看, 当地风光资源均呈现

春多秋少的特点, 且呈现一定互补特征.

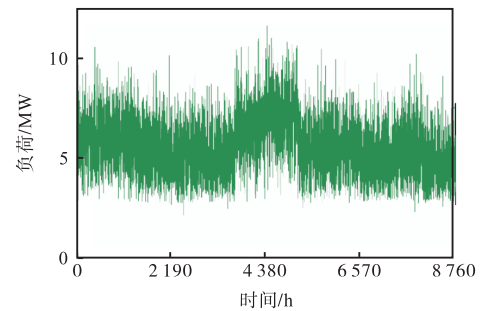


图 5 北洋园校区逐时用电量曲线
Fig.5 Hourly electricity consumption curve of Beiyuan campus

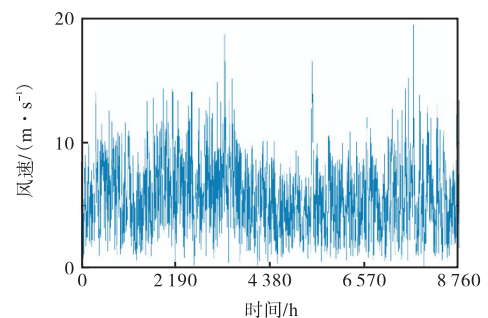


图 6 逐时风速曲线
Fig.6 Hourly wind speed curve

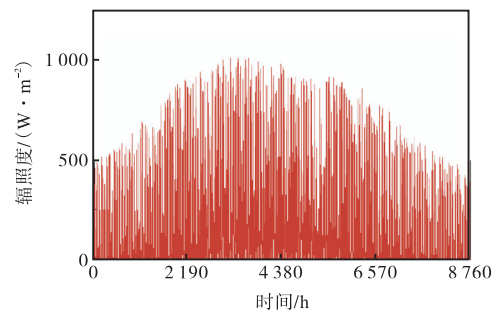


图 7 逐时辐照度曲线
Fig.7 Hourly irradiance curve

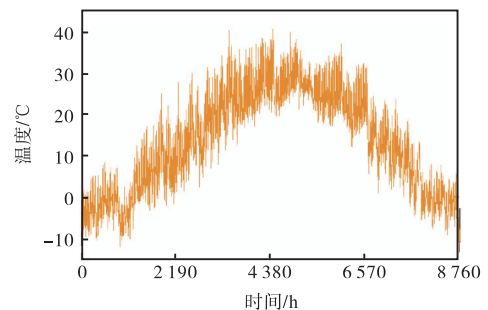


图 8 逐时温度曲线
Fig.8 Hourly temperature curve

图 9 展示了单位装机量下在某时间段内的发电情况, 可以看出, 该时间段内风电与光伏发电量均很小.

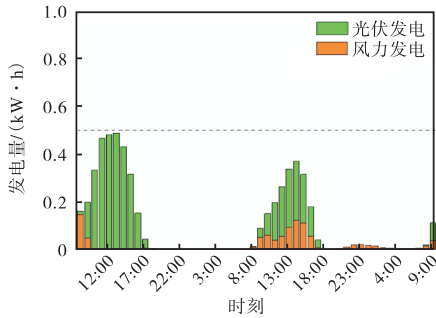


图 9 极端天气下发电量分布

Fig.9 Power generation distribution under extreme weather conditions

3.2 单目标优化

在单目标优化中, 本文强制将 LPSP 设置为零, 即假设在全年任一时刻, 系统的供电均能满足负荷需求. 此时 LCOE 成为唯一的优化目标. 本文假设迭代次数为 2000 次. 图 10 给出了在迭代 2000 次的过程中 LCOE 的变化情况, 可以看出, 在迭代到 1600 次时, LCOE 的值基本趋于不变, 此时认为 PSO 算法已经找到了最优解.

