DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.005　　文章编号：2097-583X(2026)04-0551-08

基于温度-压力协同的质子交换膜电解制氢系统效率提升方法研究

刘　建，周建华，韩华春，程含渺*，贝里京，唐伟佳

（国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 江苏省海上风电技术重点实验室，江苏 南京 211100）

摘　要：为提升电解制氢系统在强波动性可再生能源输入下的制氢效率，提出一种基于温度与压力协同优化的效率提升方法。首先，通过解耦质子交换膜电解槽的温度敏感参数，构建适用于高电流密度和宽温度范围的电化学模型及系统效率模型；接着，基于该模型分析不同输入功率下运行温度与阴极压力对系统效率的影响机理，进而提出温度-压力协同优化策略；最后，构建离网型风电制氢系统仿真模型进行验证。结果表明：相较于恒温恒压策略，案例分析中平均效率提升3.29个百分点，日产氢量提高3.68%，阳极氢气含量平均值从12.97%降至4.93%；进一步地，通过优化输入功率变化率，阳极氢气含量最大值可降低5.15个百分点。

关键词：可再生能源；质子交换膜电解槽；电化学模型；协同优化

中图分类号：TQ116.2；TM73　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Research on efficiency enhancement of Proton Exchange Membrane electrolytic hydrogen production system based on temperature-pressure coordinated control

Liu Jian, Zhou Jianhua, Han Huachun, Cheng Hanmiao*, Bei Lijing, Tang Weijia

(Jiangsu Key Laboratory of Offshore Wind Power Technology, Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: To improve the hydrogen production efficiency of electrolytic hydrogen production system under highly fluctuating operating conditions, an efficiency enhancement method based on the synergistic optimization of temperature and pressure was proposed. First, by decoupling the temperature-sensitive parameters of the proton exchange membrane electrolyzer, electrochemical and system efficiency models suitable for high current densities and a wide temperature range were established. Then, the influence mechanism of operating temperature and cathode pressure on system efficiency under varying input power was analyzed by using the developed model, and the temperature-pressure synergistic optimization strategy was formulated. Finally, the simulation model of an off-grid wind-powered hydrogen production system was built in order to validate the proposed method. The results showed that, compared with the constant temperature and pressure strategy, the overall system efficiency was increased by 3.29 percentage points, the daily hydrogen production was increased by 3.68%, and the average anode hydrogen content was reduced from 12.97% to 4.93% by the proposed synergistic optimization strategy. Moreover, by optimizing the input power ramp rate, the maximum anode hydrogen content was further reduced by 5.15 percentage points.

Key words: renewable energy; Proton Exchange Membrane electrolyzer; electrochemical model; synergistic optimization

收稿日期：2026-04-27；**修回日期：**2026-06-05；*.**通信联系人**，E-mail：chenghanmiao@whu.edu.cn

基金项目：国网江苏省电力有限公司科技项目(J2025JC-04)

作者简介：刘　建(1981—)，男，河南信阳人，教授级高级工程师，博士，主要从事新能源发电、制氢技术研究。

引用格式：刘建，周建华，韩华春，等. 基于温度-压力协同的质子交换膜电解制氢系统效率提升方法研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：551-558.

Liu Jian, Zhou Jianhua, Han Huachun, et al. Research on efficiency enhancement of Proton Exchange Membrane electrolytic hydrogen production system based on temperature-pressure coordinated control[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4): 551-558.

0　引言

氢能是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体[1]。电解水制氢技术能够将波动性可再生能源转化为氢能,既缓解了电网可再生能源消纳压力,也为工业、交通等难减排领域提供了清洁能源[2]。质子交换膜(Proton Exchange Membrane,PEM)电解制氢技术凭借高电流密度、结构紧凑、适应高压条件以及对波动电源快速响应等优势,成为研究热点[3]。然而,该技术的运行成本较高,电费占制氢总成本的80%以上,且电解过程中仅有60%~75%的电能转化为氢能[4-5]。因此,提升PEM电解制氢系统总效率,对降低制氢成本并推动其规模化应用具有重要意义。

当前,关于制氢系统效率提升的研究多聚焦于功率调控方面[6-7],未充分考虑功率、温度、压力等参数之间的内在耦合与协同机制,导致制氢系统在强波动工况下的运行效率受限。为解决这一问题,部分学者提出了通过调控公辅设备实现运行参数动态调整的效率优化方法[8-11]。

文献[8]指出,PEM电解制氢系统在不同电流密度下均存在1个对应的最优温度。文献[9]提出一种功率-温度自适应控制策略,通过系统效率模型预先设定不同输入功率下的温度参数,实现效率提升。针对压力优化问题,文献[10]研究了阴极压力对系统能耗的影响,当阴极压力从2.0 MPa提升至4.0 MPa时,系统能耗未显著增加,但法拉第效率略有下降。文献[11]进一步研究了阴极压力对电解槽性能、氢气干燥及压缩过程的作用机理,发现PEM电解槽效率最优的阴极压力值主要受电流密度和储氢压力影响。为应对强波动性可再生能源输入,文献[12]提出一种面向最大效率的PEM电解制氢系统最优压力运行模式。然而,温度与压力作为2个关键运行参数,其耦合关系复杂,仅对单一参数进行控制难以实现系统整体性能最优。为此,文献[13]通过动态调节PEM电解槽的电流密度、温度与压力,揭示了协同优化模式在提升系统效率方面的潜力;文献[14]提出一种基于混合整数线性规划的多参数动态协同优化方法,但模型复杂度高,难以满足在线实时控制需求。

