



光伏发电-质子交换膜电解水耦合制氢系统动态性能研究

徐珊珊¹, 朱国金¹, 齐志诚¹, 李心怡², 李查德¹, 沈佳超¹, 豆丙乾¹, 王秀红¹, 焦泽林¹,
张茜², 王凯晨², 徐超^{2*}

(¹中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 102206; ²华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 在“双碳”目标和可再生能源消纳需求推动下, 光伏(PV)直接耦合质子交换膜电解水(PEMWE)制氢是绿氢生产与长周期储能的重要技术路径。针对光伏输出波动导致的功率匹配不足和PEMWE电-热动态响应问题, 本文基于光伏工程模型和已验证的PEMWE电-热耦合模型, 构建了PV-PEMWE耦合系统和含Boost变换器及电导增量法MPPT控制的间接耦合系统, 比较了辐照阶跃、进水流量和进水温度对系统动态性能的影响, 并从能量传输效率、电压、温度、制氢效率、系统效率和产氢速率等方面对两种耦合方式进行了对比分析。结果表明, 间接耦合系统能够更充分捕获光伏最大功率, 使能量传输效率较直接耦合提高约1.5%~5%, 产氢速率提高约6%; 在辐照波动工况下, 间接耦合能够改善光伏与PEMWE之间的动态功率匹配, 减弱光伏输出扰动对电解槽运行状态的直接影响, 表现出更好的运行稳定性。进水流量增大可增强散热能力, 降低温升、电压超调和热平衡时间; 进水温度升高有助于改善电解反应动力学, 提高制氢效率和系统效率。研究结果表明, 间接耦合模式在复杂气象波动条件下具有更优的功率匹配能力和动态稳定性, 可为光伏制氢系统架构选择、参数优化和稳定运行提供参考。

关键词: 光伏发电; 质子交换膜电解水; 耦合制氢; 动态仿真

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0577

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-13

Dynamic Performance Study of a Photovoltaic Power Generation~Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Coupled Hydrogen Production System

XU Shanshan¹, ZHU Guojin¹, QI Zhicheng¹, LI Xinyi², LI Chade¹, SHEN Jiachao¹, DOU Bingqian¹, WANG Xiuhong¹, JIAO Zelin¹, ZHANG Qian², WANG Kaichen², XU Chao^{2*}

(¹PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 102206, China; ²School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Driven by the "dual carbon" goals and the demand for renewable energy consumption, the direct coupling of photovoltaic (PV) power generation with proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) for hydrogen production represents an important technical pathway for green hydrogen production and long-duration energy storage. To

收稿日期: 2026-07-03; 修改稿日期: 2026-09-04。

基金项目: 中央企业绿色氢能制储运创新联合体-联合攻关重点任务7及中国电建集团有限公司科技项目(DJ-HXGG-2024-05)

第一作者: 徐珊珊(1982—), 女, 硕士研究生, 正高级工程师, 研究方向为电氢耦合, xuss@bjy.powerchina.cn; 通信作者: 徐超, 教授, 研究方向为电解水制氢、太阳能热利用等, mechxu@ncepu.edu.cn。

引用本文: 徐珊珊, 朱国金, 齐志诚, 等. 光伏发电-质子交换膜电解水耦合制氢系统动态性能研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.

Citation: XU Shanshan, ZHU Guojin, QI Zhicheng, et al. Dynamic Performance Study of a Photovoltaic Power Generation~Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Coupled Hydrogen Production System[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

address the insufficient power matching caused by fluctuations in PV output and the electro-thermal dynamic response of PEMWE, this study establishes a PV-PEMWE coupled system and an indirect coupling system incorporating a Boost converter and incremental conductance maximum power point tracking (MPPT) control, based on a PV engineering model and a validated PEMWE electro-thermal coupling model. The effects of irradiance step changes, inlet water flow rate, and inlet water temperature on the dynamic performance of the system are compared. The two coupling modes are further compared in terms of energy transfer efficiency, voltage, temperature, hydrogen production efficiency, system efficiency, and hydrogen production rate. The results show that the indirect coupling system can more fully capture the maximum PV power, increasing energy transfer efficiency by approximately 1.5%~5% and improving the hydrogen production rate by about 6% compared with the direct coupling system. Under fluctuating irradiance conditions, the indirect coupling system improves the dynamic power matching between the PV array and PEMWE, mitigates the direct impact of PV output fluctuations on electrolyzer operation, and thereby exhibits better operational stability. Increasing the inlet water flow rate enhances heat dissipation capacity, reduces temperature rise, voltage overshoot, and the time required to reach thermal equilibrium. Increasing the inlet water temperature helps improve electrolysis reaction kinetics and enhances both hydrogen production efficiency and overall system efficiency. The results indicate that the indirect coupling mode exhibits superior power matching capability and dynamic stability under complex meteorological fluctuation conditions, providing a reference for system architecture selection, parameter optimization, and stable operation of photovoltaic hydrogen production systems.

Keywords: photovoltaic power generation; proton exchange membrane water electrolysis; coupled hydrogen production; dynamic simulation

氢能兼具高能量密度、清洁转化和跨时间尺度储能潜力,是构建清洁低碳、安全高效能源体系的重要载体。现阶段工业用氢仍主要来源于化石能源重整或煤气化,生产过程伴随较高碳排放。以可再生能源电力驱动电解水制取的绿氢可显著降低制氢环节碳排放,并为风电、光伏等波动电源提供可调负荷与化学储能出口。随着我国可再生能源装机规模持续扩大,绿电制氢在新能源消纳、工业深度脱碳和储能系统构建中的作用日益突出^[1]。

在多种电解水技术路线中,质子交换膜电解水(PEMWE)具有电流密度高、结构紧凑、启停响应快、产氢纯度高和气体交叉风险低等优势,尤其适于与太阳能、风能等波动性可再生能源耦合^[2-3]。与碱性电解水相比,PEMWE的固体聚合物电解质兼具质子传导和气体隔离功能,可在较宽功率范围内快速跟踪输入电力变化。与高温固体氧化物电解相比,PEMWE运行温度较低、系统集成难度相对

较小。因此,光伏发电与PEMWE耦合被认为是绿氢制备的重要实现方式。

然而,光伏输出受辐照强度和环境温度影响显著,具有间歇性和快速波动性。PEMWE内部又存在电化学反应、质量传递和热平衡之间的非线性耦合,输入功率变化会引起电压超调、温度滞后、效率波动和产氢速率变化。若光伏阵列与电解槽直接连接,系统工作点由光伏I-V曲线和电解槽伏安特性交点决定,容易偏离光伏最大功率点和电解槽较优运行区间。若通过DC-DC变换器和MPPT控制间接耦合,则可改善功率匹配,但也引入动态控制、变换损耗和更高的系统复杂度。

围绕PEMWE建模,现有研究已从稳态极化描述逐渐转向瞬态电化学响应刻画。He等^[4]提出包含多时间尺度和多阶段特征的PEM电解槽等效电路模型,通过双电层电容与阻抗元件描述电流突变时的电压暂态过程,为解释电压过冲和功率跟踪滞后