从表 3 中的规划结果可以看出, 只进行单目标优化, 虽然系统的 LPSP 为零, 即任意时刻系统均能满足负荷需求, 但 LCOE 值偏高, 意味着装机成本会很高, 即系统稳定性强但经济性差. 同时, 方案二与方

案三分别给出了只有光伏发电提供能量和只有风力发电提供能量的配置规划, 可以看出, 与光伏-电池-储氢混合能源系统和风电-电池-储氢混合能源系统相比, 光伏-风电-电池-储氢混合能源系统的 LCOE 分别可以降低 22.71% 和 47.62%. 方案四(单一电池储能)与方案一(电池-储氢混合储能)的对比分析表明, 通过电池与储氢技术的协同配置(方案一), 系统可充分发挥二者优势互补特性, 相较于仅配置电池储能的方案(方案四), 其平准化能源成本(LCOE)降低约 13.43%. 通过 4 个方案的对比可以得出结论, 光伏-风电-电池-储氢混合能源系统是最具效益的投资选择. 为进一步提升系统经济性, 有必要对混合能源系统的 LPSP 和 LCOE 进行多目标优化.

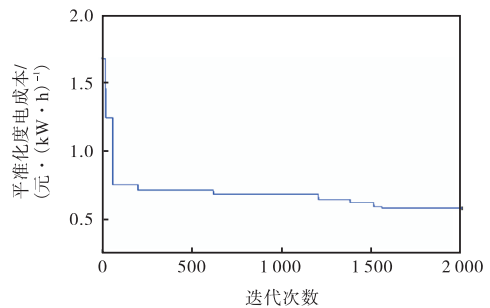


图 10 PSO 算法迭代过程

Fig.10 PSO algorithm iteration process

表 3 系统单目标优化配置方案

Tab.3 Single objective optimization configuration plan for the system

方案	风电装机量/ MW	光伏装机量/ MW	电池容量/ (MW·h)	制氢能力/ (m ³ ·h ⁻¹)	氢发电机功率/ MW	度电成本/ (元·(kW·h) ⁻¹)
一	34	47.29	13.42	4 883	10.53	0.58
二	—	141.59	18.93	7 243	13.26	0.60
三	69	—	17.41	8 346	14.68	0.64
四	36	48.46	27.50	—	—	0.67

3.3 多目标优化

本文将负荷缺电率 LPSP 和平准化度电成本 LCOE 作为多目标优化的两个目标函数. 由于 LPSP 与 LCOE 两个优化目标之间存在博弈关系, 即二者无法同时达到最优结果, 而二者整体规划往往会有无穷多个最优解, 在所有最优解中, 越高的供电可靠性往往会导致资本成本越高, 而越有经济性的成本投资则会导致系统供电可靠性变低, 因此需要决策者权衡 LPSP 和 LCOE 以选择最优规划方法. 例如在以天然气为备用能源的情境下, 可以适当牺牲供电可靠性来降低度电成本, 并在缺电情况下利用内燃机的燃料适应性特点燃用天然气进行发电出力. 图 11 给出了本算例的帕累托前沿曲线, 可以观察到, 随着 LPSP 的增加, LCOE 呈降低趋势. 表 4 给出 3 种不同决策下

的仿真结果. 其中, 方案一与方案二为兼顾稳定性与经济性的方案, 方案三为经济性最强的方案, 方案四为稳定性最强的方案. 通过对比方案三与方案四, 发现 LPSP 从 0 提高到 5% 时, LCOE 降低 25.9%.

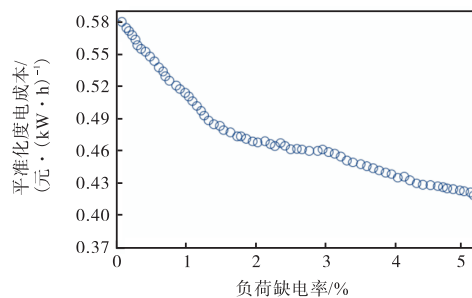


图 11 多目标优化的帕累托曲线

Fig.11 Pareto curve for multi-objective optimization

为了更直观地展示仿真结果,本文选择了一个典型日进行详细分析.典型日在样例 1 配置下的仿真结果如图 12 所示,光伏发电只在白天 6:00~18:00 发电,在 12:00 时达到发电峰值,而当地风机出力主要集中在 1:00~7:00,12:00~15:00 和 21:00~24:00.显然,在 1:00~7:00 时,风力发电与光伏发电

之和无法满足负荷需求,此时电池和储氢系统进行放电;而在 8:00~17:00 时,风力发电与光伏发电之和足以满足负荷需求,此时多余的电给电池和储氢系统进行充电和补氢;在 18:00~24:00 时,风力发电与光伏发电之和又不满足负荷需求,此时再调用电池和储氢系统给系统放电,以满足负荷需求.

