

全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源集成与优化

翟宇凯¹, 王炯超², 吴寒逸¹, 王瑞林¹, 赵传文¹

(1. 南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对现有太阳能与氢能协同的混合能源系统存在系统能量利用率低、能源供需不匹配等问题, 提出了全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源架构。考虑太阳能综合输出效果最佳, 确立了光谱分频窗口为 700~1 100 nm。以江苏省南京市某一工业园区为供能对象, 通过对园区全年逐时的电、冷、热、生活热水负荷需求进行分析, 进行了系统设计, 并通过 Matlab 搭建了全工况动态数字模型。经过模拟仿真得出新系统较参比系统在全年的能量利用率及温室气体减排量上分别提升了 10.43% 和 655 660 kg, 验证了新系统在能效以及环境友好性方面的优越性。分别探究了太阳能聚光面积和储热装置容量对系统性能的影响规律, 在综合考虑系统性能和经济成本下, 对新系统开展了容量配置优化, 得出了新系统的最佳容量配置是太阳能聚光面积为 6 000 m², 储热装置容量比 N_{store} 为 0.9。经过容量配置优化后, 系统的能效达到 29.03%, 比初始设定下系统的能效提高了 3.56%。采用全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源系统, 不仅提高了能源利用效率, 还有效减少了温室气体排放, 为实现可持续发展目标提供了新的思路和方法。

关键词: 全光谱太阳能; 氢能利用; 协同方式; 综合能源系统; 光谱分频窗口; 容量配置优化

中图分类号: TK512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2024)12-0171-09

Distributed integrated energy system integration and optimization for full-spectrum solar and hydrogen energy utilization

ZHAI Yukai¹, WANG Jiongchao², WU Hanyi¹, WANG Ruilin¹, ZHAO Chuanwen¹

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. School of Architecture and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Existing hybrid energy systems using solar and hydrogen often face challenges such as low energy utilization efficiency and mismatches between energy supply and demand. To address these issues, a distributed integrated energy architecture for full-spectrum solar and hydrogen utilization is proposed. Considering the optimal output of solar energy, a spectral splitting window of 700–1 100 nm is established. Targeting an industrial park in Nanjing, Jiangsu Province, as the energy supply object, the study analyzed the park's hourly demand for electricity, cooling, heating, and domestic hot water over the course of a year. A system was designed, and a full-condition dynamic digital model was developed in Matlab. Simulation results showed that, compared to a reference system, the new system improved annual energy utilization efficiency by 10.43% and reduced greenhouse gas emissions by 655 660 kg, demonstrating its superior energy efficiency and environmental friendliness. The effects of solar concentrator area and thermal storage capacity on system performance were explored individually. After balancing system performance and economic costs, capacity optimization for the new system was performed, identifying an optimal configuration with a solar concentrator area of 6 000 m² and a thermal storage capacity N_{store} of 0.9. Post-optimization, the system's energy efficiency reached 29.03%, an increase of 3.56% from the initial configuration. This distributed integrated energy system, which synergistically utilizes full-spectrum solar and hydrogen energy, not only enhances energy

收稿日期: 2024-10-28; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.HH24102801

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (52106014)

作者简介: 翟宇凯 (1998—), 男, 江苏常州人, 硕士研究生。E-mail: andyzhai_nnu@163.com

通讯作者: 王瑞林 (1992—), 男, 山西长治人, 副教授, 博士。E-mail: wangruilin@nju.edu.cn

引用格式: 翟宇凯, 王炯超, 吴寒逸, 等. 全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源集成与优化 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(12): 171–179.

ZHAI Yukai, WANG Jiongchao, WU Hanyi, et al. Distributed integrated energy system integration and optimization for full-spectrum solar and hydrogen energy utilization [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(12): 171–179.



utilization efficiency but also significantly reduces greenhouse gas emissions, offering a novel approach to achieving sustainable development goals.

Key words: full-spectrum solar energy; hydrogen energy utilization; synergistic approach; integrated energy system; spectral division window; capacity optimization of thermal storage devices

0 引言

为了实现“双碳”目标，中央提出，“十四五”期间我国非化石能源消费比重将增加到20%左右，“十五五”期间将达到25%左右^[1]。在此背景下，可再生能源得到不断发展^[2]，其中太阳能作为一种丰富清洁的可再生能源，在我国受到广泛关注。可再生能源（太阳能、风能、潮汐能等）容易受环境条件限制，而且其间歇性、不稳定性为稳定供能带来极大的挑战。因此，需要寻找一种合适的二次能源，作为可再生能源的“能源载体”。

氢能具有清洁性、高效性、便于制造和长期大量地储存、应用方式广等特点。“氢储能”的概念应运而生^[3]，“氢储能”就是将具有强烈波动特性的风、光电能转化为高能量密度的氢能储存起来的技术。氢能应用广泛，氢燃料电池是一种不受卡诺循环限制，能将氢转化成电的高效发电装置，其电效率高达50%^[4]，其中质子交换膜燃料电池（PEMFC）广泛应用于提高可再生能源的可靠性和连续性^[5]。因此，将太阳能与氢储能、质子交换膜燃料电池（PEMFC）进行结合可以解决太阳能实际应用中存在的不稳定性问题，将太阳能的优势发挥到最大。建立太阳能协同氢能利用的混合能源系统，利用电能-氢能之间的相互转换，可以改善太阳能不连续性、不稳定性对系统产生的不利影响。