提供了电学模型基础。Khan等^[9]进一步将电解槽多物理过程与变换器动态运行相结合,分析了功率电子接口波动对过电位组成和系统响应的影响,说明在可再生能源耦合场景下,仅采用稳态极化曲线难以反映PEMWE的实际动态行为。在电-热耦合方面,Engel等^[6]建立了一维PEM电解槽动态多物理场模型,将电化学反应、欧姆热、物质传输和热平衡过程耦合起来,用于描述启动和变载过程中的温度演化。Asiabani等^[7]则面向大规模电力系统集成建立了PEM电解槽动态数学模型,强调电解槽参与可再生能源消纳和电网功率调节时的功率跟踪特性。Espinosa等^[8]通过46 kW高压PEM电解槽实验验证了半经验电化学模型与集总热模型的适用性,为系统级动态仿真提供了可借鉴的模型框架。上述研究表明,热惯性和电化学损失之间的耦合是影响电解槽动态稳定性的关键因素。

在光伏侧建模方面,工程简化模型和温度修正模型被广泛用于系统级仿真。廖等人^[9]提出了任意光强和温度下硅太阳能电池的非线性工程简化模型,可利用组件铭牌参数快速计算不同气象条件下的I-V和P-V特性。Skoplaki等人^[10]系统总结了光伏组件电性能对温度的依赖关系,指出环境温度、对流散热和组件工作温度会共同影响最大功率输出。相关研究为本文在PV-PEMWE耦合系统中引入辐照强度和环境温度修正提供了模型依据。

在光伏制氢系统耦合方面,Gallardo等^[11]针对离网PV-PEM系统开展容量匹配分析,强调光伏阵列与电解槽额定功率配置对全年制氢量和系统利用率的重要影响。Ding等^[12]研究了风光波动电源驱动下PEM电解水制氢系统的开发与应用,指出波动输入会直接影响电解槽电流、电压和产氢过程。Zheng等^[13]构建太阳能驱动的多联产系统并耦合氢储能与热储能,分析了太阳能波动输入下系统能量流的动态响应。这类研究证明了光伏/太阳能制氢系统的工程价值,但更多关注系统能量配置或总体响应,对电解槽内部电-热反馈和耦合方式差异的讨论仍不充分。在控制策略方面,Makhsoos等^[14]从能量管理角度提出非线性优化方法,用于协调太阳能波动输入与模块化PEM电解槽负载。Hüner^[15]建立了光伏辅助PEM水电解系统数学模型,比较了光伏工作温度、PEMWE运行温度和膜厚度等参数对制氢性能的影响。这些工作为引入DC-DC变

换器和MPPT控制提供了基础,但直接耦合与间接耦合在相同PV-PEMWE动态模型下的效率、温度、电压和产氢速率对比仍有进一步深化空间。

综合来看,已有研究为PEMWE动态建模、光伏输出特性表征以及PV-PEMWE系统控制奠定了重要基础,但仍存在两方面不足:一是部分模型对PEMWE电学与热学反馈耦合简化较多,难以解释波动输入下电压超调、温升滞后和效率变化之间的相互作用。二是针对直接耦合和间接耦合模式的多工况对比仍不充分,尤其缺少辐照阶跃、进水流量和进水温度对两种耦合模式效率、稳定性与产氢性能影响的综合分析。基于此,本文在光伏工程模型和经实验验证的PEMWE电-热耦合动态模型基础上,构建PV-PEMWE直接耦合与间接耦合系统,重点研究光伏输入波动和运行参数对系统动态性能的影响,为光伏制氢系统架构选择与工程运行优化提供依据。

1 系统模型与仿真方法

1.1 光伏系统模型

光伏电池的物理性质类似于PN结二极管,等效电路如图1所示:

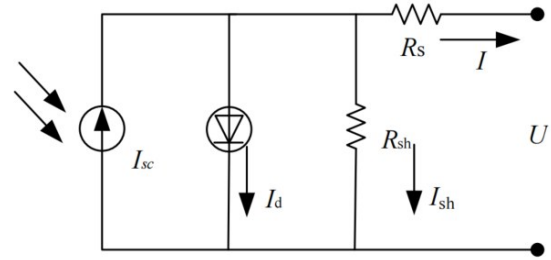


图1 光伏电池的等效电路

Fig. 1 Equivalent Circuit of a Photovoltaic Cell

数值模型为:

$$I = I_{sc} - I_{sh} - I_d \quad (1)$$

式中: I_{sc} 是光生电流, I_{sh} 为等效并联电阻电流, I_d 是等效二极管暗电流; 其中等效二极管暗电流的计算公式如下:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qE}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

式中: I_0 是等效二极管反向饱和电流; q 是单个电子所含的电荷量; E 为PN结两端的电压; A 是光伏电池的理想因数; K 是玻尔兹曼常数, 取 1.38×10^{-23} ; T 是光伏电池环境温度。

而 I_0 可以由下式计算得到:

$$I_0 = I_{or} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式中: I_{or} 是参考温度 T_{ref} 下的二极管反向饱和电流; T_{ref} 是参考工况下的环境温度; E_g 是半导体材料的禁带宽度; n 为二极管理想品质因子。

I_{sh} 可由下式得出:

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

故光伏电池输出电流可由下式得出:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

式中: V 、 I 分别为光伏电池输出电压与电流; R_{sh} 、 R_s 分别为分流电阻与寄生电阻。

然而上述理论模型中的参数随着外部环境条件而变化, 不利于仿真计算。因此文献^[9]做出两点假设: 1) R_s 很小可忽略不计; 2) R_{sh} 趋近于无穷大。

此时流过 R_{sh} 的电流 I_{sh} 约等于 0, R_s 阻值很小可认为是导线, 在标准条件 (辐照强度 $S=1000 \text{ W/m}^2$, 光伏电池温度 $T=25^\circ\text{C}$) 下时, 基于此光伏电池等效电路建立光伏电池工程模型如下:

$$I = I_{sc} \left(1 - c_1 \left(\exp \left(\frac{U}{c_2 U_{oc}} \right) - 1 \right) \right) \quad (6)$$

$$c_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-U_m}{c_2 U_{oc}} \right) \quad (7)$$

$$c_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left(\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right)^{-1} \quad (8)$$

式中: U_m 、 I_m 分别为 MPPT 对应的电压与电流; U_{oc} 为开路电压; 在实际工况下, U_m 、 I_m 、 U_{oc} 、 I_{sc} 的计算方法如下:

$$\Delta T = (T_{air} + kS) - T_{ref} \quad (9)$$

$$U_{oc} = U'_{oc} (1 - c\Delta T) (1 + b\Delta T) \quad (10)$$

$$U_m = U'_m (1 - c\Delta T) (1 + b\Delta T) \quad (11)$$

$$I_{sc} = I'_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (12)$$

$$I'_m = I'_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (13)$$

式中: T_{air} 是环境温度; k 是太阳能电池的温度系数; S 是实际工况下的辐照强度; U'_m 是参考工况下的 MPP 电压; I'_m 是参考工况下的 MPP 电流; U'_{oc} 是参考工况下的开路电压; I'_{sc} 是参考工况下的光生电流; S_{ref} 是参考工况下的辐照强度; a 是常系数, 这里取 0.0025; b 是常系数, 这里取 0.5; c 是常系数, 这里取 0.00288;