表 4 系统多目标优化配置方案

Tab.4 System multi-objective optimization configuration scheme

方案	风电装机量/ MW	光伏装机量/ MW	电池容量/ (MW·h)	制氢能力/ (m ³ ·h ⁻¹)	氢发电机功率/ MW	R _{LPS} / %	度电成本/ (元·(kW·h) ⁻¹)
一	18	36.48	15.19	4 872	9.32	1	0.52
二	20	43.64	13.7	4 538	8.97	3	0.46
三	12	44.34	12.5	4 293	8.63	5	0.43
四	34	47.29	13.42	1 883	10.53	0	0.58

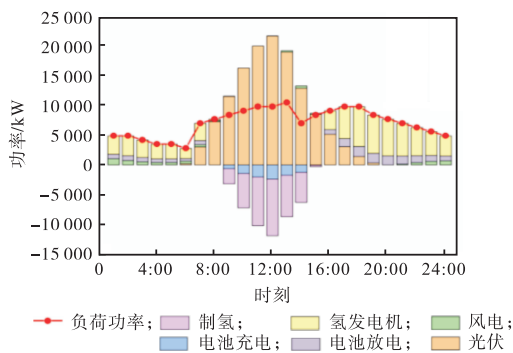


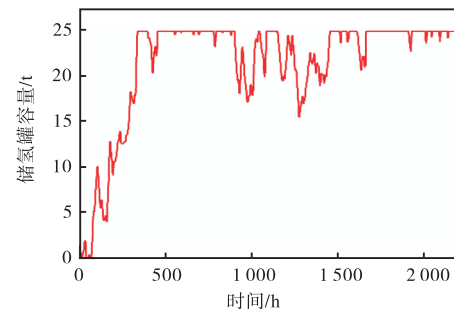
图 12 典型日 24 h 运行情况

Fig.12 Typical 24-hour operation on a day

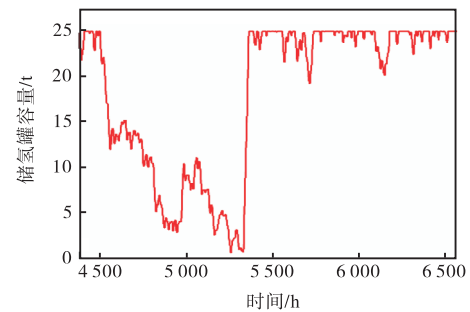
图 13 分别展示了系统储氢罐春季与秋季的变化情况,从图 13 可以看出,春季风光资源丰富时,系统开始制氢并储存,当系统缺电时,通过消耗氢气发电补能,当风光资源充足时再补充氢气;秋季风光资源不足时,通过大量消耗氢气保证系统用电,表现在储氢罐中氢气量消耗殆尽,当风光资源再次充足时,再通过制氢进行能量储存,实现了季节性储能.

图 14 给出了在此配置结果下,北洋园校区能源系统的光伏、风力发电量和系统用电量,可以看出,2月、3月、4月、5月有较大的能量溢出,而在 11月、12月、1月可再生能源发电量存在较大缺口,此时通过储氢系统来实现季节性调节,再配合储能电池的短期调节,实现系统全年稳定运行.

图 15 展示了上述配置规划下建造及运行 15 年的成本占比,可以看出,光伏成本占比最高,约为 41%,这是由光伏装机量大决定的.而储氢作为系统主要的储能手段,其成本占比 33.9%,位列第二.同时虽然目前电池储能单位成本较高,但由于其在储能系统中占比较小,所以电池综合成本仅占比 6.7%.



(a) 春季



(b) 秋季

图 13 春秋季储氢罐容量变化曲线

Fig.13 Change curve of hydrogen storage tank capacity in spring and autumn seasons

