

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210918

基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂 容量配置与调度优化

刘雨佳, 樊艳芳, 郝俊伟, 白雪岩, 宋雨露

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为提高能源利用效率, 降低碳排放水平, 改善虚拟电厂运行效益, 构建了基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)模型。将制氢电解槽、氢燃料电池、储氢罐构成氢能系统, 代替传统虚拟电厂中的蓄电池, 并提出碱性电解槽宽功率适应模型, 提高电解槽在不同输入功率条件下的适应性。利用氢能系统运行时产生热量对系统负荷实行热电联供, 并将电解槽产生氧气出售。在此基础上, 使用改进多路无网格光线寻优算法对各设备出力调度与设备容量配置进行优化。仿真结果表明, 该算法在计算精度和速度上有一定提高。基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热 VPP, 在降低系统运行成本的同时可以有效应对风、光出力波动, 提高风、光消纳水平, 减少碳排放。

关键词: 制氢; 光伏; 风力; 热电联供; 虚拟电厂; 宽功率

Capacity configuration and optimal scheduling of a wind-photovoltaic-hydrogen-thermal virtual power plant based on a wide range power adaptation strategy for an alkaline electrolyzer

LIU Yujia, FAN Yanfang, HAO Junwei, BAI Xueyan, SONG Yulu

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: To improve energy efficiency, reduce carbon emissions, and improve the operating efficiency of virtual power plants (VPP), this paper constructs a wind-photovoltaic-hydrogen-thermal VPP model based on a wide range power adaptation strategy for alkaline electrolyzers. The hydrogen production electrolyzer, hydrogen fuel cell, and hydrogen storage tank constitute a hydrogen energy system to replace the battery in the traditional VPP, and we propose a wide range power adaptation strategy for the alkaline electrolyzer to improve the adaptability of the electrolyzer under different input power conditions. The heat generated during the operation of the hydrogen energy system is used to implement combined heat and power supply to the system load, and at the same time the oxygen produced by the electrolytic cell is sold. On this basis, an improved multi-channel meshless light optimization algorithm is used to optimize the operation scheduling and equipment capacity configuration of each device. The simulation results show that the algorithm offers an improvement in calculation accuracy and speed. The wind-photovoltaic-hydrogen-thermal VPP based on the wide range power adaptation strategy can effectively cope with the fluctuation of wind and photovoltaic output while reducing the operating cost of the system. It can also improve the level of wind and solar consumption and reduce carbon dioxide emissions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51767023).

Key words: hydrogen production; photovoltaic; wind power; co-generation; virtual power plant; wide range power

0 引言

随着我国经济逐渐由高速增长转向高质量增长,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767023); 新疆自治区研究生教育创新计划项目资助“基于风电精确预测与误差补偿的含氢虚拟电厂调度与控制策略研究”

能源行业作为经济发展的重要支柱和影响生态环境的首要因素, 正积极推动能源结构转型, 降低传统化石能源使用量, 大力发展风电、光伏等可再生能源, 减少碳排放量。由于风电、光伏等可再生能源出力具有随机性、间歇性和反调峰特性, 为保障电网安全稳定运行, 通常运用 VPP 技术将风-光、储系统聚合以期达到常规能源供电效果^[1-4]。考虑到蓄

电池在运行寿命及成本方面的劣势, 不适宜大规模应用于 VPP 储能。而氢能作为一种能量密度高、环境友好、易于存储的清洁能源^[5], 将氢能配合风电、光伏联合运行, 可以提高电网运行的稳定性^[6-7], 降低 VPP 投资成本, 电解槽与燃料电池也可作为热源进行热电联供^[8-9], 提高能源利用率, 减少碳排放量, 为实现碳中和提供新的研究思路。

目前对于可再生能源与氢能联合运行系统的研究, 主要集中在提高系统经济性和能量利用率以及风、光消纳量等方面。文献[10-11]利用氢能作为风电场储能, 并与燃气轮机等装置协同运行, 分别在电力市场和非并网背景下验证了氢储系统的可靠性, 结果显示其在提高风电消纳量、降低系统成本、减小系统缺电率以及系统输出波动率等方面具有明显优势; 文献[12]根据直流母线电压信号制定了主动型大规模风、光互补制氢系统协调控制策略, 提高了系统灵活性, 降低了能量损耗; 文献[13-14]分别构建了风-氢-气、风-光-氢-热综合能源系统, 并结合热电联产机组或燃料电池对负荷进行热电联供, 在降低弃风弃光率的同时提高了能源利用效率, 也减小了负荷用电成本。但上述文献并未考虑将氢能纳入 VPP 运行范畴, 未研究其对于 VPP 运行成本和碳排放量的影响, 且忽略了制氢与用氢过程中产生的热能, 降低了能源利用效率, 也没有考虑新能源出力波动对氢能系统产生的影响。

综上所述, 本文以能源结构转型和实现双碳目标为研究背景, 针对小区型负荷热、电供给需求, 从降低用电成本出发, 将氢能系统纳入 VPP 运行范畴, 利用风、光联合电解制氢储能, 建立了风-光-氢-热综合能源 VPP 系统, 并提出碱性电解槽宽功率适应模型以应对新能源出力波动。在考虑系统设备投资、维护成本、碳排放成本以及削峰填谷、售氧收益等因素的基础上, 对 VPP 系统进行优化调度。同时针对该系统数据复杂、变量多、难以求解的特点, 提出了改进多路无网格光线寻优算法, 加快了求解速度。最后以青海西宁某小区夏、冬和春、秋四季为例, 求解并比较了风-光-氢-热综合能源 VPP 与传统风光蓄电池 VPP 在各单元调度情况、新能源消纳量、设备容量配置、经济效益与碳排放量等方面的差异, 分析了改进多路无网格光线寻优算法的优势, 验证了所提模型的有效性和经济性。

1 风、光联合制氢热电联供 VPP 系统

1.1 系统结构

风、光联合制氢热电联供 VPP 系统分别由氢能

系统、氧气系统、热能网络和分布式电源供电网络四个部分构成, 如图 1 所示。

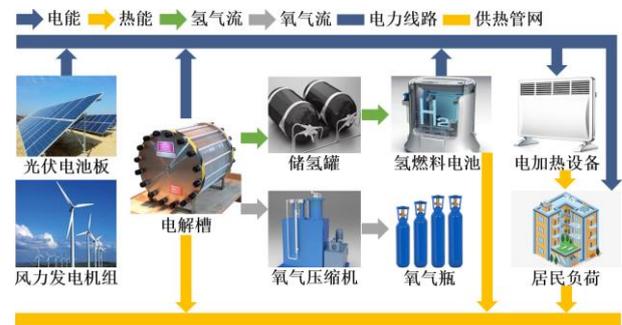


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

图 1 中: 氢能系统包括电解槽、储氢罐、氢燃料电池; 氧气系统包括氧气压缩机与氧气瓶; 热能网络由供热管网、冷却水循环装置(电解槽与氢燃料电池内部自带)、电加热设备构成; 小区分布式电源供电网络由风电、光伏分布式电源、供电网和负荷构成。氢能、热能、电力三个部分共同纳入 VPP 管理, 其相互之间的配合与调度优化由 VPP 控制中心根据当前风力、光伏发电机组出力与热、电负荷实际情况进行协调控制。氧气系统由于只负责存储电解槽产生的氧气, 所以须配合电解槽同步运行即可, 不参与 VPP 调度控制。

1.2 单元控制策略

在系统实际运行中, 以小区综合用电成本最小化为优化目标, 对调度系统控制策略进行优化。系统各部分控制策略如下所述。

1.2.1 氢能系统

电解槽利用风、光发电供给负荷后的剩余电力制氢, 产生的氢气分配到氢燃料电池或储氢罐, 以此代替风、光蓄电池 VPP 系统中的蓄电池装置进行储能。氢燃料电池产生电能根据当前负荷和电价情况供给小区负荷或余电上网。

1) 为实现经济效益最大化, 当输入电解槽功率不足时, 禁止从电网购电用于制氢。

2) 电解槽产生的氢气根据当前实际负荷情况, 按需分配到储氢罐中进行储存或者进入氢燃料电池中; 同时, 当系统负荷需求存在缺口时, 储氢罐释放氢气到氢燃料电池中运行, 产生电能与热能, 并且为实现经济效益最大化, 只有在电价处于高峰时段时储氢罐才允许释放氢气。