总体来说，太阳能协同氢能利用的混合能源系统具有可缓解能源危机、环境友好、高效可靠等显著优点，具有极大的研究价值和意义^[6]。太阳能协同氢能利用的混合能源系统主要包括光热驱动热化学协同和光伏协同2种形式。

光热驱动热化学协同氢能利用系统通过光热转换产生热能，这些热能催动化石燃料分解产生氢气，PEMFC用这些氢气作为燃料发电满足用户端电需求^[7]。光热驱动热化学协同氢能利用的综合能源系统的能效比较高，技术较为成熟，且可以同时输出热能和电能，但是太阳能仅作为辅助能源参与度不高，仍需要化石燃料作为主要能源。

光伏协同氢能利用系统中太阳能通过光电转换产生电能，电能通过电解槽产生氢气，氢气作为燃料驱动PEMFC工作产生电能。在这个架构基础上国内外学者设计了多种光伏协同氢能利用的综合能

源系统，并通过智能算法等途径来优化运行策略和调控思路。刘畅等^[8]建立了一种由光伏发电装置、燃料电池/超级电容、电解池等组成的家居光伏/燃料电池混合发电系统，并对该系统进行了仿真，结果表明该混合发电系统可以满足普通家居用电需求。GHENAI等^[9]设计并分析了一种并网太阳能光伏/燃料电池发电系统，通过仿真和优化分析，提出的太阳能光伏/燃料电池混合动力系统有可再生能源占比高、能源成本低和低碳排放量等显著优点。DAS等^[10]将光伏发电、PEMFC及储氢结合搭建了光伏协同氢能利用系统，通过模拟仿真得出该系统的度电成本为0.501 93美元/kWh，且相较于柴油发电供电，系统排放减少了94%。光伏协同氢能利用系统模块化程度高，太阳能作为主要输入能源，更加低碳环保，是太阳能与氢能利用理想的协同方式，但是系统能效比相对较低，且不能匹配多重能量需求，有很大的改进空间。

太阳能光谱分频技术是将太阳能分为2个及以上的部分，根据每部分光能品位不同，采取不同的能量利用方式，通过光能品位与转化方式耦合，减小太阳能转化过程的不可逆损失，从而提高太阳能全光谱的转化效率。因此，引入光谱分频技术可以使系统能源输出类型多样化、高效化，从而有效地弥补光伏协同形式的不足。所以笔者在光伏协同氢能利用系统的基础上，将光谱分频技术与氢储能、质子交换膜燃料电池（PEMFC）相结合，提出了全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源架构，构建了新系统的动态模型，并且与现有光伏协同氢能利用系统进行了性能比较，确定了新系统在能效及温室气体减排方面的优势。分析了关键的容量配置（包括太阳能聚光面积和储热装置容量）对系统性能的影响规律，并完成了综合优化。

1 全光谱太阳能协同氢能利用的综合能源系统动态模型构建

1.1 系统架构

本文所设计的系统架构如图1所示。聚光太阳能经过分频膜后，分别在光伏电池和集热器上产生了热能和电能，热能可以直接供给用户端满足热负荷需求，多余的热能用储热模块存储；产生的电能供给用户端满足电需求，多余的电能经过PEM电

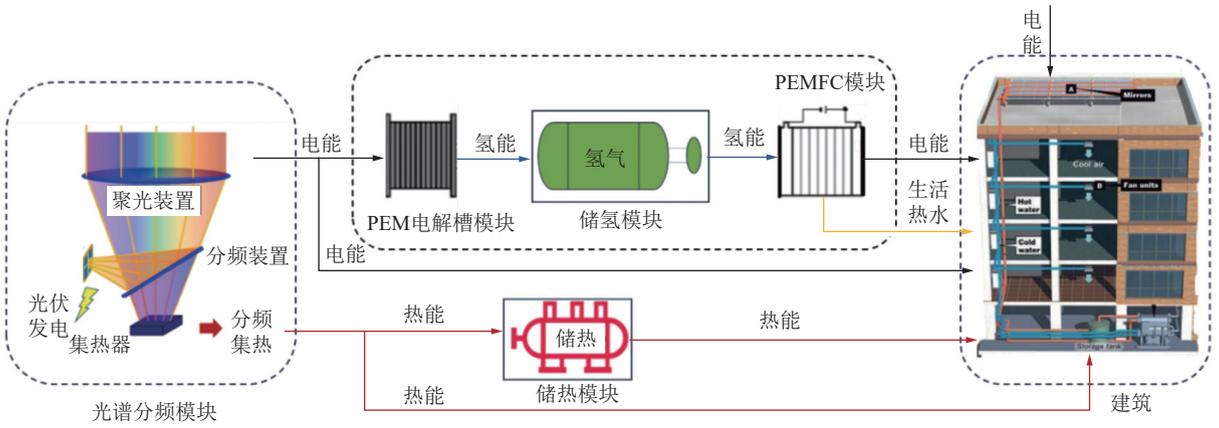


图1 全光谱太阳能协同氢能利用的综合能源系统设计示意

Fig. 1 Schematic diagram of integrated energy system for full-spectrum solar energy and hydrogen energy utilization

解模块产生氢气,产生的氢气通过储氢罐存储,可以作为PEMFC的燃料进行发电,燃料电池产生的电能可以作为用户端的电能补充,此外PEMFC额外会产生温度较低的热能(60~80℃),可以用来满足生活热水负荷。新系统一方面在源侧利用光谱分频提升了太阳能利用率,且同时输出热能和电能,与需求端更为匹配;同时系统在利用过程中,采用储热、储氢模块平抑了太阳能供能的波动,提升了系统供能的连续性和稳定性。