根据上述工程模型, 可在 MATLAB/Simulink 中实现光伏电池的可视化模型的建立, 模型如图 2 所示。

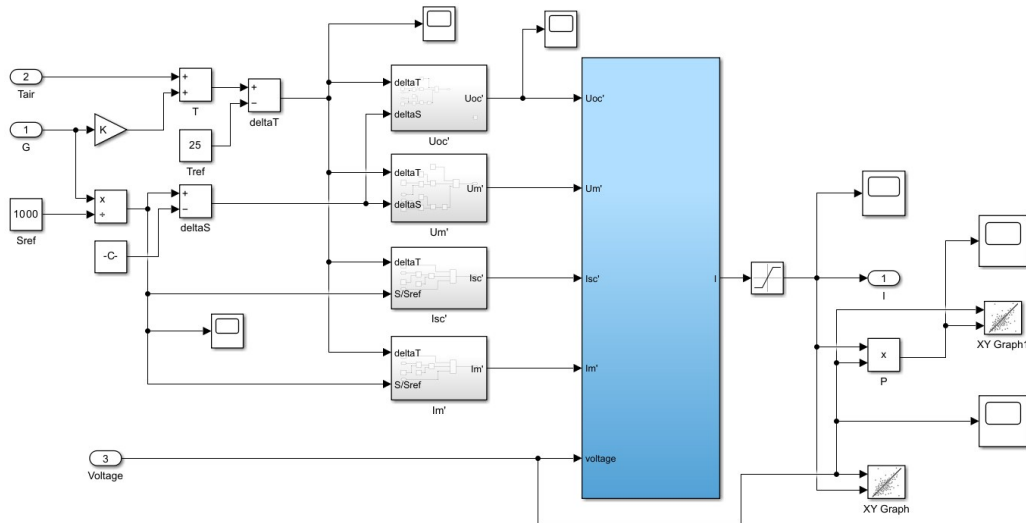


图 2 光伏电池工程模型示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of a Photovoltaic Cell Engineering Model

在本文中采用参考的光伏电池型号为 LR7-72HYD-635M, 基本参数如表 1:

1.2 PEMWE 电-热耦合模型

PEMWE 系统的动态响应涉及电化学反应、气

体生成、物质传输和热量积累等多个过程。在光伏波动输入条件下, 电解槽工作电流会随光伏输出功率变化而快速波动, 进而引起电压超调、产氢速率变化和堆温滞后响应。因此, 为准确描述 PV-

表1 光伏组件的电性能参数
Table 1 Electrical Performance Parameters of Photovoltaic Modules

运行参数	数值
最大功率 ($P_{\max}/W$)	635
开路电压 (U_{oc}/V)	53.5
短路电流 (I_{sc}/A)	15.21
峰值功率电压 (U_{mmp}/V)	44.36
峰值功率电流 (I_{mmp}/A)	14.32

PEMWE 耦合系统的动态运行特性, 本文 PEMWE 侧采用作者前期建立并经实验验证的电-热耦合动态模型^[16]。该模型由电化学子模型、质量平衡子模型和热力学子模型组成: 电化学子模型用于描述可逆电压、活化过电位、欧姆过电位、浓差过电位及双电层电容引起的电压瞬态响应; 质量平衡子模型用于计算水消耗、氧气生成和氢气生成速率; 热力学子模型基于集总热容法, 描述电解反应产热、进出口物料换热及环境散热共同作用下的堆温动态变化。

为便于说明 PEMWE 模型中电化学与热过程之间的主要耦合关系, 本文给出决定其电压和温度动态响应的核心控制方程。PEMWE 单电池电压由可逆电压及各类极化损失共同决定, 可表示为:

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + U_{\text{act}} + U_{\text{ohm}} + U_{\text{conc}} \quad (14)$$

式中: U_{cell} 为单电池电压; U_{rev} 为可逆电压; U_{act} 、 U_{ohm} 和 U_{conc} 分别为活化过电位、欧姆过电位和浓差过电位。各电压分项的具体计算方法见文献^[16]。

在热力学子模型中, 采用集总热容法描述电解槽内部热量积累, 其总体能量平衡可表示为:

$$C_{\text{th}} \frac{dT_{\text{cell}}}{dt} = Q_{\text{gen}} + Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}} - Q_{\text{out}} \quad (15)$$

式中: C_{th} 是电解槽的等效热容; T_{cell} 代表电解槽整体的平均温度; Q_{gen} 为电化学反应与电压损失引起的净产热量; Q_{in} 为入口流体带入电解池的热量; Q_{loss} 为电解槽与环境之间的散热损失; Q_{out} 为各类出口物料所带走的热量。

电解槽内部净产热量由实际工作电压和热中性电压之间的差值决定, 可表示为:

$$Q_{\text{gen}} = I(U_{\text{cell}} - U_{\text{tn}}) \quad (16)$$

式中, U_{tn} 为热中性电压。当 $U_{\text{cell}} > U_{\text{tn}}$ 时 $Q_{\text{gen}} > 0$, 反之则表现为吸热。

入口和出口物料携带的热量分别为:

$$Q_{\text{in}} = \sum_k \dot{m}_{\text{in},k} c_{p,k} T_{\text{in}} \quad (17)$$

$$Q_{\text{out}} = \sum_k \dot{m}_{\text{out},k} c_{p,k} T_{\text{out}} \quad (18)$$

式中: $\dot{m}_{\text{in},k}$ 和 $\dot{m}_{\text{out},k}$ 分别为物料 k 的入口和出口质量流量, T_{in} 和 T_{out} 为对应温度。采用平均温度 T_{cell} 表征槽体工作温度, 并假设流体温度沿流动方向近似线性变化, 因此 $T_{\text{out}} = 2T_{\text{cell}} - T_{\text{in}}$ 。

电解槽向周围环境的散热采用等效热阻法描述:

$$Q_{\text{loss}} = \frac{T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{th}}} \quad (19)$$

式中: T_{amb} 为环境温度, R_{th} 为电解槽与周围环境之间的等效热阻。上述核心方程用于表征 PEMWE 的主要电压和温度动态特性, 其余控制方程、参数取值及模型假设详见文献^[16]。文献^[16]已通过极化曲线和阶跃电流工况下的电压、温度响应对该模型进行了实验验证, 结果表明该模型能够较好地复现 PEMWE 在动态负载下的电压超调和温度滞后特性。因此, 本文在此基础上将该 PEMWE 电-热耦合模型作为光伏制氢系统的负载模型, 进一步构建 PV-PEMWE 直接耦合与间接耦合系统, 并重点分析不同耦合方式下辐照波动、进水流量和进水温度对系统能量传输效率、产氢速率及运行稳定性的影响。

1.3 PV-PEMWE 直接耦合系统

直接耦合系统中, 光伏阵列直流输出直接接入 PEMWE 电堆, 系统不设置最大功率点跟踪和功率变换环节。该耦合系统结构简单、成本低、能量路径短, 但其工作点由光伏阵列输出特性和 PEMWE 负载特性交点被动决定。当辐照强度或温度变化时, PV 侧最大功率点与电解槽较优工作区间可能不重合, 从而造成输入功率损失、效率降低和电压波动。

1.4 PV-PEMWE 间接耦合系统及 MPPT 控制策略

间接耦合系统在光伏阵列与 PEMWE 电堆之间引入 Boost 型 DC-DC 变换器和 MPPT 控制器。Boost 变换器通过开关器件、电感、电容和反馈控制实现升压及等效输入阻抗调节, 使光伏阵列尽可能运行在最大功率点附近。间接耦合系统中 Boost 变换器通过占空比调节输出电压, 使 PEMWE 端获得与电解负载相匹配的电压水平, 其理想升压关系如下式所示。