3) 氢燃料电池在实际运行中产热效率高于电解槽, 是系统中重要的热能来源, 因此在氢燃料电

池的运行中, 首先以热能需求为目标, 控制氢气使用量, 其次考虑电能需求。

1.2.2 氧气系统

电解槽在运行中会同时产生氢气和氧气, 其中氧气的体积为氢气的一半, 使用氧气瓶与氧气压缩机配合制氢电解槽同步运行, 将所产生的全部氧气压缩后储存在氧气瓶中用于工业氧气售卖, 产生的收益用于补贴系统运行费用。

1.2.3 热能网络

电解槽与氢燃料电池运行时产生的热能通过冷却水循环装置吸收, 并由供热管网向小区热负荷供热, 运行状态与电解槽和氢燃料电池同步。当电解槽与氢燃料电池产生的热能不能满足负荷要求时, 从电网购电使用电加热设备补足热能缺口。

1.2.4 分布式电源供电网络

风力、光伏发电单元按照实际出力全部参与VPP调度, 尽量避免弃风、弃光。小区负荷优先使用风、光电能, 并将负荷与电解槽未使用的多余电能进行余电上网, 当风、光出力不能满足负荷要求时, 从电网购电补足电能缺口。

2 氢能系统能量模型

2.1 制氢电解槽

目前的电解水制氢技术主要分为三类: 碱性水电解、质子交换膜纯水电解和高温蒸汽电解^[15-16]。由于碱性水电解技术发展成熟、应用广泛、设备操作灵活以及维护简便, 适用于本文构建的社区型应用场景, 因此本文针对碱性电解槽进行建模分析。

2.1.1 电解槽能量模型

碱性电解槽运行时, 其消耗的电能与产生的氢气和热量实时平衡, 其简化能量平衡模型为

$$\begin{cases} P_{el}^{IN} = P_{el}^{OUT} + Q_{el,w} + Q_{el,l} \\ P_{el}^{OUT} = \eta_{el} P_{el}^{IN} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{el}^{IN} 、 P_{el}^{OUT} 分别为电解槽输入总功率和输出功率; $Q_{el,w}$ 、 $Q_{el,l}$ 分别为冷却水吸收热量和电解槽空气散热损失热量; η_{el} 为电解槽制氢效率。

电解槽制氢效率 η_{el} 取决于电流效率 η_i 和电压效率 η_v , 在温度和压强恒定的情况下, η_{el} 可表示为^[17]

$$\eta_{el} = \eta_i \eta_v \quad (2)$$

式中, η_i 、 η_v 见式(3)、式(4)。

$$\eta_i = 96.5e^{\left(\frac{0.09}{I_{el}} - \frac{75.5}{I_{el}}\right)} \quad (3)$$

$$\eta_v = \frac{U_{ln}}{U_{el}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: I_{el} 为电解槽工作电流; U_{ln} 、 U_{el} 分别为电解水热中性电压和水电解电压。

在温度和压强一定的情况下, U_{ln} 、 U_{el} 分别如式(5)、式(6)所示^[18]。

$$U_{ln}(T_{el}, P) = U_{ln}(25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + \frac{T_{el} \Delta S}{zF} \quad (5)$$

式中: P 为电解槽工作压强; T_{el} 为电解槽工作温度; ΔS 为电解槽发生反应时内部熵的变化量 ($\Delta S(25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) = \Delta S^0 \approx 0.16 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); $z = 2$ 为反应时电解液中电子交换数量; F 为法拉第常数; $U_{ln}(25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \approx 1.481 \text{ V}$ 。

$$U_{el}(j_{el}, T_{el}, P) = U_{rev}(T_{el}, P) + U_{h_2}(j_{el}, T_{el}) + U_{ohm} + U_{o_2}(j_{el}, T_{el}) \quad (6)$$

式中: j_{el} 为电解槽单位电流密度; $U_{rev}(T_{el}, P)$ 为在温度和压强条件一定情况下的可逆电压; U_{ohm} 为单位电解液电阻压降; $U_{h_2}(j_{el}, T_{el})$ 、 $U_{o_2}(j_{el}, T_{el})$ 分别为在温度条件一定情况下的氢超电势和氧超电势。各表达式分别为^[18]

$$U_{rev}(T_{el}, P) = 1.5184 - 1.5421 \times 10^{-3} T_{el} + 9.523 \times 10^{-5} T_{el} \ln T_{el} + 9.84 \times 10^{-8} T_{el}^2 \quad (7)$$

$$U_{ohm} = I_{el} R_{el} \quad (8)$$

$$U_{h_2}(j_{el}, T_{el}) = \frac{RT_{el}}{\alpha_c n_c F} \ln\left(\frac{j}{j_{co}}\right) \quad (9)$$

$$U_{o_2}(j_{el}, T_{el}) = \frac{RT_{el}}{\alpha_a n_a F} \ln\left(\frac{j}{j_{ao}}\right) \quad (10)$$

式中: R_{el} 为电解液电阻; R 为普适气体常数; α_c 、 α_a 分别为阴极、阳极电荷传递系数; j_{co} 、 j_{ao} 分别为阴极、阳极交换电流密度; n_c 、 n_a 分别为阴极、阳极电子转移数。

2.1.2 电解槽宽功率适应模型

电解槽在运行时存在输入功率范围的限制, 导致其不能应对可再生能源出力波动。针对该问题, 本文首先将电解槽运行功率范围从 40%~100% 扩大到 5%~130%, 其次提出电解槽宽功率适应模型, 以匹配功率范围变化后的电解槽运行状态(效率、能量转换等方面), 并进行正确分析计算, 使其可以准确、稳定、安全地参与到 VPP 系统的调度中, 具体模型如下所述。

1) 低功率状态

目前, 为应对输入功率小于额定功率导致的电解槽运行不稳定问题, 一般通过降低电解槽工作电流使其运行功率与输入功率相符。但研究发现, 降低电解槽输入功率后会导致输出氢气、氧气的混杂程度上升^[19], 从而使电解槽具有爆炸风险。针对该

情况, 文献[19]提出了降低电解液循环速度的控制策略, 在降低电解槽功率的同时将电解液循环速度降低至与降低功率相同的百分比, 可实现输出氧气中氢气浓度与额定功率下的效果基本相同。但该文并未考虑电解液循环速度的改变会对电解槽能量模型和运行效率产生什么影响, 所以本文在该文献基础上, 对电解液循环速度改变后电解槽产生的变化做进一步研究, 并对电解槽能量模型进行优化, 使其匹配该策略。

在实际水电解过程中, 生成的氢气与氧气通过气泡从水中析出, 在改变电解液循环速度后, 气泡的大小、上浮速度等因素都会发生改变, 直接对电解液电阻率产生影响, 进而改变电解槽运行效率。所以在改变电解槽电解液循环速度的情况下, 必须对电解液电阻率进行计算, 从而确定电解槽运行效率。电解液循环速度与电解液含气度的关系可表示为

$$\varphi = \frac{V_g}{V_e + V_g} = \frac{K_g I_{cl} h b T_{cl}}{l(\omega_g + \omega_e) 273 p} \quad (11)$$

式中: φ 、 V_g 、 V_e 分别为电解液含气度、电解液气泡体积、电解液体积; K_g 、 b 、 h 、 l 分别表示电极反应时电化当量、电解槽宽度、电极高度、电极宽度; ω_g 、 ω_e 分别表示气泡上浮速度、电解液循环速度。

考虑电解液含气度后的实际电阻率, 其计算经验公式为

$$\rho = \rho_0 [(1 \sim 1.78)\varphi + \varphi^2] \quad (12)$$

式中: ρ 为考虑电解液含气度后的实际电阻率; ρ_0 为电解液理论计算的电阻率。

因此电解液实际电阻更新为

$$R'_{cl} = \rho \frac{lV}{f} \quad (13)$$

式中: V 为电解液体积; f 表示电解液截面积。

电解液电阻压降更新为

$$U'_{ohm} = I_{cl} \rho \frac{lV}{f} \quad (14)$$

最后将式(14)的结果代入式(6)和式(4), 即可计算出考虑电解液含气度后的实际工作效率。

2) 过负载状态

碱性电解槽具有一定程度的过负载工作能力, 最大过负载运行功率约为额定功率的 110%~130%^[20], 具体取值与电解槽运行温度有关。由式(11)可知, 当输入电流超过额定电流时, 电解液含气度下降, 导致电解液电阻进一步降低, 减缓了电解槽工作效率的下降趋势。但总体上由于电流增大导致电解槽产热