1.2 系统关键模块建模

系统的关键部件主要包括光谱分频、PEMFC以及PEM电解槽三大模块,下文分别对各个模块的建模过程进行介绍。

1.2.1 太阳能光谱分频

太阳能光谱分频模块本质是采用太阳能分频梯级利用方式,将太阳能分为2个及以上的部分,根据每部分光能品位不同,采取不同的能量利用方式,通过光能品位与转化方式耦合,减小太阳能转化过程的不可逆损失,从而提高太阳能全光谱的转化效率。太阳能全光谱光热综合利用,将太阳能高品位光能的光效应和低品位光能的热效应,作用于一个反应,以实现全光谱光能的高效利用^[11]。全光谱光热光伏接入形式中,波长范围在所选择光伏电池的响应光谱区间,光谱能量反射至光伏电池上,该波段的太阳能转换成电能。当光谱能量投射至集热管表面时,这部分太阳能转换成热能。分频光伏电池的能量平衡方程为

$$I_{DN}A_{cpv} = E_{cpv} + Q_{optloss} + Q_{heatloss} + Q_{diss} \quad (1)$$

式中: I_{DN} 为太阳直射辐照强度, W/m^2 ; A_{cpv} 为光伏聚光面积, m^2 ; E_{cpv} 为聚光光伏电池发电功率, W ; $Q_{optloss}$ 为聚光光学损失以及分频光学损失, W ; $Q_{heatloss}$ 为热损耗, W ; Q_{diss} 为光伏电池产生的余热热量, W 。

光伏电池产生的发电量表式为

$$E_{PV} = \eta_{col,CPV} S_{receive} \left[R_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{DN}(\lambda) \tau(\lambda) \eta_{cpv}(\lambda) + R_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{DN}(\lambda) \tau(\lambda) \eta_{cpv}(\lambda) \right] \quad (2)$$

式中: $\eta_{col,CPV}$ 为聚光器光学效率, %; λ 为光线波长, nm ; $S_{receive}$ 为聚光总面积, m^2 ; R_1 为分频膜占比, %; $\tau(\lambda)$ 为光透射效率, %; $\eta_{cpv}(\lambda)$ 为分光伏电池发电效率, %。根据文献[12]可知热电相应的比值,得到集热管接受到的中温集热量和余热热量,表达式为

$$Q_{tube} = E_{cpv} \alpha_1 \quad (3)$$

$$E_{diss} = E_{cpv} \alpha_2 \quad (4)$$

式中: α_1 和 α_2 为中温集热量、余热热量与光伏发电的比值,分别为2.26, 1.28。此时太阳能光谱分频模块输出的热量为这两部分的热量总和。

1.2.2 PEMFC

质子交换膜燃料电池的工作原理是基于水电解的逆反应,把化学能转化为电能的过程。在其工作原理中,电子从阳极到达阴极经由外电路形成电流,从燃料电池中获得电动势。然而,燃料电池在实际运行中会存在偏差造成某些不可逆损失,即极化过电压,从而导致燃料电池的实际电压输出会小于理论电动势。极化过电压主要有活化极化、欧姆极化、浓差极化3个类别^[13]。

质子交换膜燃料电池单电池输出电压的数学表达式为

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con} \quad (5)$$

式中: E_{Nernst} 为燃料电池理论输出电压, V ; η_{act} 为活化过电压, V ; η_{ohm} 为欧姆过电压, V ; η_{con} 为浓差过电压, V 。

PEMFC热力学电动势表示为

$$E_{Nernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T (\ln p_{H_2} + 0.15 \ln p_{O_2}) \quad (6)$$

式中： T 为燃料电池工作状态下的绝对温度，K； p_{H_2} 为阳极气体压力，kPa； p_{O_2} 为阴极气体压力，kPa。

根据巴特勒-沃尔默（Butler-Volmer）等式表示电流密度与电势之间的关系为

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{\text{Rd}} F (E - E_r)}{RT} \right] - \exp \left(\frac{\alpha_{\text{Ox}} F E_r}{RT} \right) \right\} \quad (7)$$

式中： i 为燃料电池的电流密度， A/cm^2 ； i_0 为燃料电池的电流交换密度， A/cm^2 ； α_{Rd} ， α_{Ox} 为与活化能有关的值，通常为0~1。

经过前人的不断尝试和改进，活化过电压可用经验公式^[14]估算：

$$\eta_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln c_{\text{O}_2} + \xi_4 T \ln i \quad (8)$$

式中： c_{O_2} 为氧气体积分数，%； ξ_1 ， ξ_2 ， ξ_3 ， ξ_4 为经验参数，其中 ξ_2 为质子交换膜有效活化面积 A 和氢气体积分数 c_{H_2} 有关的函数。

依据欧姆定律，欧姆过电压可以表示为

$$\eta_{\text{ohm}} = IR_{\text{ohm}} = I(R_{\text{elec}} + R_{\text{ionic}}) \quad (9)$$