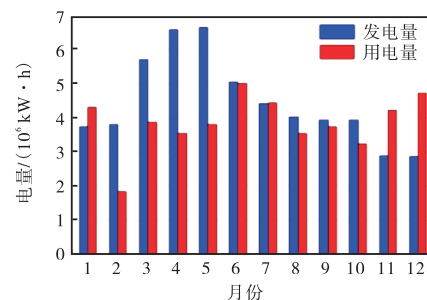


图 14 发电用电对比

Fig.14 Comparison of electricity consumption for power generation

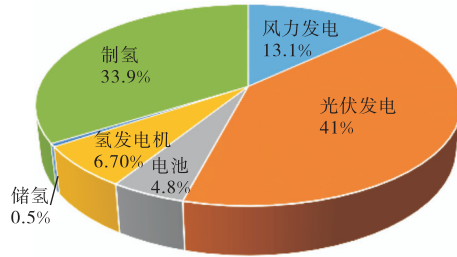


图 15 系统成本占比

Fig.15 Schematic diagram of system cost proportion

4 结论

本文根据天津大学北洋园校区实际用电需求以及当地风、光能资源设计了基于风、光、电池、储氢的分布式综合能源系统,构建了考虑系统稳定性和经济性多目标的风-光-电池-储氢综合能源系统配置及运行规划模型,得到风-光-电池-储氢综合能源系统优化配置方案,具体结论如下。

(1)对于本文研究的风-光-电池-储氢综合能源系统配置-运行规划模型,提高系统稳定性和降低系统度电成本存在一定的博弈关系。基于 PSO 算法得到的配置方案的最优解集,能够为用户提供更加多元化和细致化的规划方案。用户可以根据自身项目备用能源的实际情况,选择最合适的配置方案。

(2)储氢系统的接入可以减少电池的配置容量,从而达到了降低系统成本的目的,同时还弥补了电池储能时间短的缺点,实现跨季储能。以氢内燃机作为氢燃料转化发电装置,具备低投资成本的优势,且在缺电情况下可以灵活使用天然气等其他备用能源,为系统规划提供了灵活性。

(3)从系统稳定性来看,风能和光能的分布在一天中呈现互补状态,同时使用光伏和风电供电可以在减少储能装机量的同时提高系统稳定性;从项目投资来看,同时使用光伏和风电可以有效降低项目成本,从单目标优化结果可以看出,相较于仅使用光伏和仅使用风电,度电成本分别降低 3.09% 和 8.46%。

(4)考虑系统稳定性和经济性多目标的优化方法,可以让用户根据自身备用能源情况选择最佳的配置方案,能够保证在系统稳定性降低 5% 的情况下,度电成本降低了 25.9%,即在稳定性损失可接受的范围内,具有更低的系统成本。

参考文献:

[1] 国家能源局. 关于政协第十三届全国委员会第四次会议第 0429 号、第 B097 号提案答复的函[Z]. 2021-07-

31.

National Energy Administration. Response to Proposals No. 0429 and No. B097 of the Fourth Session of the 13th National Committee of the Chinese People's Political Consultative Conference[Z]. 2021-07-31.

[2] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75-83.

Jing Tao, Chen Geng, Wang Zihao, et al. Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 75-83(in Chinese).

[3] 周莹, 叶嘉乐, 于珊, 等. “双碳”目标下天然气分布式能源发展现状及机遇[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 23-29.

Zhou Ying, Ye Jiale, Yu Shan, et al. Development status and opportunities of natural gas distributed energy resource under the goal of “dual carbon”[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(2): 23-29(in Chinese).

[4] 冉亮, 费斯奇, 袁铁江, 等. 考虑碳自然循环的离网型风/光-火联合供能系统容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 509-515.

Ran Liang, Fei Siqi, Yuan Tiejia, et al. OPTIMAL capacity allocation of off-grid wind/pv-thermal energy supply system considering the carbon cycle[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(1): 509-515(in Chinese).

[5] 郑丙乐, 吴啸. 考虑闭环动态的离网型综合能源系统配置-运行一体优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1303-1314.

Zheng Bing, Wu Xiao. Integrated configuration and operation optimization of off-grid integrated energy system considering closed-loop dynamic characteristics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(4): 1303-1314(in Chinese).

[6] 鄢仁武, 林丽婵. 考虑 P2HH 和二维激励需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(12): 77-85.

Yan Renwu, Lin Lichan. Optimal dispatch of integrated energy system considering P2HH and two-dimensional incentive demand response[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(12): 77-85(in Chinese).