增加, 仍使其工作效率处于逐渐降低的状态, 该过程可由式(15)表示。

$$P_{R_{cl}} = \left(\frac{U - e_{rev}}{I_{cl} - I_{rev}} \right)^2 I_{cl} \quad (15)$$

式中: $P_{R_{cl}}$ 为电解液电阻发热功率; U 表示电解槽输入电压; e_{rev} 、 I_{rev} 分别表示电解槽反向电动势和与其对应的临界电流。

当电解液温度超过 90℃ 时, 电解槽隔膜(主要材质为石棉)会与碱性溶液发生反应(硅化现象), 导致其自身腐蚀, 所以目前碱性电解槽的最高运行温度为 90℃。

本文建立的 VPP 系统采取热电联供机制, 电解槽产生热量由冷却水循环装置导出, 当电解槽处于过负载运行状态而导致温度上升较快时, 可通过加大冷却水循环速度或降低注入冷却水温度等方式, 使电解槽温度处于一个合适的范围, 所以本文将电解槽最大过负载运行功率设定为额定功率的 130%。

2.1.3 基于宽功率适应模型的电解槽效率

根据上文计算得到的电解槽在不同运行功率下的效率值如图 2 所示, 计算参数参考文献[18]。

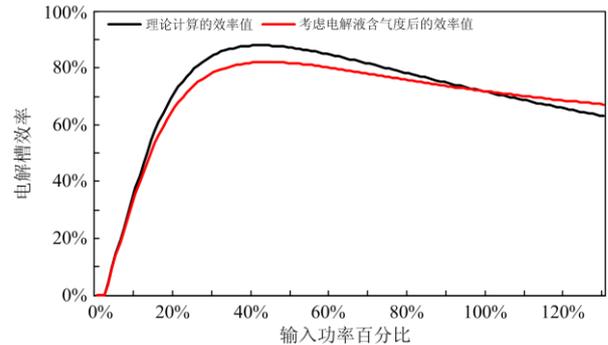


图 2 电解槽运行效率曲线

Fig. 2 Operating efficiency curve of electrolyzer

在考虑电解液含气度的情况下, 当输入功率处于 0%~100% 时, 由于输入电流的降低使电解液含气度提高, 从而导致电解液电阻上升, 进一步使电解槽实际工作效率降低; 当电解槽输入功率超过 100%, 进入过负载工作状态时, 由于电流增大导致电解液含气度下降, 使电解液电阻降低, 最终使其实际工作效率要高于理论计算效率。

基于上述论证, 在同步改变电解液循环速度, 并考虑电解液含气度变化的情况下, 可以将碱性电解槽安全运行功率范围下限降低到极低的水平(3%左右), 考虑到计算误差, 本文将运行功率范围下限设定为 5%。同时碱性电解槽短时过负载特性使其

工作功率上限增加至 130%，因此整体运行功率范围为 5%~130%，比 FDQ 系列电解槽功率范围(40%~100%)有了明显提升，增强了电解槽应对风光出力波动的能力。

2.2 氢燃料电池

氢燃料电池是将氢气和氧气的化学能直接转换成电能的发电装置，其原理是电解水逆反应^[21]。与电解槽类似，氢燃料电池运行时，消耗氢能与产生电能、热量实时平衡，其简化能量平衡模型为

$$P_b^{\text{IN}} = P_b^{\text{OUT}} + Q_{b,w} + Q_{b,l} \quad (16)$$

式中： P_b^{IN} 、 P_b^{OUT} 分别表示电堆(由多个电池组成)输入总功率和输出电功率； $Q_{b,w}$ 、 $Q_{b,l}$ 分别表示电堆吸热功率和电堆空气散热损失热能热量。其中，电堆输入总功率 P_b^{IN} 、电堆输出电功率 P_b^{OUT} 分别表示为^[22-25]

$$P_b^{\text{IN}} = \frac{N_{\text{cell}} I_b}{nF} \Delta H_{\text{H}_2} \quad (17)$$

$$P_b^{\text{OUT}} = N_{\text{cell}} V_{\text{cell}} I_b = \eta_b P_b^{\text{IN}} \quad (18)$$

式中： N_{cell} 、 I_b 、 V_{cell} 分别表示电堆电池数量、电堆工作电流、电堆工作电压(理想情况下约为 1.481 V)； n 、 ΔH_{H_2} 分别表示单个氢气分子具有的电子个数($n=2$)、氢气焓值； η_b 为氢燃料电池发电效率。

在实际环境中，当氢燃料电池稳定运行时，周围环境温度基本不变，同时对于水冷式氢燃料电池，空气散热仅占总发热量的 3%^[22]，因此式(16)中 $Q_{b,w}$ 、 $Q_{b,l}$ 两项可忽略不计，氢燃料电池发电效率表示为

$$\eta_b = \frac{P_b^{\text{OUT}}}{P_b^{\text{IN}}} = \frac{V_{\text{cell}} I_b}{\frac{I_b}{nF} \Delta H_{\text{H}_2}} \quad (19)$$

简化后的氢燃料电池能量模型为

$$\begin{cases} \frac{I_b}{nF} \Delta H_{\text{H}_2} = P_b^{\text{OUT}} + \dot{Q}_{b,w} \\ \dot{Q}_{b,w} = (1 - \eta_b) \frac{I_b}{nF} \Delta H_{\text{H}_2} \end{cases} \quad (20)$$

3 风、光联合制氢热电联供 VPP 数学模型

3.1 目标函数

在本文构建的模型中，VPP 以系统最小运行成本为目标，优化调度与设备容量配置，考虑余电上网与氢燃料电池削峰填谷收益、出售氧气收益、热能与电力负荷购电成本、设备投资成本、设备折现成本、碳排放成本以及由于设备容量配置不足导致的失负荷惩罚等因素，目标函数可表示为

$$\min Z = M(365 \times \sum_{t=1}^T (Y_t - S_t) - C_z) - C_i \quad (21)$$

式中： Z 为系统全寿命周期运行成本； M 为系统运行寿命(年)； T 为 VPP 调度周期($T=24$ ，一个调度周期包含 24 个调度时段)； t 为当前调度时段； Y_t 、 S_t 分别为 t 时段 VPP 运行费用、运行总收益； C_z 、 C_i 分别为设备年折现成本和设备总投资成本。

$$Y_t = D_t^1 + F_t + C_{\text{co}_2,t} \quad (22)$$

$$S_t = D_t^2 + D_t^3 + D_t^0 \quad (23)$$

$$C_z = 1.05 \sum \left(\frac{r(1+r)^M}{(1+r)^M - 1} + \xi_j \right) S_j Q_j \quad (24)$$

$$C_i = \sum (S_j \times Q_j) \quad (25)$$

式中： D_t^1 为 VPP 购电费用； F_t 为失热负荷惩罚费用； $C_{\text{co}_2,t}$ 为系统碳排放成本； D_t^2 为风、光余电上网收益； D_t^3 为氢燃料电池余电上网收益； D_t^0 为售卖氧气收益； r 为设备基准折现率； ξ_j 、 S_j 、 Q_j 分别为第 j 类设备年运维成本占建设成本比例、设备单位容量建设成本和设备容量。

$$D_t^1 = W_t^1 G_t^1 \quad (26)$$

$$F_t = W_t^2 G^2 \quad (27)$$

$$D_t^2 + D_t^3 = (W_t^3 + W_t^4) G^3 \quad (28)$$

$$D_t^0 = M_t^0 \eta^0 G^0 \quad (29)$$

式中： W_t^1 、 W_t^2 、 W_t^3 、 W_t^4 分别为 t 时段系统购电能量、系统失负荷能量以及风、光余电上网能量和氢燃料电池余电上网能量； M_t^0 为 t 时段产生氧气体积； η^0 为氧气压缩机充装效率； G_t^1 、 G^2 、 G^3 、 G^0 分别为 t 时段电网电价、失热负荷惩罚价格、余电上网价格、工业氧气出售单价。