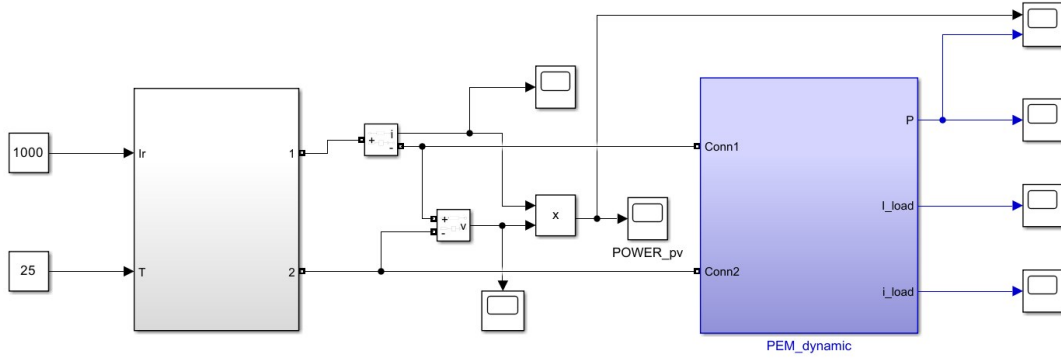


图3 PV-PEMWE直接耦合系统结构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the PV-PEMWE Direct Coupling System

$$U_0 = \frac{E}{1-D} \quad (20)$$

式中， D 为Boost变换器占空比，输入电压和输出电压分别对应PV侧和PEMWE侧电压。占空比越大，理想升压倍数越高。

Boost变换器还会改变光伏侧等效输入电阻，从而影响光伏阵列工作点与最大功率点的匹配关系，其等效阻抗关系如下式所示。

$$R_{in} = R_{load}(1-D)^2 \quad (21)$$

式中， R_{in} 为光伏侧等效输入电阻， R_{load} 为

PEMWE侧等效负载电阻。通过调节占空比，控制器可改变PV侧的等效负载，使光伏阵列更接近最大功率点运行。

本文选用的MPPT方法为电导增量法，其依据 $dP/dU=0$ 判定最大功率点，即 $dI/dU=-I/U$ 。当 $dI/dU > -I/U$ 时工作点位于最大功率点左侧，需要提高输出电压；当 $dI/dU < -I/U$ 时工作点位于右侧，需要降低输出电压。该方法在辐照快速变化时具有较高跟踪精度和较好动态响应，间接耦合系统整体结构如图4所示。

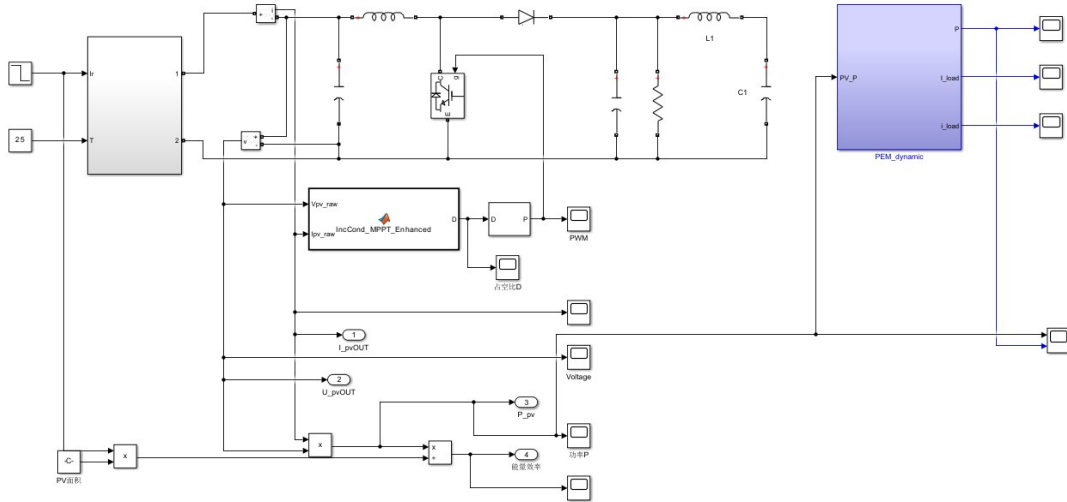


图4 PV-PEMWE间接耦合系统结构示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of the PV-PEMWE Indirect Coupling System

在标准工况下对电导增量法的最大功率点跟踪效果进行仿真验证，如图5所示，结果表明该算法可以实现较快的追踪速度，并且稳定后的振荡非常小，具有较好的鲁棒性。在太阳辐照强度变化时，它能够快速地、准确地跟踪到最大功率点，并保持

较高精度的追踪，在0.14 s后功率达到稳定，稳定后光伏输出功率为63.74 kW，追踪效果达99.68%。

1.5 仿真工况与评价指标

耦合系统仿真采用控制变量法，分别考察辐照

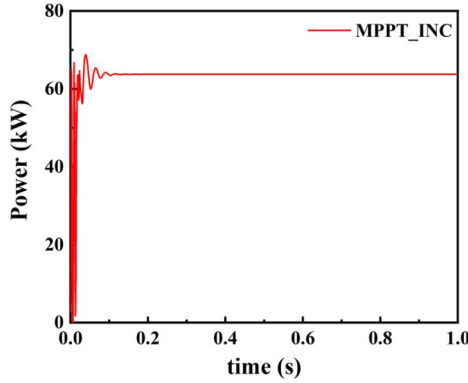


图5 标准状况下的MPPT仿真

Fig. 5 MPPT Simulation Under Standard Conditions

强度、进水流量和进水温度对系统动态性能的影响。光伏阵列采用30串、10并配置，PEMWE电堆层数为100，有效活性面积为100 cm²。基准工况下进水温度为60℃，进水流量为300×100 mL/min。

能量传输效率用于表征光伏阵列可输出功率传递到PEMWE电堆的有效程度，是比较直接耦合和间接耦合功率匹配能力的重要指标，定义如式(22)所示。

$$\eta_{\text{tran}} = \frac{I_{\text{el}} V_{\text{el}}}{I_{\text{MPP}} V_{\text{MPP}}} \quad (22)$$

式中， η_{tran} 为能量传输效率， $I_{\text{el}} V_{\text{el}}$ 为实际进入PEMWE电堆的输入功率， $I_{\text{MPP}} V_{\text{MPP}}$ 为光伏阵列在当前气象条件下的最大可输出功率。

制氢效率用于衡量进入电解槽的电能转化为氢气化学能的能力，反映工作电压偏离热中性或可逆电压时的能量利用水平，如式(23)所示。

$$\eta_{\text{hydrogen}} = \frac{N_{\text{H}_2} HHV_{\text{H}_2}}{I_{\text{cell}} U_{\text{cell}}} \times 100\% \quad (23)$$

式中， η_{hydrogen} 为制氢效率，氢气高位热值 HHV_{H_2} 用于表征生成氢气所对应的化学能，工作电压越高，单位氢气生成所需电能越大，制氢效率越低。

PEM的系统效率用于反映PEM侧的电气性能，如式(24)所示：

$$\eta_{\text{system}} = \frac{U_{\text{rev}}}{U_{\text{cell}}} \times 100\% \quad (24)$$