式中： R_{ionic} 为电解质的离子阻抗， Ω ； R_{elec} 为流过外部电路的电子阻抗， Ω 。

当燃料电池内部产生电化学反应时，反应物的浓度会下降，由浓度原因引起的燃料电池性能差异会产生浓差损失。浓度过电压可表示为

$$\eta_{\text{conc}} = i(c_2 i / i_{\text{max}})^{c_3} \quad (10)$$

式中： c_2 ， c_3 ， i_{max} 为常数，通过试验测定。

1.2.3 PEM 电解槽

PEM 电解槽的工作电压 u_{cell} 可表示为开路电压 u_{ocv} 、活化过电压 u_{act} 、欧姆过电压 u_{ohm} 和浓差过电压 u_{con} 之和^[15]，即

$$u_{\text{cell}} = u_{\text{ocv}} + u_{\text{act}} + u_{\text{ohm}} + u_{\text{con}} \quad (11)$$

开路电压是电解水反应进行所需的基本电压，对应于2个电极上每个半反应的可逆电位之和。在实际系统中，由于电阻、物质转移等不可逆因素的影响，电解槽实际工作电压高于开路电压^[16]。可用水解反应的可逆电压和能斯特方程表示开路电压表示：

$$u_{\text{ocv}} = u_{\text{rev}} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{p_{\text{H}_2} (p_{\text{O}_2} \times 10^{-5})^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \quad (12)$$

式中： R 为理想气体常数； T 为电解槽工作温度， $^{\circ}\text{C}$ ； F 为法拉第常数； p_{H_2} 和 p_{O_2} 为反应产物氢气和氧气所占的气体分压，kPa。 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水在阴阳极室所占气体分压，设为100 kPa。

活化过电压由电化学极化产生，如下：

$$u_{\text{act}} = \frac{RT}{2\alpha_{\text{an}} F} a \sinh \left(\frac{i}{2i_{0,\text{an}}} \right) + \frac{RT}{2\alpha_{\text{ca}} F} a \sinh \left(\frac{i}{2i_{0,\text{ca}}} \right) \quad (13)$$

式中： α_{an} 和 α_{ca} 分别为阳极和阴极的电子传递系

数，通常可都取0.5。 i 为电解槽的电流密度， $i_{0,\text{an}}$ 、 $i_{0,\text{ca}}$ 为电解槽阳极和阴极的交换电流密度， A/cm^2 。

欧姆过电压的表述遵循欧姆定律，可以用如下公式表示：

$$u_{\text{ohm}} = (R_{\text{elec}} + R_{\text{mem}})i \quad (14)$$

式中： R_{elec} 为由电极等其他组件产生的电阻， Ω ； R_{mem} 为由质子交换膜对质子传输的阻碍作用产生的电阻， Ω ；忽略 R_{elec} 对极化电压带来的影响。

浓差过电压主要由电极中反应物的传质限制产生，可用如下公式^[17]表示：

$$u_{\text{con}} = -\frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_d} \right) \quad (15)$$

式中： n 为PEM电解槽数量； i_d 为极限扩散电流密度， A/cm^2 。

1.3 系统评价指标

常用的系统性能分析指标有能源利用率、一次能源节约率、二氧化碳减排率、温室气体减排量和烟效率等，本文选取的性能评价指标为能源利用率和温室气体减排量。

系统的能量输入由太阳能和电网补充的电能组成。供能系统的能源利用效率定义为系统产出冷量 Q_{cool} 、热量 Q_{hot} 、生活热水热量 Q_{hotwater} 以及净电量 Q_{ele} 总和与系统能源总输入的比值，那么整个系统的能源利用效率^[18]可以表示为

$$\eta_{\text{system}} = \frac{\int (Q_{\text{cool}} + Q_{\text{hot}} + Q_{\text{hotwater}} + Q_{\text{ele}}) dt}{Q_{\text{solar}} + E_{\text{elec}} / \eta_{\text{power}}} \quad (16)$$

式中： η_{power} 为燃煤电厂的发电效率，设定为35%；系统能源总输入为太阳能以及电网补充电能折算的一次能源输入量。

系统以太阳能和补充的电能作为驱动能源，系统的中间产物为氢气，这意味着系统产生的温室气体几乎为0。因此本文以燃煤电站作为辅助参考工具，计算了系统在运行期间的温室气体减排量^[19]，即

$$M_{\text{GHG}_{\text{reduction}}} = (E_{\text{equiv}} - E_{\text{elec}}) P_{\text{GHG}} \quad (17)$$

式中： E_{equiv} 为系统输出的总当量电力，是将系统输出的冷/热/电负荷统一折算为电量后的总和，kWh； E_{elec} 为电网补充的电量，kWh； P_{GHG} 为燃煤电厂单位发电量所排放的温室气体量， kg/kWh 。

2 系统的综合分析

2.1 新系统基础参数输入

本文选取华东某工业园区作为新系统的能源供应对象。具体地理位置为江苏省南京市，纬度和经度分别为 32.1° 和 118.9° 。园区全年逐时的电、冷、热、生活热水负荷需求如图2所示。根据地理位置，在Energy Plus网站上获取天气数据，南京市