3.2 约束条件

1) 电、热能量平衡约束

$$P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{PW}} + P_t^1 + P_{b,t}^{\text{OUT}} = P_{\text{el},t}^{\text{IN}} + P_t^{\text{EH}} + P_t^{\text{LO}} \quad (30)$$

式中： P_t^{PV} 、 P_t^{PW} 、 $P_{b,t}^{\text{OUT}}$ 分别为 t 时段系统光伏、风力发电机组、燃料电池电堆输出电功率； P_t^1 为 t 时段系统购电功率； $P_{\text{el},t}^{\text{IN}}$ 、 P_t^{EH} 、 P_t^{LO} 分别为 t 时段系统电解槽输入功率、电加热设备负荷功率和小区负荷功率。

$$(H_t^{\text{EL}} + H_t^{\text{B}} + H_t^{\text{EH}}) \eta_h = H_t - H_t^{\text{LOSS}} \quad (31)$$

式中： H_t^{EL} 、 H_t^{B} 、 H_t^{EH} 分别为 t 时段系统电解槽、氢燃料电池和电加热装置产热量； η_h 为供热管网运行效率； H_t 为 t 时段系统热负荷需求量； H_t^{LOSS} 为 t

时段系统失热负荷功率。

2) 电解槽特性约束

碱性水电解槽主要工作特性包括: ①启停特性, 启动时需要预热, 时间较长, 运行过程中遇到紧急情况可立即停机, 功率瞬间降为 0; ②调节特性, 从大功率运行状态转向小功率状态可实现毫秒级快速调节, 从小功率运行状态转向大功率状态则需经过分钟级的时间; ③过载特性, 短时过载功率可达到额定功率的 110%~130%。因此在调度过程需要考虑上述因素对系统运行的影响。

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^{t_{\text{on}}-1} u_{t+m} \geq t_{\text{on}}(u_t - u_{t-1}) \\ \sum_{m=0}^{t_{\text{off}}-1} (1-u_{t+m}) \geq t_{\text{off}}(u_{t-1} - u_t) \end{cases} \quad (32)$$

$$\frac{dP_{\text{el},t}}{dt} \leq 6.67\% Q_{\text{el}} \quad (33)$$

$$P_{\text{el},\min} \leq P_{\text{el},t} \leq Q_{\text{el}} (1.1 \sim 1.3) \quad (34)$$

式中: t_{on} 、 t_{off} 分别为电解槽启动和停止时间; u_t 为 t 时段电解槽运行状态, 1 表示运行, 0 表示停止; $P_{\text{el},t}$ 为 t 时段电解槽运行功率; Q_{el} 为电解槽规划容量; $P_{\text{el},\min}$ 为电解槽最小运行功率。

3) 设备功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{b,t}^{\text{IN}} \leq Q_b \\ 0 \leq P_t^{\text{EH}} \leq Q_{\text{eh}} \\ H_t^{\text{EH}} = \eta_{\text{eh}} P_t^{\text{EH}} \end{cases} \quad (35)$$

式中: Q_b 、 Q_{eh} 分别为氢燃料电池、电加热装置规划容量; η_{eh} 为电加热装置效率。

4) 储氢罐特性约束

$$\begin{cases} 0 \leq C_t^{\text{IN}} + C_t^{\text{OUT}} \leq Q_{\text{c},s} \\ 0 \leq M_t^{\text{IN}} \leq Q_c - M_t \\ 0 \leq M_t^{\text{OUT}} \leq M_t \\ M_{\text{co},(0)} = M_{\text{co},(24)} \end{cases} \quad (36)$$

式中: C_t^{IN} 、 C_t^{OUT} 分别为 t 时段储氢罐输入、输出氢气速率(kg/h); $Q_{\text{c},s}$ 、 Q_c 分别为储氢罐氢气规划充放速率、氢气规划存储容量; M_t^{IN} 、 M_t^{OUT} 、 M_t 分别为 t 时段储氢罐输入、输出氢气容量和当前氢气存储容量; $M_{\text{co},(0)}$ 、 $M_{\text{co},(24)}$ 分别为 00:00 和 24:00 时的储氢罐氢气存储容量。

4 改进多路无网格光线寻优算法

光线寻优算法是一种基于费马定理的快速寻

优智能算法, 其通过模拟光线在介质中传播的折射和反射过程进行迭代搜索最优值, 求解速度快, 结构简单, 适用于多种问题的求解, 是一种新型的智能优化算法^[26]。文献[27]提出了无网格光线寻优算法, 简化了判别条件, 提高了光线寻优算法在计算多维目标函数时的速度, 但其计算精度略低, 容易陷入局部最优等。因此, 本文提出了改进多路无网格光线寻优算法, 基本原理是增加光线数量, 且每条光线采用不同的随机起点, 在光线迭代时每条光线与全局最优光线的适应度值进行比较, 可以在扩大搜索范围的同时减少算法迭代次数。理论上该算法建立的光线数量越多, 性能越好, 但相应的计算时间也会上升, 因此在本文建立的模型中选用双路无网格光线寻优算法, 其原理如图 3 所示。

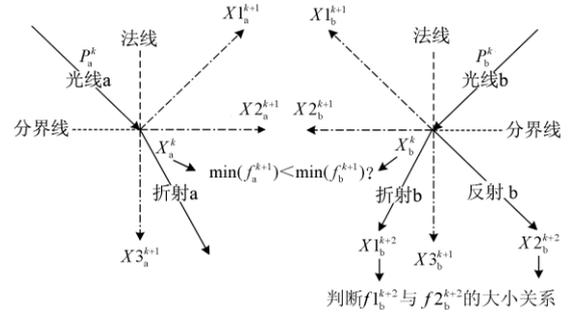


图 3 改进双路无网格光线算法寻优原理图

Fig. 3 Improved two-way meshless ray algorithm optimization schematic

首先建立光线 a、b, 并分别沿方向 P_a^k 、 P_b^k 传播至 X_a^k 、 X_b^k 点时, 将 X_a^k 、 X_b^k 点代入适应度函数, 求得适应值 f_a^k 、 f_b^k , 然后从 X_a^k 、 X_b^k 点向三维方向各做一个步长的试探点 X_a^{k+1} ($X1_a^{k+1}$ 、 $X2_a^{k+1}$ 、 $X3_a^{k+1}$) 和 X_b^{k+1} ($X1_b^{k+1}$ 、 $X2_b^{k+1}$ 、 $X3_b^{k+1}$)。将两路光线的 6 个试探点分别代入适应度函数, 求得适应值 f_a^{k+1} ($f1_a^{k+1}$ 、 $f2_a^{k+1}$ 、 $f3_a^{k+1}$)、 f_b^{k+1} ($f1_b^{k+1}$ 、 $f2_b^{k+1}$ 、 $f3_b^{k+1}$)。然后比较两路光线的适应值中的最小值, 若 $\min(f_a^{k+1}) < \min(f_b^{k+1})$, 说明光线 a 优于光线 b, 则光线 a、b 均沿 f_a^{k+1} 中最小适应值相反的方向发生折射, 其中光线 b 折射后生成 $X1_b^{k+2}$ 点和适应度值 $f1_b^{k+2}$ 。随后将光线 b 在试探点产生的 3 个适应值与在 X_b^k 点时的适应值 f_b^k 进行比较, 只要 3 个适应值中有一个小于 f_b^k , 则光线 b 向适应值中最小的方向发生折射; 若 3 个适应值均大于 f_b^k , 则光线 b 向 3 个适应值中最大的反方向反射。折射或反射后的光

线 b 生成 $X2_b^{k+2}$ 点和适应度值 $f2_b^{k+2}$, 比较适应度值 $f1_b^{k+2}$ 、 $f2_b^{k+2}$ 的大小: 若 $f1_b^{k+2} < f2_b^{k+2}$, 说明 $X1_b^{k+2}$ 点优于 $X2_b^{k+2}$ 点, 则光线 b 位置更新为 $X1_b^{k+2}$ 点; 若 $f1_b^{k+2} > f2_b^{k+2}$, 说明 $X2_b^{k+2}$ 点优于 $X1_b^{k+2}$ 点, 则光线 b 位置更新为 $X2_b^{k+2}$ 点。