式中， η_{system} 为系统效率，综合反映光伏输入能量、功率变换过程和PEMWE制氢过程后的氢能输出水平。该指标用于从系统层面比较直接耦合和间接耦合模式的综合能量转换能力。

产氢速率用于描述单位时间内系统生成氢气的摩尔量，能够直接反映不同耦合模式和运行工况下的制氢能力，如式(25)所示。

$$q_{\text{H}_2} = \frac{n I_{\text{cell}}}{2F} \quad (25)$$

式中， q_{H_2} 为产氢速率， n 为电堆单体数， I_{cell} 为电解电流， F 为法拉第常数。该指标与PEMWE侧有效输入电流直接相关。

2 结果与讨论

2.1 光伏系统输出特性分析

采用控制变量法，分别在标准环境温度下（25℃）改变辐照强度、在标准辐照强度下（1000 W/m²）改变环境温度，得到光伏组件的I-V与P-V特性曲线，结果如图6所示。其中，图6(a)展示了在温度控制在25℃时不同辐照强度下的I-V曲线图，在温度一定的情况下，光伏电池的电流和电压随辐照强度的加强而增大。根据图6(b)可知，随辐照强度从200 W/m²升至1000 W/m²所对应的最大功率从12.73 kW增大到63.95 kW。图6(c)为不同温度下光伏电池的I-V曲线，在辐照强度一定的情况下，光伏电池的电压随温度的升高而降低，电流随着温度升高而增大。由图6(d)可知，光伏电池的最大功率随温度的升高而降低，当光伏电池温度从15℃升至45℃时，最大功率从67.28 kW降至58.79 kW。总体来说，本文所建立的仿真模型符合光伏系统的输出功率的特点。

2.2 直接耦合与间接耦合系统能量传输效率对比

分析了不同耦合方式的能量传输效率，如图7所示。当辐照强度为1000 W/m²时，直接耦合系统的能量传输效率约为93%，而间接耦合系统的效率可达98%，后者较前者提升约5个百分点。随着辐照强度逐步降低至800 W/m²、600 W/m²和400 W/m²，直接耦合系统的效率分别降至91%、88%和84%，间接耦合系统的效率则相应降至94%、90%和85%。两类系统的效率差值随辐照强度降低而逐渐缩小，从高辐照下的5%缩减至低辐照下的1%，但间接耦合系统始终保持效率优势。其原因在于，高辐照条件下光伏阵列可利用功率较高，MPPT和DC-DC变换器能够更充分地调节光伏侧工作点，使其与PEMWE负载保持较好的功率匹配，因此间接耦合的效率优势更加明显。随着辐照强度降低，

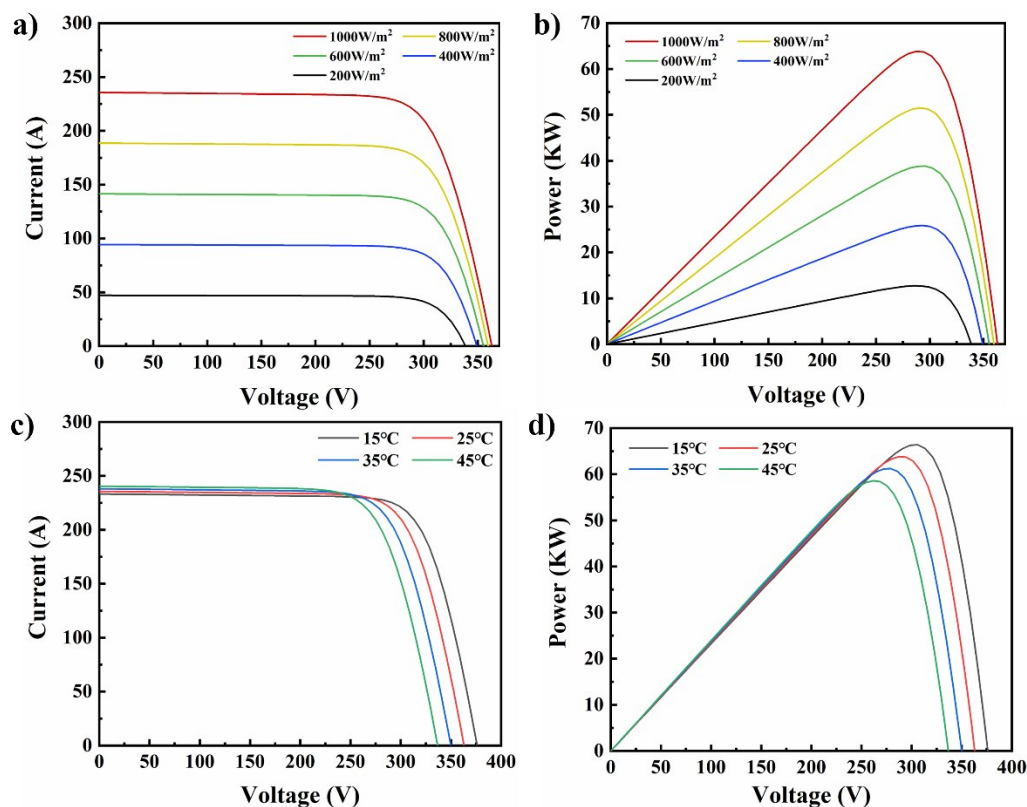


图6 不同辐照强度和环境温度下光伏阵列I-V与P-V特性: (a) 不同辐照下I-V曲线; (b) 不同辐照下P-V曲线; (c) 不同环境温度下I-V曲线; (d) 不同环境温度下P-V曲线

Fig. 6 I-V and P-V Characteristics of a Photovoltaic Array at Different Irradiance Levels and Ambient Temperatures: (a) I-V curves at different irradiance levels; (b) P-V curves at different irradiance levels; (c) I-V curves at different ambient temperatures; (d) P-V curves at different ambient temperatures

光伏侧可利用功率下降, 两种耦合方式下 PEMWE 的输入功率均随之减小, MPPT 调节带来的匹配优势相应减弱, 因此两类系统的效率差值逐渐缩小。

提取了不同辐照强度下的电解槽输入功率, 如

表2所示。在各辐照条件下, 间接耦合系统的 PEM 电解堆输入功率均高于直接耦合系统, 且随着辐照强度降低, 两者的功率差值逐渐减小。辐照强度这表明, 间接耦合系统不仅提升了能量传输效率, 还能在相同辐照输入条件下, 向电解堆传递更多的有效功率。

表2 稳定后不同辐照强度下电解堆功率

Table 2 Electrolyzer Power at Different Irradiation Intensities After Stabilization

辐照强度 (W/m^2)	1000	800	600	400
直接耦合电解堆功率 (kW)	59.64	46.84	33.81	21.55
间接耦合电解堆功率 (kW)	62.73	48.32	34.72	22.08

上述差异主要来源于两种耦合方式对光伏侧工作点调节能力的不同。对于直接耦合系统, PV 侧与 PEMWE 之间缺少 MPPT 及功率调节环节, 其运行点由光伏输出特性与电解堆伏安特性的交点共同决定。随着辐照强度降低, 光伏输出特性发生变