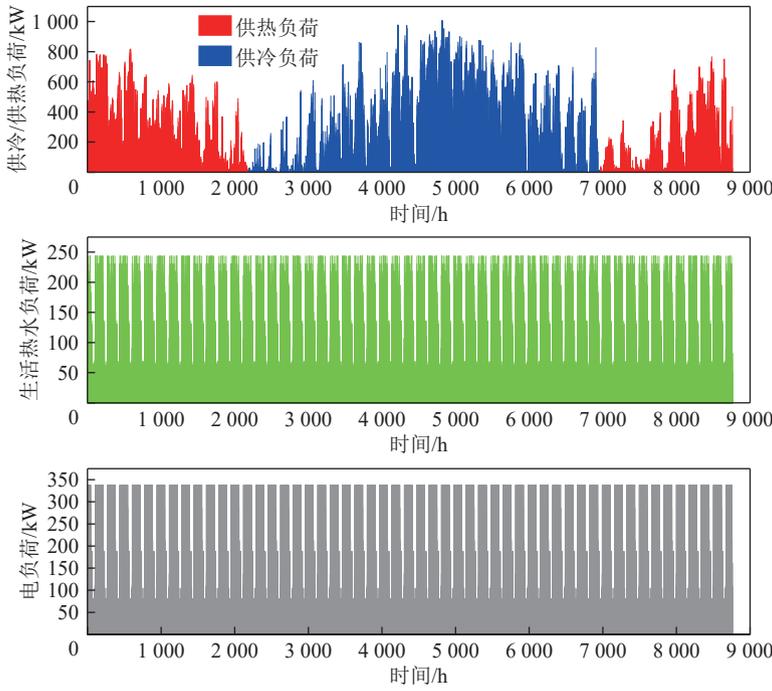


图2 用户端负荷需求

Fig. 2 Client load demand data

2022 年全年的 I_{DN} 和室外干球温度如图 3 所示。

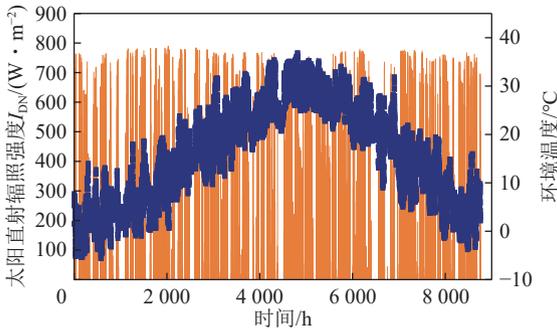


图3 全年逐时的太阳辐射强度及环境温度

Fig. 3 Hourly solar radiation intensity and ambient temperature throughout the year

为确保新系统的正常运行, 各个装置的设计参数依据典型日冷、热、电的最大负荷设定, 见表 1。太阳能聚光面积初始设定值为 $7\ 000\ m^2$; 设热能储存装置的容量为 $23\ 970\ kWh$, 等于储热装置内部传热油的整体质量与上下运行温度极限之差之积; 为了保证足够的储氢容量, 储氢装置容量的设定值比较大, 为 $112\ m^3$ 。

2.2 参比系统设计

为了更准确地评估所提出的全光谱协同氢能利用的综合能源系统, 本文选择了光伏协同氢能利用的混合能源系统作为参考系统进行比较。参考系统的基本架构如图 4 所示, 光伏发电产生的电能满足用户端满足电负荷需求, 多余的电能经过 PEM 电解槽产生氢气并且通过储氢模块存储, 作为 PEMFC

表 1 系统主要部件参数设定

Table 1 System main unit parameter setting

部件	设定容量或设定面积
太阳能聚光面积/ m^2	7 000
PEMFC功率/kW	500
PEM电解槽功率/kW	400
储氢装置容量/ m^3	112
储热装置容量/kWh	23 970

的燃料进行发电, 燃料电池产生的电能可以作为用户端的电能补充, 此外 PEMFC 产生温度较低的热能 ($60 \sim 80\ ^{\circ}C$), 可以用来满足生活热水负荷; 用户端所需的冷、热负荷需求, 通过电网输送的电能转换来满足。

为了保证 2 个系统对比的客观公平性, 设定了参比条件: 太阳能输入量相同; 用户端负荷需求相同; 系统能量转换装置容量和性能一致。

2.3 光谱分频窗口确定

采用全光谱光热光伏接入形式, 波长范围在所选择光伏电池的响应光谱区间, 光谱能量反射至光伏电池上, 全光谱太阳能转换成电能; 当光谱能量投射至集热管表面时, 全光谱太阳能转换成热能^[20]。但是不同部分的波段分配需要进一步量化确认, 本节对此展开研究。以额定辐照 ($AM1.5\ 1\ 000\ W/m^2$) 下光伏光热综合产出最大为目标, 确认分频窗口, 具体综合产出计算公式为式 (18)。全光谱太阳能

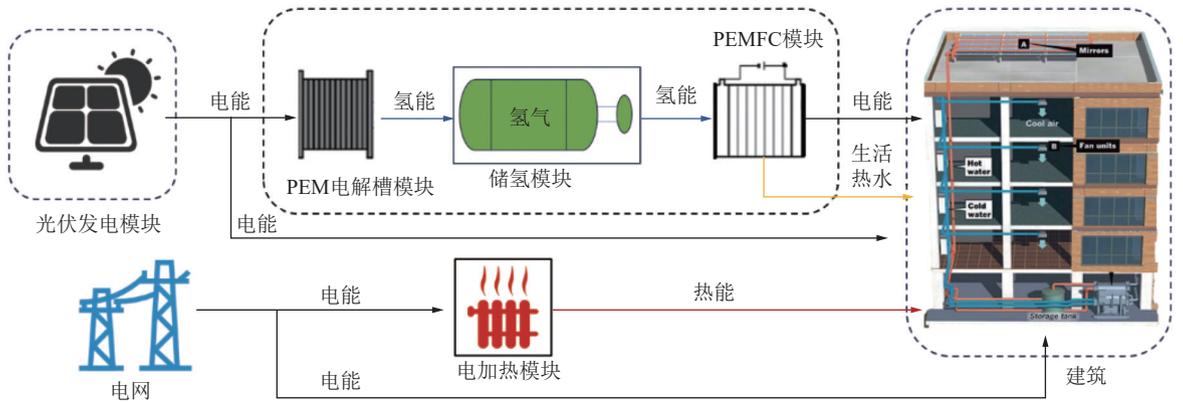


图4 光伏协同氢能利用的混合能源系统架构

Fig. 4 Architecture diagram of photovoltaic synergistic hydrogen energy utilization hybrid energy system