可以发现, 首先光线 a 、 b 初始起点和传播方向不同, 扩大了算法搜索范围; 其次光线 a 、 b 相互比较适应度值后, 光线 b 多了一个全局最优与自身最优的比较过程, 该过程在减少迭代次数的同时, 改善了原算法容易陷入局部最优的问题。

5 算例分析

本文以青海西宁某社区为例, 数据参考文献[28], 考虑夏、冬以及春、秋四个季节的风光出力特性对系统产生的影响, 并对比分析系统综合运行成本。社区内部的风力和光伏发电机组、社区居民负荷、制氢电解槽、储氢罐、氢燃料电池和电加热设备共同构成 VPP。风力和光伏发电机组装机容量均为 1 000 kW, 产生的电能全额参与 VPP 调度, 在夏、冬和春、秋四个季节的典型日内, 该社区风力和光伏发电机组出力和 VPP 热、电负荷曲线如图 4 所示。其中夏季热负荷为集中供给的生活热水负荷, 夏季冷负荷未采取集中供给措施, 因此纳入电负荷统一处理。

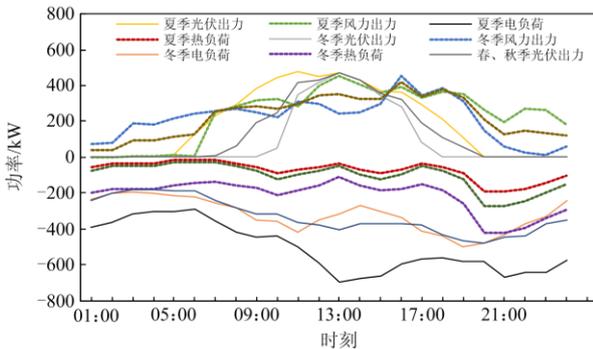


图 4 负荷与风光出力曲线图

Fig. 4 Load, wind power and photovoltaic power output curve

各设备参数参考文献[22,29], 并根据目前市场价格进行调整后的参数如表 1 所示。仿真环境为 MatlabR2019a, CPU Ryzen R5 4600U, RAM 16 GB, 采用改进双路无网格光线寻优算法进行求解。

此外, 分时电价 G_t 以及在计算中需要使用的其他重要参数分别如式(37)和表 2 所示。

$$G_t = \begin{cases} 0.417, t \in [00:00-06:00] \cup [23:00, 24:00] \\ 0.894, t \in [07:00-22:00] \end{cases} \quad (37)$$

表 1 设备参数表

设备	单位成本	运维成本比	效率
制氢电解槽	2 210 元/kW	2%	氢气(75%) 热能(20%)
氢燃料电池	4 550 元/kW	4%	电能(60%) 热能(31%)
电加热装置	100 元/kW	1%	95%
储氢罐	2 850 元/(kg/h) 65 元/kg	1%	90%
磷酸铁锂	2 700 元/kW	4%	充电(85%) 放电(90%)
储能电池	500 元/(kWh)		
氧气压缩机	103.85 元/(m ³ /h)	1%	90%
氧气瓶	320 元/个 (40 L 氧气瓶)	1%	—

表 2 其他重要参数

参数	参数值
设备寿命	20 年(蓄电池 5 年)
失负荷惩罚	10 倍实时电价
基准折现率	10%
工业氧气出售单价	10 元/m ³ (标准大气压)
碳排放单价	30 元/t

本文设定 3 种系统控制策略进行对比分析。

方案 1: 以常规蓄电池组为储能, 建立 VPP。

方案 2: 在方案 1 的基础上, 以氢能系统替换蓄电池, 电解槽运行功率范围为 40%~100%。

方案 3: 在方案 2 的基础上, 采用本文建立的电解槽宽功率能量模型, 将电解槽运行功率范围扩大到 5%~130%。

5.1 调度情况分析

将本文设定的 3 种方案分别在上述相同场景下采用改进双路无网格光线寻优算法进行单元出力调度和容量配置优化计算, 各单元 24 h 内的电力调度情况如下所述。

1) 方案 1: 常规蓄电池储能 VPP

图 5 为方案 1 系统各单元调度情况, 蓄电池在该场景中发挥的作用较小(电池放电少), 在夏、冬和春、秋四个季节的典型日 24 h 调度时段内, 蓄电池放电电能总计分别为 459.2 kWh、450.29 kWh、287.59 kWh, 基本上不到各自负荷的 1%。其原因是: (1) 蓄电池的调度策略决定其只能在电价高峰时段放电, 以获得最大收益; (2) 电价高峰时段与风、光出力最大时段重合, 此时段用电缺口小, 因而需

要蓄电池提供的电能少, 最终导致程序优化得出的蓄电池容量较小。

同时, 夏、冬季节的典型日电、热负荷总电能和风、光总发电量分别为 13 946.42 kWh、9 887.28 kWh 和 13 896.98 kWh、8 184.78 kWh, 春、秋季节的典型日电、热负荷电能和风、光总发电量分别为 10 444.98 kWh 和 87 772.78 kWh。通过对比发现, 当负荷缺口越大时, 蓄电池释放的电能越多, 发挥的作用越大。

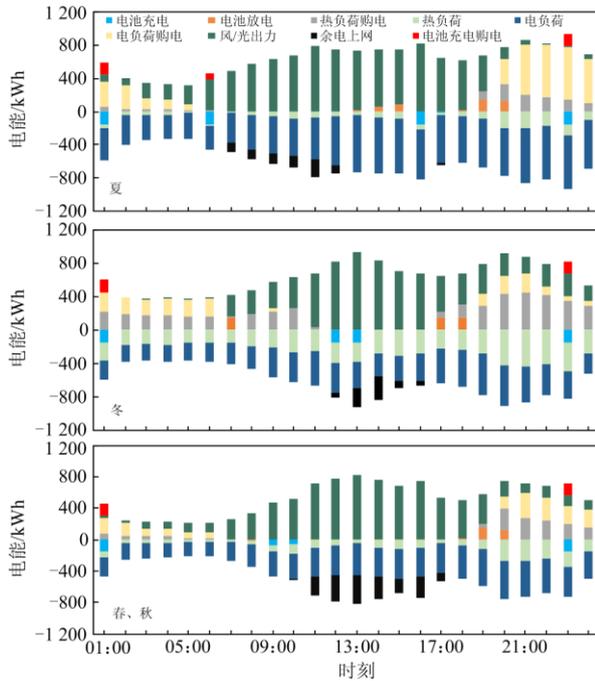


图 5 方案 1 系统各单元调度情况

Fig. 5 Scheduling situation of each unit of the system in scheme one

2) 方案 2: 40%~100% 功率范围电解槽 VPP

图 6 为方案 2 系统各单元电力调度情况, 根据方案 2 建立的风光氢热 VPP, 在风、光出力过剩时段, 如夏季 11:00、冬季 12:00—16:00、春、秋季 11:00—16:00, 启动了电解槽制取氢气, 同时产生的氢气进入储氢罐, 起到了对多余电能进行消纳和储存的作用。储氢罐在高峰时段释放氢气至氢燃料电池, 为系统提供部分电能, 起到了削峰填谷的作用。

但仍然可以发现, 受制于其电解槽 40%~100% 的运行功率限制, 有部分过剩电力没有得到消纳, 而采取了余电上网的措施。如: 夏季 06:00—10:00、12:00—18:00; 冬季 10:00—11:00、15:00—18:00; 春秋季 07:00—10:00、15:00—18:00。其未消纳

的电能分别占风、光出力总剩余电量的 82.58%、17.09%、28.16%, 虽然余电上网能带来一定的收益, 但相比于氢能系统热电联供产生的效益, 造成一定程度的浪费。