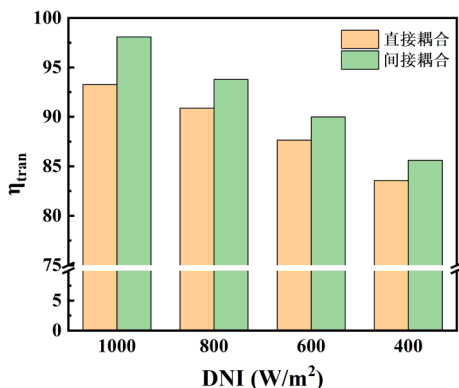


图7 稳定后不同辐照强度下耦合系统能量传输效率
Fig. 7 Energy Transfer Efficiency of a Coupled System at Different Irradiation Intensities After Stabilization

化,运行点更易偏离其最佳工作区间,进而限制有效功率向电解堆传递。由图7和表2可知,当辐照强度由 1000 W/m^2 降至 400 W/m^2 时,直接耦合系统的电解堆输入功率由 59.64 kW 降至 21.55 kW ,能量传输效率也由 93% 降至 84% ,表明光伏运行状态偏离最佳工作区间的同时,系统有效输入功率和能量传输效率均明显降低。相比之下,间接耦合系统通过 MPPT 和 DC-DC 变换器调节光伏侧工作点,使其尽可能运行在最佳工作区间,从而缓解光伏输出与电解堆负荷之间的匹配矛盾,并在各辐照条件下保持更高的有效输入功率和能量传输效率。

2.3 变辐照工况下两种耦合系统动态响应对比

采用阶跃下降的辐照强度输入 ($1000 \rightarrow 800 \rightarrow 600 \rightarrow 400 \text{ W/m}^2$),研究变工况下两种耦合系统的

动态响应特性,如图8所示。随着辐照强度逐渐降低,两种耦合方式下电解堆运行电压均逐级下降,运行温度则在初始升高后逐渐下降。直接耦合系统中,运行点由光伏输出特性与电解堆伏安特性的交点决定,辐照突降引起的光伏输出变化会直接传递至电解堆侧,使其工作点随之偏移。辐照强度由 1000 W/m^2 降至 400 W/m^2 时,直接耦合系统稳定电压由 199.68 V 降至 176.53 V ,间接耦合系统则由 201.22 V 降至 176.95 V ,两者稳态电压降幅接近。间接耦合系统的优势主要体现在 MPPT 和 DC-DC 变换器能够对光伏侧工作点及功率传递过程进行主动调节,改善光伏输出与 PEMWE 负载之间的动态匹配,从而减弱辐照突变对电解堆运行状态的直接影响,提高系统的动态调节能力。

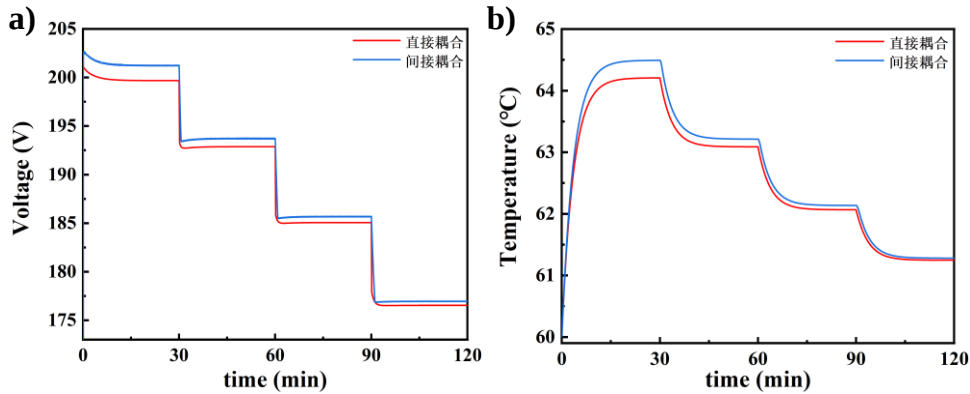


图8 辐照阶跃下降时两种耦合系统的动态响应:(a)电压响应;(b)温度响应

Fig. 8 Dynamic responses of the two coupling systems under stepwise decreases in irradiance: (a) voltage response; (b) temperature response

图9为不同耦合方式下的效率对比。其中,制氢效率和系统效率的动态响应曲线均呈现出相似的变化趋势:在初始阶段,效率随温度升高而逐步提升,随着辐照的阶跃下降,制氢效率逐步提升,系统效率也依次提升,这是因为温度降低了活化过电位,根据公式(23)-(24),两种效率均与 U_{cell} 成反比,因此制氢效率和系统效率都呈现出随着电压的降低而升高的趋势。图9(c)为产氢速率的动态响应曲线,根据法拉第定律,产氢速率与电解池输入电流成正比,输入电流由光伏输出功率直接决定,因此,当辐照逐渐降低,光伏输出功率逐渐下降,电解池输入电流减小,产氢速率随之降低。相比于直接耦合系统,间接耦合系统中两种效率均表现出略微的降低,这是由于间接耦合系统有效功率的提

升,故制氢效率和PEM系统效率的降低幅度较小。间接耦合的产氢速率如图9(f)所示,与直接耦合系统相比,间接耦合系统中的PEM侧输入功率更高,保障了单位时间内更多的电子参与电解水反应,故其产氢速率高于直接耦合系统中的产氢速率。

进一步比较 $1000 \rightarrow 800$ 、 $1000 \rightarrow 600$ 和 $1000 \rightarrow 400 \text{ W/m}^2$ 阶跃跨度,如图10所示,直接耦合系统电压降幅分别为 6.81 、 14.62 和 23.15 V ,阶跃跨度越大,电压骤降和热扰动越剧烈。间接耦合系统对应电压由 201.22 V 降至 193.68 、 185.69 和 176.95 V ,同样随阶跃跨度增大而下降,但其变化过程受 MPPT 和 Boost 调节缓冲,端口冲击较小。由此可见,间接耦合更适于云影遮挡、快速辐照变化等复杂气象条件。

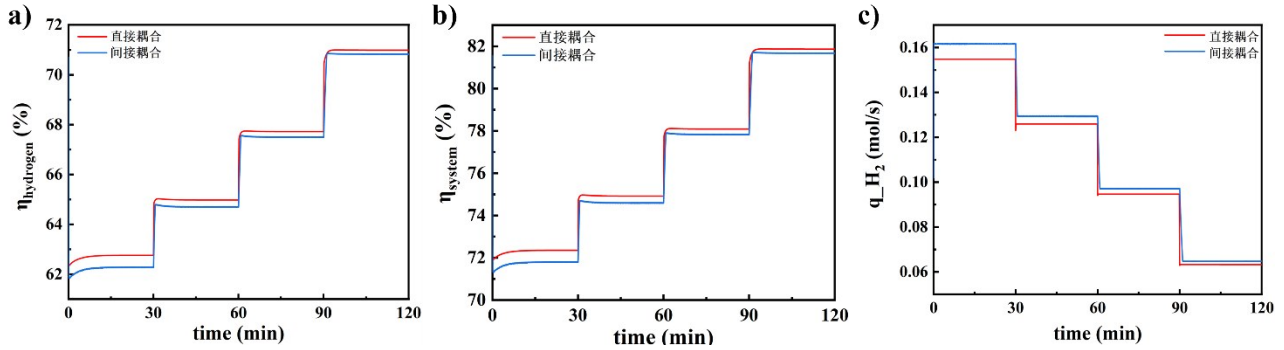


图9 辐照阶跃下两种耦合系统效率和产氢速率响应: (a) 制氢效率; (b) 系统效率; (c) 产氢速率

Fig. 9 Efficiency and hydrogen production rate responses of the two coupling systems under irradiance steps: (a) hydrogen production efficiency; (b) system efficiency; (c) hydrogen production rate