的综合产出包含2部分：一部分是光伏的发电产出，另一部分是光热折合为电的输出（电加热的性能系数 $COP_h=4.0$ ）。

$$E_{total} = E_{PV} + E_{PT-E} = f_1(\lambda_1, \lambda_2)$$

$$E_{PT-E} = \frac{E_{PT}}{COP_h} \quad (18)$$

式中： E_{total} 为全光谱太阳能的等效电力输出， W/m^2 ； E_{PV} 为光伏产生的电输出量， W/m^2 ； E_{PT-E} 为光热折算的电输出， W/m^2 ； λ_1 和 λ_2 为分频窗口的2个波长边界，nm。

全光谱太阳能的等效电力输出 E_{total} 随 λ_1 和 λ_2 的变化规律如图5所示，当初始波长 λ_1 为700 nm时，等效电力输出 E_{total} 随末波长 λ_2 的增加，总体呈现先增加再减小的趋势，当 λ_2 为1100 nm时， E_{total} 出现了峰值且达到了全波段的最大值。即在700~1100 nm这个分频波段下全光谱太阳能的总输出能量达到最大，所以将这个波段设置为新系统光谱分频模块的分频窗口。

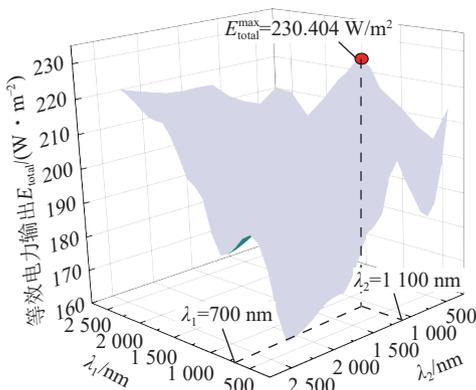


图5 光谱分频波长与太阳能等效电力输出的关系

Fig. 5 Relationship between spectral frequency division window and solar equivalent power output

2.4 性能对比结果

基于基础参数输入，在给定的参比条件下，对

建立的全光谱太阳能协同氢能利用和传统光伏协同氢能利用2个系统进行模拟仿真，计算全年的性能参数，得到的结果见表2。

表2 全年性能参数计算结果

Table 2 Results of annual performance parameters

系统	能源利用率/%	温室气体减排量/kg	电网补电量/kWh	太阳能输入量/kWh
传统光伏协同	20.66	637 440	3 503 200	8 164 700
全光谱太阳能协同	31.09	1 293 100	1 506 600	8 164 700

从表2中可以看出，全光谱太阳能协同氢能利用系统较传统光伏协同氢能利用系统全年能源利用率高了10.43%，全年的温室气体减排量提升了655 660 kg，具有高效环保的优势。因为采用全光谱太阳能的接入方式，太阳能利用效率更高，且可以产生热能满足用户端热负荷需求，不需要额外消耗能量，所以在输出能源不变的情况下，减少了电网的补电量，系统的整体能源利用率升高，同时也减少了因为电网额外供电被动产生的温室气体。

本文将一年分为夏季、过渡季和冬季，在全年动态模型的基础上，针对3个不同季节，选取了3个典型周^[20]，时间分别为1月1日—1月7日，4月1日—4月7日，7月1日—7月7日，计算典型日的性能指标，得到的结果见表3。

表3 典型日性能指标计算结果

Table 3 Results of performance index of typical days

系统	能源利用率/%			温室气体减排量/kg		
	夏季	过渡季	冬季	夏季	过渡季	冬季
传统系统	66.53	23.97	32.29	6 818	6 671	9 220
新系统	69.19	25.47	41.09	8 398	10 723	29 014

从表3中可以看出，全光谱太阳能协同氢能

利用系统较传统光伏协同氢能利用系统的能源利用率在3个典型周分别高了2.66%、1.5%、8.8%，温室气体减排量在3个典型周分别增加了1 580 kg，4 045 kg，19 794 kg，侧面印证了新系统在全年不同阶段的优越性。

2.5 系统性能的影响因素

全光谱太阳能协同氢能利用系统包含多个模块，其系统性能受各模块运行参数影响，包括太阳能聚光面积、PEMFC型号、PEM电解槽型号、储热容量和储氢容量等。由于在设计系统中，根据负荷已经确定了PEMFC容量、PEM电解槽容量和储氢容量，所以本文以过渡季典型周为例，主要探究了太阳能聚光面积和储热装置容量对新系统性能的影响规律。

2.5.1 太阳能聚光面积对系统性能的影响

新系统的能量利用率 η_{system} 随太阳能聚光面积的变化如图6所示。可以发现，当太阳能聚光面积从0增加到6 000 m²时，系统的能量利用率不断提升。这主要是因为这个阶段太阳能输入较少，电网补电占系统直接供能的比例较大，系统为电驱动模式，随着太阳能聚光面积增加，太阳能输入增加量增加，使得电网补电量减少，而全光谱太阳能的能量利用效率高于电厂的发电效率，从而总体上系统的能量利用率提高；当太阳能聚光面积为6 000 m²到12 000 m²时，此时系统能效呈缓慢降低或升高的趋势，这主要是因为系统的储热装置起到了延时调控的作用，储热装置可以将盈余的部分光热储存起来，然后在太阳能不足的时间段为系统提供热能，减少了额外的补电量，有益于系统的能量利用；当太阳能聚光面积大于12 000 m²时，太阳能输入过量，能源过量溢出的情况加重，对系统能效造成负面影响，而且也会增加系统的经济成本。