由图 7 可知, 氢燃料电池产生的电能和热能减

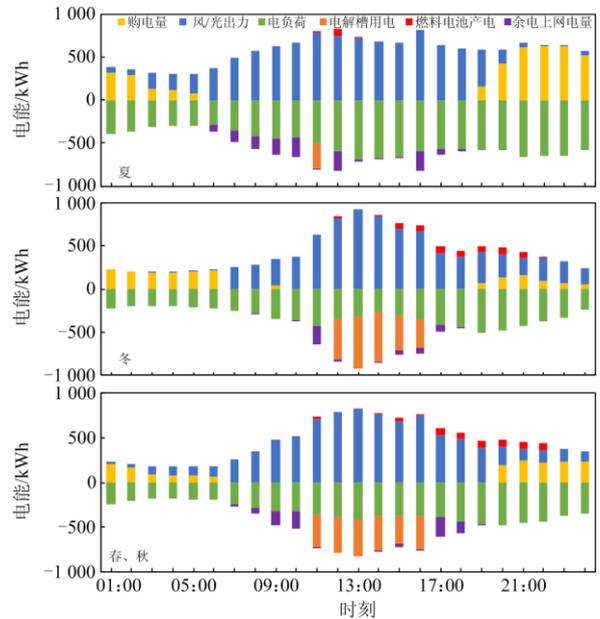


图 6 方案 2 系统各单元电力调度情况

Fig. 6 Power dispatch situation of each unit of the system in the second scheme

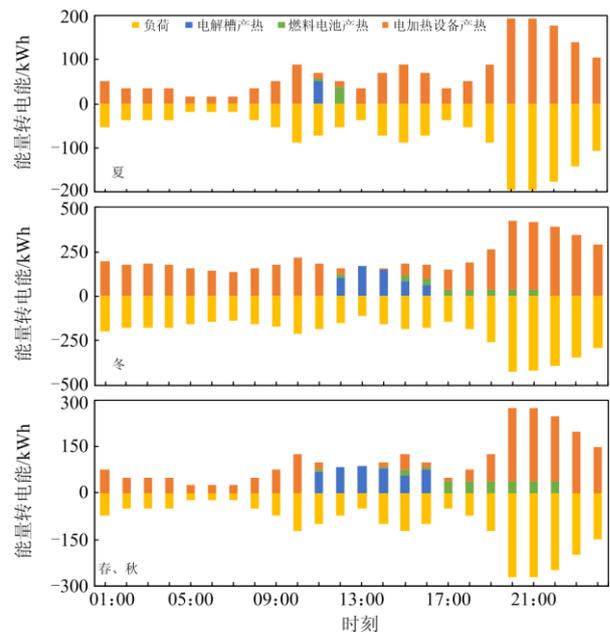


图 7 方案 2 系统各单元热能调度情况(转电能)

Fig. 7 Heat energy dispatching situation of each unit of the system in scheme two

少, 使系统需要配备更大容量的电加热设备, 并从电网购进大量电能用于制热。

同时, 由于某些时段风、光出力剩余过大, 电解槽将其全部消纳后, 所产生的热能大于负荷需求, 也造成了一定程度的浪费, 去除该部分后, 夏、冬和春、秋四个季节氢能系统提供的热能约为热负荷的 5.47%、15.39%、27.34%, 提供的热能较少, 使系统运行成本上升。

3) 方案 3: 5%~130% 功率范围电解槽 VPP

对比方案 2, 方案 3 采用的电解槽宽功率能量模型将电解槽运行功率范围从 40%~100% 扩大到 5%~130%, 因此从图 8 中可以明显发现 VPP 对于过剩风、光电能的消纳水平有所提高。其未消纳电能分别占风、光出力总剩余电量的 17.5%、9.53%、7.73%, 较方案 2 分别减少了 65.08%、7.56%、20.43%, 效果显著。

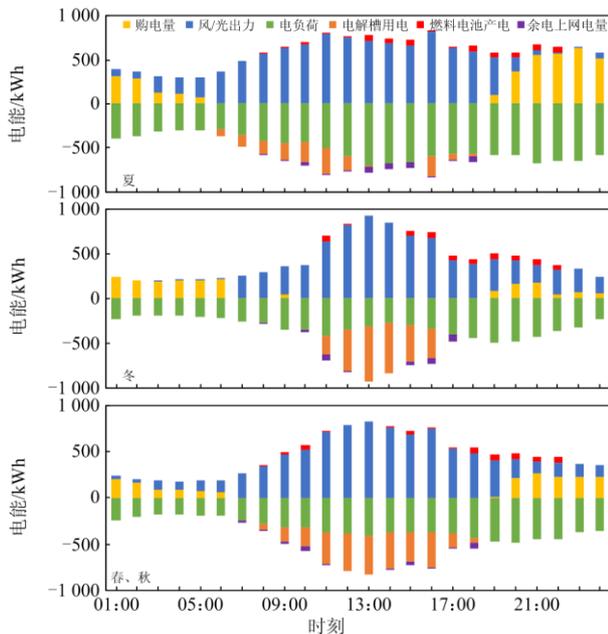


图 8 方案 3 系统各单元电力调度情况

Fig. 8 Power dispatch situation of each unit of the system in the third scheme

并且由于电解槽消纳过剩电能的增加, 也使氢能系统的产热量增加, 如图 9 所示, 与方案 2 相比, 可以发现夏、冬和春、秋四个季节分别在 06:00、21:00—22:00、11:00、22:00 以及 07:00—09:00 产热量明显增加。去除未使用的多余热能后, 夏、冬和春、秋四个季节氢能系统提供的热能约为热负荷的 34.65%、17.18%、34.06%, 较方案 2 分别提高 29.18%、1.79%、6.72%。

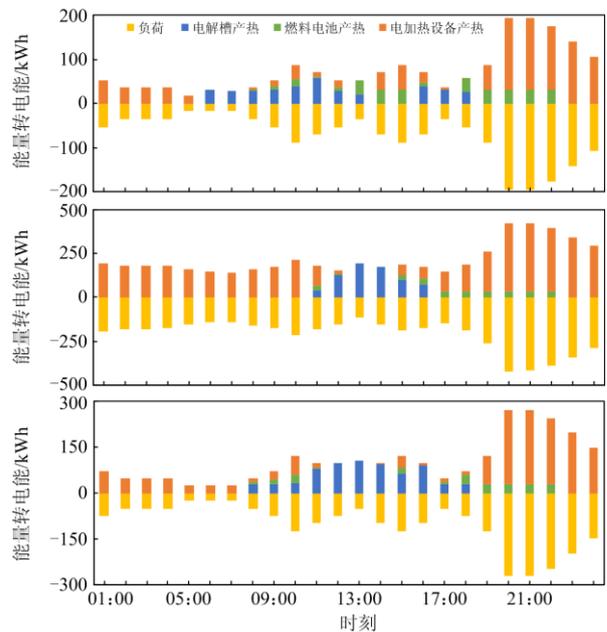


图 9 方案 3 系统各单元热能调度情况(转电能)

Fig. 9 Heat energy dispatching situation of each unit of the system in scheme three

5.2 新能源消纳量分析

3 种方案在各季节典型日的风、光发电过剩电能消纳情况如图 10 所示。

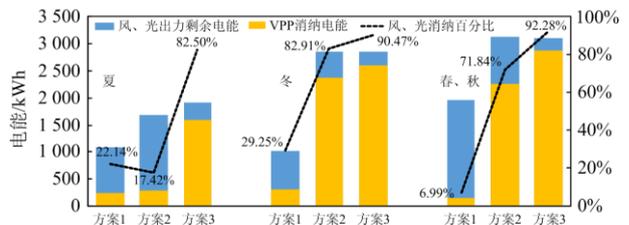


图 10 3 种方案的风、光出力剩余电能消纳情况

Fig. 10 Energy consumption of wind and photovoltaic power generation in the three scenarios

由图 10 可知, 从方案 1 至方案 3 的 VPP 消纳的过剩风、光出力在不断增加, 方案 1 至方案 3 的风、光过剩电能消纳平均百分比分别为 19.46%、57.39%、88.41%。方案 1 与方案 2、方案 3 相差较大的原因在于方案 2、方案 3 的氢能系统可以同时起到储能、供热的作用, 其综合效益高于方案 1 中的蓄电池系统; 而方案 3 与方案 2 相比, 其优势在于扩大了电解槽运行功率范围, 消纳了更多的风、光过剩电能。