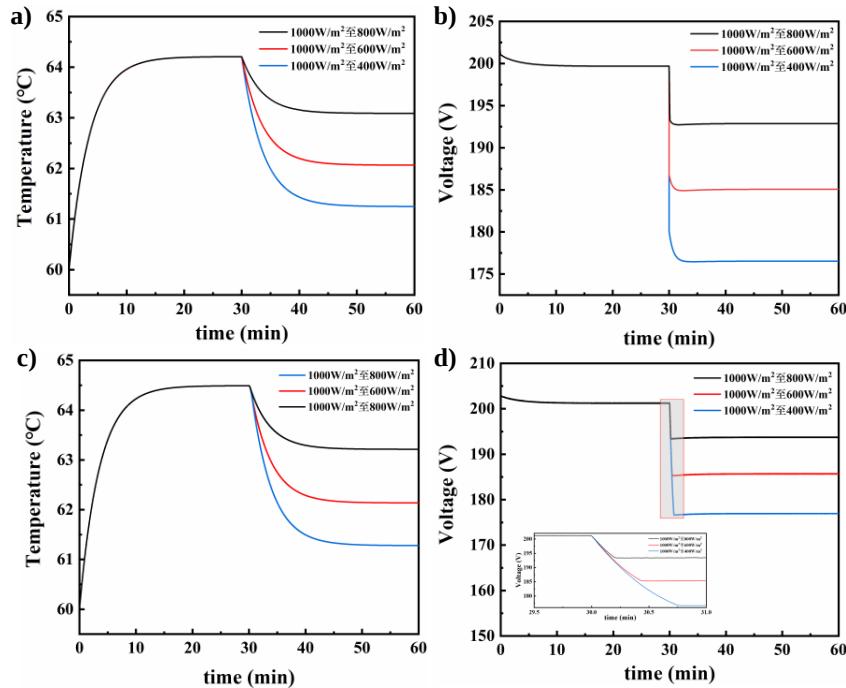


图10 不同耦合系统在不同辐照阶跃梯度下的(a) 直接耦合 PEM 侧温度; (b) 直接耦合 PEM 侧电压; (c) 间接耦合 PEM 侧温度; (d) 间接耦合 PEM 侧电压

Fig. 10 (a) Directly coupled PEM-side temperature; (b) directly coupled PEM-side voltage; (c) indirectly coupled PEM-side temperature; (d) indirectly coupled PEM-side voltage for different coupling systems under different irradiation step gradients

2.4 进水流量对耦合系统性能的影响

如图 11 所示, 在辐照强度 1000 W/m^2 、环境温度 25°C 、进水温度 60°C 下, 直接耦合系统随进水流量由 10 L/min 增加至 30 L/min , 温升由 9.11°C 降至 4.20°C , 达到稳定所需时间由 56 min 缩短至 23 min ; 电压超调量由 3.93 V 降至 2.44 V 。流量增大提高了水带走热量的能力, 使电化学反应产热在热平衡中的扰动占比降低, 因此温升和电压超调同步减小。间接耦合系统表现出类似规律。进水流量

由 10 L/min 增加至 30 L/min 时, 温升由 9.88°C 降至 4.49°C , 稳定时间由 58 min 缩短至 29 min , 电压超调由 3.15 V 降至 1.47 V 。与直接耦合相比, 间接耦合整体运行温度和端电压更高, 原因是 MPPT 使 PEM 侧获得更高输入功率和工作电流, 电化学反应产热更显著。

从工程角度看, 进水流量并非越小越优。较小流量可提高电堆温度并略微改善制氢效率, 但更高温升和更长热平衡时间会增加热管理压力。较大流

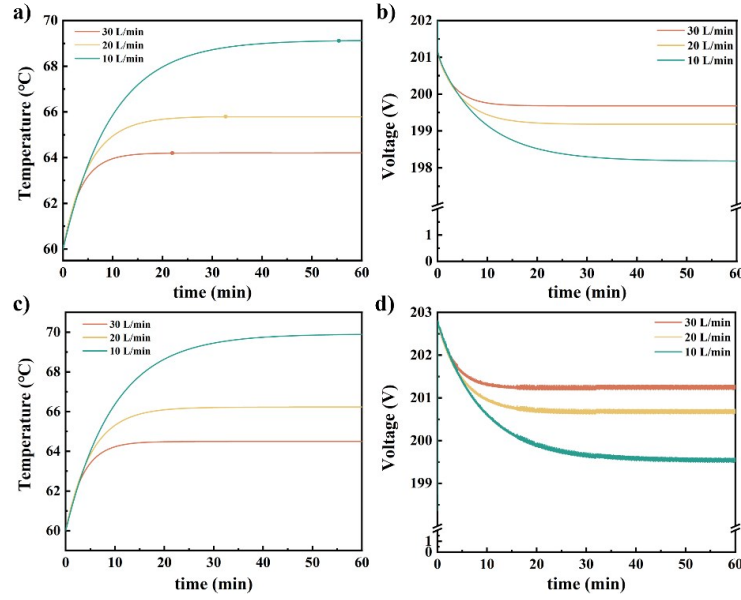


图 11 不同进水流量下两种耦合系统温度和电压响应：(a) 直接耦合系统温度；(b) 直接耦合系统电压；(c) 间接耦合系统温度；(d) 间接耦合系统电压

Fig. 11 Temperature and voltage responses of two coupling systems at different input flow rates: (a) temperature of the directly coupled system; (b) voltage of the directly coupled system; (c) temperature of the indirectly coupled system; (d) voltage of the indirectly coupled system

量可显著抑制温度和电压瞬态波动，更有利于波动光伏输入下的稳定运行。间接耦合系统中，流量调节还需与 MPPT 和 DC-DC 动态特性协调，以避免控制波动与热惯性叠加。

2.5 进水温度对耦合系统性能的影响

如图 12 所示，在辐照强度 1000 W/m^2 、环境温度 25°C 、进水流量 30 L/min 下，直接耦合系统进水温度由 50°C 升至 80°C 时，温升由 4.71°C 降至 3.53°C ，电压超调由 2.81 V 降至 1.66 V ，稳定电压由 203.27 V 降至 194.54 V 。较高进水温度使电堆初始温度更接近有利于反应动力学的区间，降低活化过电位，使电压瞬态波动更平缓。间接耦合系统在不同进水温度下同样呈现高温改善效率、降低超调的规律。进水温度为 50 、 60 、 70 和 80°C 时，电压超调量分别为 1.86 、 1.47 、 1.12 和 0.90 V ，稳定电压分别为 204.88 、 201.26 、 198.24 和 195.73 V 。间接耦合系统整体运行电压高于直接耦合，体现了更高输入功率和工作电流；但由于电压超调显著小于直接耦合，其动态稳定性更好。

综合来看，进水流量和进水温度对耦合系统性能的影响侧重点有所不同。进水流量主要通过改变物料带热能力影响电解槽的热动态过程，适当提高流量有利于抑制温升、缩短热稳定时间并减小电压