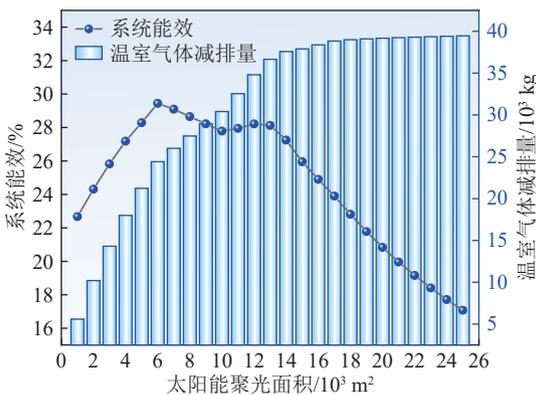


图6 太阳能聚光面积对系统性能的影响

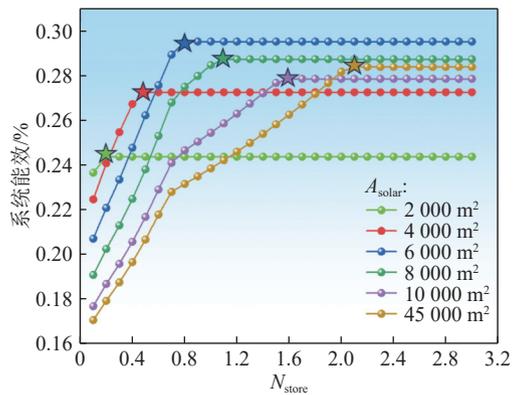
Fig. 6 Influence of solar concentrating area on system performance

从图6也可以发现太阳能聚光面积对于系统的

环保性能的影响规律。当太阳能聚光面积从0增加到12 000 m²时，新系统的温室气体减排量不断增加，这是由于太阳能总输入增加，清洁能源占系统供能比例不断增加，电网补电量减少，使得系统温室气体减排量也增加；当太阳能聚光面积大于12 000 m²时，随着太阳能聚光面积增加，温室气体减排量的上升趋势不断放缓并最终趋于平缓，这是由于系统的太阳能输入量逐渐饱和，增加太阳能输入量对于电网补电量的影响程度不断降低，所以新系统温室气体减排量的增加幅度逐渐不明显。

2.5.2 储热容量对系统性能的影响

本文探究了在不同太阳能聚光面积(A_{solar})下，储热容量对系统性能的影响规律。用储热容量比 N_{store} ，即储热能力与平均日系统接收太阳辐照能量的比值，来表示储热能力的大小。通过图7我们可以发现，不论太阳能聚光面积如何变化，随着储热容量的逐渐增加，系统的能量利用率也会逐渐提高，最终到达一个阈值。逐渐提高是因为随着储热容量的增加，储热装置可以存储更多盈余的太阳能光热，然后在热能不够供给给用户端时满足热负荷需求，其调度能力提高，更大程度上减少了电网的额外补电量，起到了提升能效的作用；到达一个阈值是因为在太阳能输入量一定的情况下，此时的储热容量已经足够容纳盈余的太阳能光热，继续提高储热容量对于提升系统性能已没有效果，只会增加系统经济成本。所以对于已经给定太阳能聚光面积的全光谱系统，我们可以找到一个最佳工况点，使得其系统能效达到最佳。所以在设定系统太阳能聚光面积为6 000 m²的情况下，系统的储热容量比 N_{store} 为0.9时，系统的能效达到最大为29.53%，比初始设定下系统的能效高3.56%。



注: ☆指不同太阳能聚光面积下,储热装置的最佳储热容量比位置。

图7 不同太阳能聚光面积下储热容量比对系统性能的影响
Fig. 7 Influence of heat storage capacity on system performance under different solar concentrating areas

2.5.3 容量配置优化

通过对比不同太阳能聚光面积下储热容量比对系统性能的影响,我们可以发现太阳能聚光面积越大,储热容量比对系统性能的影响越明显,且最佳工况点对应的储热容量比越大,如图8所示。这是因为在太阳辐照强度一定的情况下,太阳能聚光面积越大,太阳能输入量越多,光热产生的热量越多,在满足用户热负荷需求后,盈余的热量越多,储热容量比越大,其可以调度的热量也就越多,储热装置起到的延时调控效果就越明显,而且需要匹配到更大的储热容量比,能效才能达到阈值,即达到最佳工况点。最后在不同太阳能聚光面积对应的最佳工况点中,再考虑最高系统能效,可以确定出新系统的最佳容量配置为 $A_{\text{solar}} = 6\ 000\text{m}^2$, $N_{\text{store}} = 0.9$ 。