5.3 容量配置结果分析

将本文设定的 3 种方案分别在上述相同场景下采用改进双路无网格光线寻优算法进行单元出力调

度和容量配置优化计算, 其设备配置容量计算结果如表 3 所示。

表 3 设备容量配置
Table 3 Equipment capacity allocation

设备	方案 1	方案 2	方案 3
电解槽/kW	—	607.76	467.51
氢燃料	—	124.99	98.80
电池/kW	—	—	—
蓄电池	150.10 kW×2 300.19 kWh×2	—	—
储氢罐	—	3.21 kg/h 19.27 kg	2.61 kg/h 22.45 kg
电加热 设备/kW	442.07	407.39	392.44
氧气压缩 机/(m ³ /h)	—	62.05	43.73
氧气瓶/个	—	54	65

从表 3 中发现, 3 个方案最主要的差别在于电加热设备的容量配置, 方案 1 以蓄电池为储能装置, 无法提供热能, 方案 2、方案 3 由于电解槽与氢燃料电池产生的热能抵消了部分热负荷需求, 使其在电加热设备的配置容量上要少于方案 1。同时, 在方案 2、方案 3 中, 由于氢气具有高能量密度的特性, 使氢燃料电池和储氢罐的配置容量低于蓄电池, 并且蓄电池运行寿命较短, 在 20 年的运行周期内至少需要更换一次, 因此配备了两组, 增加了投资成本。对比方案 2、方案 3 可以发现, 方案 3 在采用电解槽宽功率能量模型后, 减少了电解槽和电加热设备的配置容量, 降低了设备成本。电解槽运行功率范围与最小运行功率如图 11 所示。

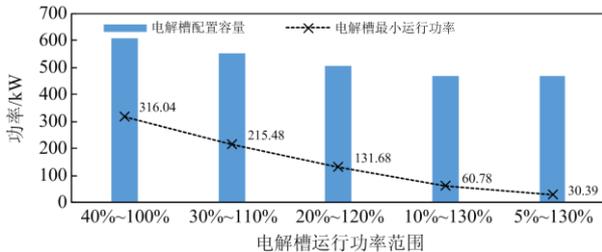


图 11 电解槽运行功率范围与最小运行功率关系

Fig. 11 Relationship between electrolyzer operating power range and minimum operating power

从图 11 中可以发现, 随着电解槽运行功率上限的提高和下限的降低, 其分别带来了电解槽配置容量和电解槽最小运行功率的降低。因为在优化计算中, 为提高系统经济性, 需要尽可能多地消纳风、光电能, 导致电解槽配置容量上升, 但采用本文提出的宽功率运行策略后, 可以在减少容量的情况下

消纳更多的电能, 所以电解槽配置容量随运行功率范围的扩大而减少。电解槽配置容量降低使其投资成本和运维费用减少, 同时电解槽最小运行功率的降低则有利于系统消纳更多的风、光过剩电能, 提高系统经济性。

5.4 系统经济成本分析

3 种方案在上述场景下进行单元出力调度和容量配置优化计算, 其系统运行费用如表 4 所示。

表 4 系统运行费用

Table 4 System operation cost

		方案 1	方案 2	方案 3
单日总运行成本/元	夏	-2 470.39	-2 309.82	-1 470.24
	冬	-3 764.69	-1 660.79	-1 703.79
	春、秋	-609.32	521.25	433.90
单日余电上网收益/元	夏	831.89	1 310.81	326.64
	冬	707.16	477.01	266.04
	春、秋	1 780.79	860.23	234.43
单日氧气出售收益/元	夏	—	283.93	1 425.05
	冬	—	2 127.22	2 213.69
	春、秋	—	2 124.70	2 567.53
设备投资成本/万元		-115.49	-194.93	-151.95
设备年折现成本/万元		-5.55	-29.25	-22.81
系统全周期运行成本/万元		-1 586.79	-1 314.31	-1 029.04

由表 4 可知, 方案 3 与方案 1、方案 2 相比, 其系统全周期运行成本分别下降约 35.15%、21.7%, 充分体现了利用氢能系统代替蓄电池进行储能以及电解槽宽功率适应模型在提高 VPP 经济性上的优势。

方案 2、方案 3 在单日运行成本上具有优势, 则是因为氧气出售带来的收益对运行成本的补贴。而方案 3 相比于方案 2 在单日运行成本上进一步下降, 则是因为采用了电解槽宽功率适应模型, 可以利用更多风、光过剩电能, 其过剩电能消纳平均百分比由方案 2 的 57.39% 提高到 88.41%。

同时得益于单日运行成本的减少, 虽然方案 1 在设备成本上明显低于方案 2、方案 3, 但最终系统的全周期运行成本仍然显著高于方案 2、方案 3。

基于本文场景下的 3 个方案运行时间与系统全周期运行成本关系如图 12 所示。当运行时间为 1 年时, 方案 1、方案 3 的系统全周期运行成本基本相同, 处于最低水平, 而方案 2 成本最高。超过 1 年后, 方案 3 的成本则始终低于方案 1、方案 2, 方案 2 在系统运行时间为 4~5 年开始低于方案 1。系统运行时间越长, 本文提出的基于碱性电解槽宽功

率适应模型的风-光-氢-热 VPP 越能在经济性上增加优势。

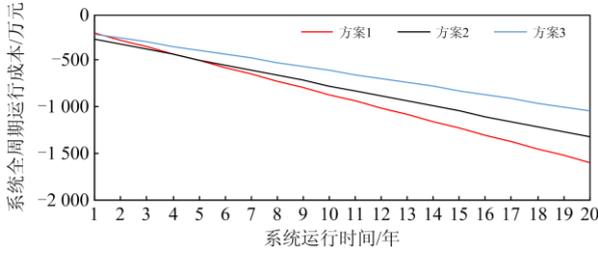


图 12 运行时间对系统成本的影响

Fig. 12 Impact of running time on system costs

5.5 系统碳排放量分析

在本文构建的系统中，由于电解槽制氢使用的是风力、光伏发电机组产生的清洁电能，所以制氢过程不产生碳排放。并且在氢燃料电池运行过程中将氢气转换为电能，只产生热量和水，也没有二氧化碳生成。因此，在不计各设备生产制造阶段产生碳排放的前提下，各方案主要碳排放由向电网购电产生，目前我国西北地区电网电能碳排放因子约为 0.81 kg/kWh，各方案碳排放计算结果如图 13 所示。

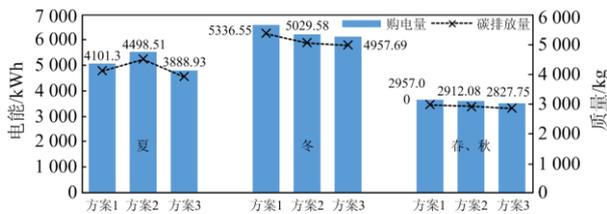


图 13 3 种方案的系统碳排放量

Fig. 13 Carbon emissions of the three options

由图 13 可知，方案 3 得益于应用电解槽宽功率适应模型带来的电解槽最小运行功率的降低，可以利用更多的风、光过剩电能，因此在各个季节总碳排放量水平均为最低。方案 1 至方案 3 的全年累计碳排放量分别为 12 394.85 kg、12 440.17 kg、11 674.37 kg，方案 3 相比方案 1、方案 2 碳排放量分别降低 5.81%、6.16%，因此电解槽宽功率适应模型在降低碳排放量上具有一定效果。

5.6 算法性能分析

为验证本文改进的双路无网格光线寻优算法具有良好性能，本文利用线性递减权重粒子群算法与无网格光线寻优算法进行对比验证。粒子群算法中参数设定为：惯性权重最大值为 0.9、最小值为 0.4，粒子种群个数为 200，学习因子 $c_1 = c_2 = 2.05$ 。

本文改进的双路无网格光线寻优算法参数设定与无网格光线寻优算法相同：初始点位置和方向采用与粒子群算法相同的方法随机取得，经多次试

验，初始步长取值为所有变量初始范围最大值相加时的算法性能最好；步长更新系数取 0.986，即每迭代一次步长乘以 0.986；试探方向点取 0.4 个步长。以本文构建的方案 3 为例，3 种算法各求解 10 次，取平均值后结果如表 5 所示。