波动；进水温度则主要通过影响电化学反应动力学改变电解槽的运行电压和动态响应，提高进水温度有利于降低活化损失和电压超调。两种耦合方式对上述参数变化表现出基本一致的响应趋势，但间接耦合系统受 MPPT 和 DC-DC 变换器调节作用，电压超调相对较小，具有更好的电气动态稳定性，同时其较高的输入功率也使热管理要求相应提高。因此，工程运行中应在满足电解槽热安全和稳定性的前提下选取适中的进水流量，并结合电化学性能、热管理需求及长期运行特性合理确定进水温度，而非单独追求较大的流量或较高的进水温度。

3 结 论

本文建立了面向光伏波动输入的 PV-PEMWE 耦合制氢系统动态仿真框架，并对直接耦合与间接耦合两种系统结构进行了对比分析。光伏侧模型能够反映辐照强度和环境温度对输出特性的影响，PEMWE 侧模型可描述输入功率变化下电压、温度和产氢速率的动态响应。结果表明，直接耦合系统结构简单，但其工作点由光伏输出特性和电解槽负载特性交点被动决定，易偏离光伏最大功率点；间接耦合系统通过 MPPT 和 Boost 变换器调节等效输入阻抗，可显著改善功率匹配，使能量传输效率提

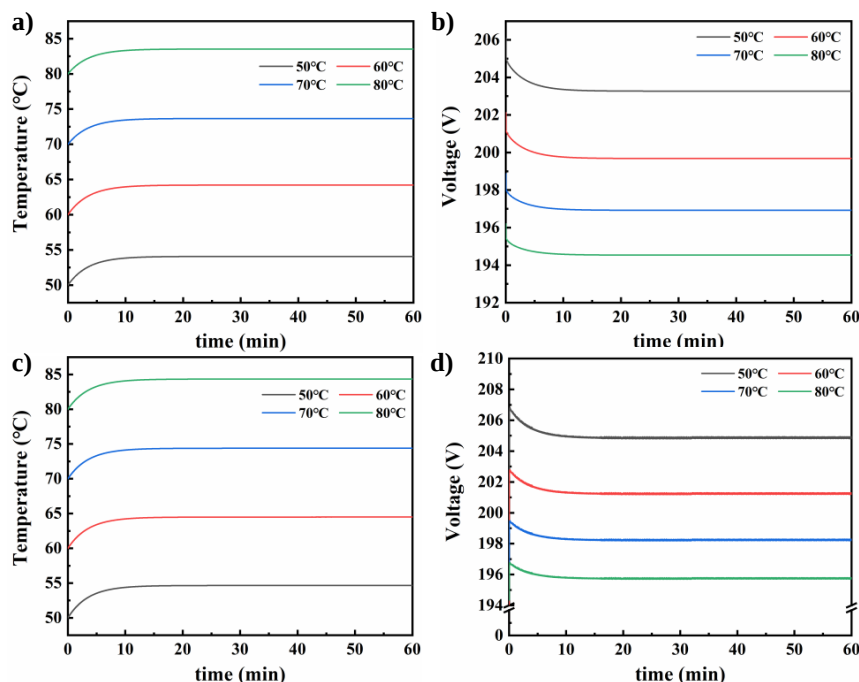


图 12 不同进水温度下两种耦合系统温度和电压响应: (a) 直接耦合系统温度; (b) 直接耦合系统电压; (c) 间接耦合系统温度; (d) 间接耦合系统电压

Fig. 12 Temperature and voltage responses of two coupling systems at different inlet temperatures: (a) temperature of the directly coupled system; (b) voltage of the directly coupled system; (c) temperature of the indirectly coupled system; (d) voltage of the indirectly coupled system

高约 1.5%~5%，产氢速率提高约 6%。在辐照阶跃波动下，间接耦合系统通过 MPPT 和 Boost 变换器改善动态功率匹配，减弱光伏输入扰动对电解槽运行状态的直接影响，从而提高系统的动态调节能力和运行稳定性。运行参数方面，提高进水流量可增强换热、降低温升和电压超调，提高进水温度则有助于降低电解槽工作电压、改善制氢效率和系统效率。综合来看，直接耦合模式适用于结构简单、成本敏感的应用场景，而间接耦合模式在波动光伏输入下兼具较高能量利用率、产氢能力和运行稳定性，更适合对动态响应和稳定运行要求较高的光伏制氢系统。

参考文献

- [1] KAMRAN M, TURZYŃSKI M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 96: 112601.
- [2] RAKOUSKY C, REIMER U, WIPPERMANN K, et al. Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 342: 38-47.
- [3] WANG T, CAO X, JIAO L. PEM water electrolysis for hydrogen production: Fundamentals, advances, and prospects[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 21.
- [4] HE M, NIE G, YANG H, et al. A generic equivalent circuit model for PEM electrolyzer with multi-timescale and stages under multi-mode control[J]. *Applied Energy*, 2024, 359: 122728.
- [5] KHAN M A, NIELSEN M R, GOLSORKHI M S, et al. Multiphysics modeling of electrolyzers under dynamic converter operation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 176: 151478.
- [6] ENGEL F K, WODAK S, ZANDER H J, et al. Dynamic multi-physics 1D-model of a proton exchange membrane electrolysis cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 119: 56-72.
- [7] ASIABAN S, BOZALAKOV D, VANDEVELDE L. Development of a dynamic mathematical model of PEM electrolyser for integration into large-scale power systems[J]. *Energy Conversion and Management: X*, 2024, 23: 100610.
- [8] ESPINOSA-LÓPEZ M, DARRAS C, POGGI P, et al. Modelling and experimental validation of a 46 kW PEM high pressure water electrolyzer[J]. *Renewable Energy*, 2018, 119: 160-173.
- [9] 廖志凌, 阮新波. 任意光强和温度下的硅太阳能电池非线性工程简化数学模型[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(4): 430-435.
- [10] LIAO Zhiliang, RUAN Xinbo. Non-linear engineering simplification model of silicon solar cells in arbitrary solar radiation and temperature[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(4): 430-435.

-
- [10] SKOPLAKI E, PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 614-624.
- [11] GALLARDO F, GARCÍA J, MONFORTI FERRARIO A, et al. Assessing sizing optimality of OFF-GRID AC-linked solar PV-PEM systems for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(64): 27303-27325.
- [12] DING L, PENG X, HOU J, et al. Hydrogen Production by Proton Exchange Membrane Water Electrolysis in the Presence of Wind-Solar Fluctuating Power Supply: Development and Application[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 237-247.
- [13] ZHENG N, DING X, ZHOU Y, et al. Dynamic modeling and response characteristics of a solar-driven polygeneration system coupled with hydrogen and thermal energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 293: 117496.
- [14] MAKHSOOS A, KANDIDAYENI M, AIT ZIANE M, et al. Energy management for modular proton exchange membrane water electrolyzers under fluctuating solar inputs: A constrained nonlinear optimization approach[J]. *Applied Energy*, 2025, 394: 126124.
- [15] HÜNER B. Mathematical modeling of an integrated photovoltaic-assisted PEM water electrolyzer system for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 79: 594-608.
- [16] LI X, ZHANG Q, XIAO F, et al. Dynamic modeling and analysis of electro-thermal coupling characteristics in proton exchange membrane water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 175: 150955.