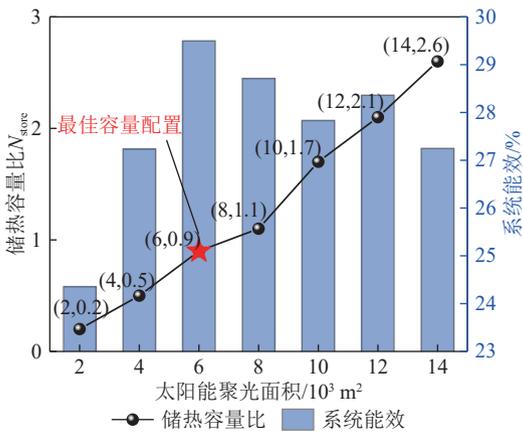


图8 最佳工况下的容量配置

Fig. 8 Capacity configuration diagram under optimal conditions

3 结论

1) 综合考虑光谱分频、PEMFC、PEM电解槽以及储能各个模块相互间的匹配耦合,构建了全光谱太阳能协同氢能利用的综合能源系统的动态模型,确立了本系统的最佳光谱分频窗口为 $700 \sim 1\ 100\text{nm}$ 。

2) 选取传统光伏协同氢能利用系统作为参比系统,同时开展模拟仿真,对比发现新系统的全年能量利用率较参比系统提升了10.43%,全年温室气体减排量提升了655 660 kg,充分体现了新系统在性能方面的优越性。

3) 探究了太阳能聚光面积及储热容量比对系统能效的影响规律,发现在用户端冷热电负荷数据输入确定的情况下,综合考虑性能和经济成本,新系统的最佳容量配置为太阳能聚光面积 $A_{\text{solar}} = 6\ 000\text{m}^2$,储热装置容量 $N_{\text{store}} = 0.9$ 。

参考文献 (References):

- [1] 王慧钧,王庆德. 聚焦“双碳”战略推进我国数据中心绿色高质量发展[J]. 产业创新研究, 2022(3): 5-7.
WANG Huijun, WANG Qingde. Focus on the “double carbon” strategy to promote the green and high-quality development of China’s data centers[J]. Industrial Innovation, 2022(3): 5-7.
- [2] 刘宇雄. 光储型直流微电网稳定性分析及试验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LIU Yuxiong. Stability analysis and experimental study of optical storage DC microgrid[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [3] 姚春妮,刘幼农,马欣伯. 氢能解决建筑用能的初步探索与研究分析[J]. 建设科技, 2020(15): 21-24.
YAO Chunni, LIU Younong, MA Nboma. Preliminary exploration and research analysis of hydrogen energy to solve for building energy utilization[J]. Construction Science and Technology, 2020(15): 21-24.
- [4] 彭元亭,徐增师. 船用氢燃料电池推进技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 18-21.
PENG Yuanqing, XU Zengshi. Development of hydrogen fuel cell propulsion technology for ships[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 18-21.
- [5] 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [6] 李炜. 独立的太阳能燃料电池联合发电系统的协调控制设计与仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
LI Wei. Research on coordinated control design and simulation of independent solar fuel cell combined power generation system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [7] CHEN X, LONG S C, WANG C X, et al. Comprehensive assessment on a hybrid PEMFC multi-generation system integrated with solar-assisted methane cracking[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(37): 14025-14037.
- [8] 刘畅,陈启卷,陈桂月,等. 光伏-燃料电池混合发电系统建模与仿真[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3113-3119.
LIU Chang, CHEN Qijuan, CHEN Guiyue, et al. Modeling and simulation of pv-fuel cell hybrid power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3113-3119.
- [9] GHENAI C, BETTAYEB M. Grid-tied solar PV/fuel cell hybrid power system for university building[J]. Energy Procedia, 2019, 159: 96-103.
- [10] DAS V, KARUPPANAN P, SINGH A K, et al. Optimal sizing and control of solar PV-PEMFC hybrid power systems[J]. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 2021, 6(4): 1137-1156.
- [11] 方娟. 太阳能全光谱光/热化学制燃料能量转化机理与方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
FANG Juan. Energy conversion mechanism and method of solar full-spectrum photo/ thermochemical fuel [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [12] AICHMAYER L, SPELLING J, LAUMERT B. Thermoeconomic analysis of a solar dish micro gas-turbine combined-cycle power

- plant[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 1089–1099.
- [13] 彭湃, 程汉湘, 陈杏灿, 等. 质子交换膜燃料电池的数学模型及其仿真研究 [J]. *电源技术*, 2017, 41(3): 399–402.
PENG Pai, CHENG Hanxiang, CHEN Xingcan, et al. Mathematical model and simulation study of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(3): 399–402.
- [14] 张鉴, 华青松, 郑莉莉, 等. 质子交换膜燃料电池建模综述 [J]. *电源技术*, 2019, 43(6): 1051–1053, 1082.
ZHANG Jian, HUA Qingsong, ZHENG Lili, et al. Review of modeling of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(6): 1051–1053, 1082.
- [15] FALCÃO D S, PINTO A M F R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121184.
- [16] GARCÍA-VALVERDE R, ESPINOSA N, URBINA A. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(2): 1927–1938.
- [17] AY M, MIDILLI A, DINCER I. Exergetic performance analysis of a PEM fuel cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2006, 30(5): 307–321.
- [18] LIBO C B D L Y. Performance comparative study of SOFC-MGT-CCHP system coupled with solar energy under different operating strategies [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021: 1–14.
- [19] CHEN X, ZHOU H W, LI W B, et al. Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 160: 384–395.
- [20] 邢晨健, 王瑞林, 赵传文. 燃煤电站与光伏余热辅助胺法脱碳系统集成 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 170–179.
XING Chenjian, WANG Ruilin, ZHAO Chuanwen. Integration of coal-fired power station and photovoltaic waste heat assisted amine decarbonization system[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 170–179.