表 5 算法性能

Table 5 Algorithm performance

	改进双路无网格 光线寻优算法	无网格光线 寻优算法	线性递减权重 粒子群算法
最优值收敛			
迭代次数/次	31	105	117
计算时间/s	0.597 423	0.984 519	1.875 273
VPP 全周期 运行成本/元	1 029.04	1 033.87	1 028.46

从表 5 中可以看出，改进双路无网格光线寻优算法较无网格光线寻优算法和线性递减权重粒子群算法在计算速度上具有显著优势，其最优值收敛计算时间分别约提高了 39.32%、68.14%。原始无网格光线寻优算法有计算精度较低、容易陷入局部最优等缺点，本文改进之后，VPP 全周期运行成本减少约 4.83 万元，计算精度有一定提升，改进了易陷入局部最优的缺点，同时，对比线性递减权重粒子群算法也仅相差 0.056%，相比计算速度的提升，计算误差可以忽略不计。

6 结论

本文针对提高能源利用率，降低碳排放水平，改善 VPP 运行效益，将制氢电解槽、氢燃料电池、储氢罐构成氢能系统，替换传统风、光蓄电池虚拟电厂系统中的蓄电池装置，并提出电解槽宽功率适应模型，构建了基于风、光联合制氢的热电联供型 VPP 模型，并利用改进双路无网格光线寻优算法对系统出力调度与设备容量配置进行优化。通过对比分析得出以下结论：

1) 基于碱性电解槽宽功率适应模型的风-光-氢-热 VPP 系统对比传统风、光蓄电池 VPP 系统和普通风光氢热 VPP 系统，得益于氧气出售带来的收益和设备成本的降低，在减少系统全周期运行成本上效果显著，分别降低了约 35.15%、21.7%，明显提升了系统经济效益；

2) 基于碱性电解槽宽功率适应模型的风-光-氢-热 VPP 系统由于消纳了更多的风、光过剩电能，向电网购电量减少，因此相比传统风、光蓄电池 VPP 系统和普通风-光-氢-热 VPP 系统在碳排放量上分别降低了约 5.81%、6.16%；

3) 本文改进的双路无网格光线寻优算法比无网格光线寻优算法和线性递减权重粒子群算法在计算速度上具有显著优势, 分别提高了 39.32%、68.14%, 并且改进了传统无网格光线寻优算法易陷入局部最优的缺点, 提高了计算精度。

本文考虑了氢能系统对于虚拟电厂经济性和碳排放量的影响, 但制氢电解槽与氢燃料电池的能量模型设计较为简单, 忽略了环境等因素的影响; 同时如何对系统碳排放量采取更精确和更全面的计算, 值得更进一步研究。

参考文献

- [1] 罗翼婷, 杨洪明, 牛犇, 等. 考虑多风能预测场景的虚拟电厂日内滚动柔性优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 51-59.
LUO Yiting, YANG Hongming, NIU Ben, et al. Day-ahead flexible rolling optimization dispatch of virtual power plant based on multi-wind forecasting results[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 51-59.
- [2] REDDY S S. Optimal power flow with renewable energy resources including storage[J]. Electrical Engineering, 2016, 99(2): 1-11.
- [3] 杨冬梅, 王俊, 杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 28-39.
YANG Dongmei, WANG Jun, DU Wei. Optimal dispatching for regional integrated electric and heating systems considering aggregation and transaction of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 28-39.
- [4] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 92-100.
YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 92-100.
- [5] 曹军文, 郑云, 张文强, 等. 能源互联网推动下的氢能发展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 302-311.
CAO Junwen, ZHENG Yun, ZHANG Wenqiang, et al. Hydrogen energy development driven by the energy internet[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2021, 61(4): 302-311.
- [6] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [7] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [8] HUGO L, ROCHE R, JEME S, et al. Combined cooling and power management strategy for a standalone house using hydrogen and solar energy[J]. Hydrogen, 2021, 2(2): 207-224.
- [9] LI Nan, ZHAO X, SHI X, et al. Integrated energy systems with CCHP and hydrogen supply: a new outlet for curtailed wind power[J]. Applied Energy, 2021, 303(3).
- [10] KRONIGER D, MADLENER R. Hydrogen storage for wind parks: a real options evaluation for an optimal investment in more flexibility[J]. Applied Energy, 2014, 136: 931-946.
- [11] 马裕谷, 陈洁, 赵军超, 等. 非并网风氢互补系统的容量多目标优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 422-429.
MA Ronggu, CHEN Jie, ZHAO Junchao, et al. Multi-objective optimization for capacity of non-grid-connected wind/hydrogen hybrid power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 422-429.
- [12] 杨文强, 邢小文, 覃姝仪, 等. 大规模风/光互补制储氢系统协调控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 24-27, 55.
YANG Wenqiang, XING Xiaowen, QIN Shuyi, et al. Study of coordination control strategy of large-scale wind/PV hybrid hydrogen energy system[J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 24-27, 55.
- [13] 蔡国伟, 西禹霏, 杨德友, 等. 基于风-氢的气电热联合系统模型的经济性能分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1465-1471.
CAI Guowei, XI Yufei, YANG Deyou, et al. Economic performance analysis of model of combined gas-heat-power system based on wind-hydrogen[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(5): 1465-1471.
- [14] KHALID F, DINCER I, ROSEN M A. Analysis and assessment of an integrated hydrogen energy system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(19): 7960-7967.
- [15] 邹浩斌. 固体聚合物电解质水电解池及其膜电极的研

- 究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- ZOU Haobin. Study on solid polymer electrolyte hydrolysis cell and its membrane electrode[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [16] SHAMS A, KHAN F, ZHANG Y, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 32284-32317.
- [17] GOEKCEK M. Hydrogen generation from small-scale wind-powered electrolysis system in different power matching modes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(19): 10050-10059.
- [18] MALKOW T, PILENGA A, TSOTRIDIS G, et al. EU harmonised polarisation curve test method for low-temperature water electrolysis[R]. European Commission, Joint Research Centre, Directorate C: Energy, Transport and Climate, 2018.
- [19] 宁楠. 水电解制氢装置宽功率波动适应性研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(11): 133-136.
- NING Nan. Research on hydrogen generation system by water electrolysis under wide power fluctuation[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(11): 133-136.
- [20] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 463-472.
- SHEN Xiaojun, NIE Congying, LÜ Hong. Coordination control strategy electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.
- [21] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [22] 黄念之. 燃料电池热电联产系统的建模分析及优化[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- HUANG Nianzhi. Modeling analysis and optimization of fuel cell cogeneration system[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [23] 李晓嫣. 千瓦级燃料电池热电联产系统及其制氢系统模拟[J]. 通信电源技术, 2018, 35(5): 35-37, 40.
- LI Xiaoyan. Simulation of fuel cell based micro-CHP system and its H₂ generation unit[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(5): 35-37, 40.
- [24] ACAKPOVI A, ADJEI P, NWULU N, et al. Optimal hybrid renewable energy system: a comparative study of wind/hydrogen/fuel-cell and wind/battery storage[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 2020(3): 1-15.
- [25] 李雪松, 随权, 林湘宁, 等. 一种兼顾富余风电充分消纳和全局效益的电网灵活负荷控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5885-5897.
- LI Xuesong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. A flexible load control strategy for power grid considering fully consumption of surplus wind power and global benefits[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5885-5897.
- [26] 沈继红, 李焱. 基于正六边形网格的光线寻优算法[C] // 中国运筹学会第十届学术交流会论文集, 2010年10月16日, 中国, 北京: 89-94.
- [27] 李加莲. 光线寻优算法的研究及改进[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- LI Jialian. Research and improvement of light ray optimization algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [28] 柳川, 王宇拓, 王林川, 等. 含冷热电联供系统微电网优化运行研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 31-37.
- LIU Chuan, WANG Yutuo, WANG Linchuan, et al. Research on the economical operation of the micro-grid with CCHP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(2): 31-37.
- [29] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 考虑热电综合利用的光伏储氢独立供能系统容量优化配置[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 66-73.
- XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal capacity configuration of solar-hydrogen independent power-supply system considering electricity-heat comprehensive utilization[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 66-73.

收稿日期: 2021-07-18; 修回日期: 2021-10-25

作者简介:

刘雨佳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂优化调度; E-mail: lyjia98@foxmail.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 硕士, 教授, 研究方向为新能源并网技术与电力系统保护。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 姜新丽)