- [7] 谭玲玲, 汤伟, 楚冬青, 等. 基于主从博弈的电-热-氢综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 136-145.
- Tan Lingling, Tang Wei, Chu Dongqing, et al. Optimal dispatching of electric-heat-hydrogen integrated energy system based on stackelberg game[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 136-145 (in Chinese).
- [8] 高宇歌, 任洲洋, 程欢, 等. 考虑电解槽动态效率特性的电-氢混合储能优化运行方法[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 533-541.
- Gao Yuge, Ren Zhouyang, Cheng Huan, et al. Optimized operation of hybrid electric-hydrogen energy storage considering dynamic efficiency characteristics of electrolyzers[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(2): 533-541 (in Chinese).
- [9] Gabrielli P, Gazzani M, Martelli E, et al. Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 408-424.
- [10] Monteiro E, Brito P S. Hydrogen supply chain: Current status and prospects[J]. *Energy Storage*, 2023, 5(7): e466.
- [11] Ma J, Zhang N, Wen Q, et al. An efficient local multi-energy systems planning method with long term storage [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2024, 18(3): 426-441.
- [12] 刘尚奇, 胡健, 张晓杰, 等. 含光伏和储氢的电-氢集成化能源站容量配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 171-179.
- Liu Shangqi, Hu Jian, Zhang Xiaojie, et al. Capacity configuration of integrated electricity charging and hydrogen refueling station containing photovoltaic and hydrogen storage[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(8): 171-179 (in Chinese).
- [13] Xu X, Hu W, Cao D, et al. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 1418-1431.
- [14] 孙开元, 岑海凤, 陈坤, 等. 计及高比例可再生能源的配网系统储能多场景优化配置[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9094-9099.
- Sun Kaiyuan, Cen Haifeng, Chen Kun, et al. Optimized configuration of multi-scenario energy storage in distribution system with high proportion of renewable energy[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9094-9099 (in Chinese).
- [15] Liang C, Ding C, Zuo X, et al. Capacity configuration optimization of wind-solar combined power generation system based on improved grasshopper algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 225: 109770.
- [16] Teferra D M, Ngoo L M H, Nyakoe G N. Fuzzy-based prediction of solar PV and wind power generation for microgrid modeling using particle swarm optimization [J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12802.
- [17] Maleki A, Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms[J]. *Solar Energy*, 2015, 115: 471-483.
- [18] Gautam M, Rao K, Saxena B K. Reduction in liquid hydrogen by weight due to storage in different sizes of containers for varying period of time[C]//2017 *International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*. Kollam, India, 2017.
- [19] Wang Y, Dai H, Chen Z, et al. Simulation study on a novel solid-gas coupling hydrogen storage method for photovoltaic hydrogen production systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 299: 117866.
- [20] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势 [J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
- Sun Baigang, Bao Lingzhi, Luo Qinghe. Development and trends of direct injection hydrogen internal combustion engine technology[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2021, 12(3): 265-278 (in Chinese).
- [21] 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 (in Chinese).
- [22] 李斌, 李岩, 刘佳鑫. 基于改进粒子群算法的综合能源系统经济优化运行[J]. 电工技术, 2023(2): 153-157.
- Li Bin, Li Yan, Liu Jiaxin. Economic optimization operation of integrated energy system based on improved

- particle swarm optimization algorithm[J]. *Electric Engineering*, 2023 (2): 153-157 (in Chinese).
- [23] 张 丽, 刘青雷, 张宏伟. 基于改进二进制粒子群算法的家庭负荷优化调度策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(5): 118-128.
- Zhang Li, Liu Qinglei, Zhang Hongwei. Home load optimization scheduling strategy based on improved binary particle swarm optimization algorithm[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 118-128 (in Chinese).
- [24] 栗遇春, 王 刚, 李 瑞, 等. 基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置[J]. *热力发电*, 2023, 52(12): 49-58.
- Li Yuchun, Wang Gang, Li Rui, et al. Capacity configuration of distributed home energy system based on hydrogen energy[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(12): 49-58 (in Chinese).
- [25] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2022—2023 年)[R/OL]. http://www.chinapv.org.cn/road_map/1137.html, 2023.
- China Photovoltaic Industry Association (CPIA). China Photovoltaic Industry Development Roadmap(2022—2023) [R/OL]. http://www.chinapv.org.cn/road_map/1137.html, 2023.
- [26] Dao C, Kazemtabrizi B, Crabtree C. Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy[J]. *Wind Energy*, 2019, 22(12): 1848-1871.
- [27] Khosravi A, Koury R, Machado L, et al. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system[J]. *Energy*, 2018, 148: 1087-1102.