综上所述,在计及高波动性可再生能源输入的情况下,针对PEM电解制氢系统效率提升技术的研究尚不深入,尤其是具备快速动态响应能力的温度-压力协同优化策略仍属空白。为此,本文构建适用于高电流密度及宽温度范围的PEM电化学模型和系统效率模型,分析输入功率变化时运行温度与阴极压力对系统效率的影响机理,进而提出基于温度-压力协同优化的PEM电解制氢系统效率提升方法。最后,通过构建风电制氢算例,验证了所提温度-压力协同优化方法的有效性。

1　可再生能源电解制氢系统模型构建

1.1　可再生能源电解制氢系统

如图1所示的可再生能源电解制氢系统中,可再生能源经由制氢电源向PEM电解槽供电,纯水则在循环泵的驱动下流经换热器后进入电解槽。电解水产生的氢气经气液分离与纯化后由压缩机压缩并储存于储氢罐。电解反应式可表示为

$$H_2O + Q_{ele} + Q_{heat} \rightarrow H_2 + (1/2)O_2。\tag{1}$$

然而,在整个电解过程中仅有60%~75%的电能转化为氢能,约10%被压缩机等公辅设备所消耗,另有15%~30%以热能形式损失。为深入探究PEM电解制氢系统效率的关键影响因素,亟需建立量化表征PEM电解槽性能的电化学模型,并构建描述产氢效率、法拉第效率与压缩效率的系统效率模型。

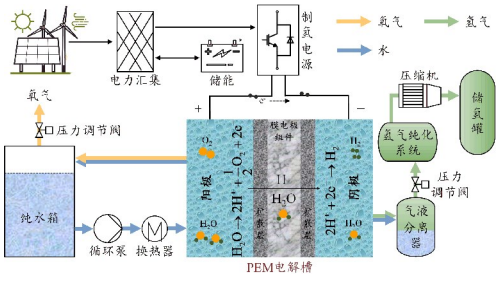


图1　可再生能源电解制氢系统结构

Fig. 1　Structure of renewable energy electrolytic hydrogen production system

1.2　PEM电解槽电化学模型

PEM电解槽由N_{cell}个串联连接的电解小室构成,每个电解小室的工作电压U_{cell}可以分解为开路电压U_{ocv}、活化过电势φ_{act}、欧姆过电势φ_{ohm}、浓差过电势φ_{con}等4个组成部分:

$$U_{stack} = N_{cell}\left(U_{ocv} + \varphi_{act} + \varphi_{ohm} + \varphi_{con}\right)。\tag{2}$$

为提高PEM电解槽电化学模型在宽温度区间的仿真精度,将交换电流密度、质子交换膜电导率、极限电流密度等温度敏感型参数,解耦为参考

温度下的基准值及相应的温度修正项。

开路电压可通过能斯特方程进行计算:

$$U_{ocv}=U_{rev}+\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{p_{H_2}\sqrt{p_{O_2}}}{a_{H_2O}}\right), \tag{3}$$

$$U_{rev}=1.229-9\times10^{-4}(T-298.15), \tag{4}$$

式中:U_{rev}为标准状态下的可逆电压,R为理想气体常数,T为PEM电解槽运行温度,F为法拉第常数,p_{H_2}和p_{O_2}分别为氢气在阴极的分压和氧气在阳极的分压,a_{H_2O}为电极与质子交换膜之间水的活度。

活化过电势可通过Butler-Volmer方程进行定量描述:

$$\varphi_{act}=\frac{RT}{2\alpha_{ano}F}\operatorname{arcsinh}\left(\frac{J}{2J_{0,ano}}\right)+\frac{RT}{2\alpha_{cat}F}\operatorname{arcsinh}\left(\frac{J}{2J_{0,cat}}\right), \tag{5}$$

$$J_{0,x}=J_{0,x,ref}\cdot\exp\left(\frac{E_{exc,x}}{R}\left(\frac{1}{303.15}-\frac{1}{T}\right)\right), \tag{6}$$

式中:α_{ano}和α_{cat}分别为阳极和阴极电荷转移系数,J为工作电流密度,$J_{0,ano}$和$J_{0,cat}$分别为阳极和阴极交换电流密度,$J_{0,x,ref}$和$E_{exc,x}$分别为参考温度下的交换电流密度和反应活化能,$E_{exc,ano}$和$E_{exc,cat}$分别为阳极反应活化能和阴极反应活化能。

欧姆过电势可表示为:

$$\varphi_{ohm}=J\frac{\delta_{mem}}{\sigma_{mem}}, \tag{7}$$

$$\sigma_{mem}=(0.513\,9\lambda-0.326)\times\exp\left(\frac{E_{pro}}{R}\left(\frac{1}{303.15}-\frac{1}{T}\right)\right), \tag{8}$$

式中:δ_{mem}为质子交换膜厚度,σ_{mem}为质子交换膜电导率,λ为膜的含水量,E_{pro}为质子在膜中传输的活化能。浓差过电势可表示为:

$$\varphi_{con}=\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{J_{lim}}{J_{lim}-J}\right), \tag{9}$$

$$J_{lim}=J_{lim,ref}\exp\left(\frac{E_{diff}}{R}\left(\frac{1}{303.15}-\frac{1}{T}\right)\right), \tag{10}$$

式中:J_{lim}为极限电流密度,$J_{lim,ref}$为参考温度下的极限电流密度,E_{diff}为有效扩散所需的活化能。

表1给出了PEM电解槽电化学模型的参数辨识结果。

表1　PEM电解槽电化学模型参数辨识结果

Tab. 1　Identified PEM electrolyzer electrochemical model parameters

参数	数值
阳极电荷转移系数α_{ano}	0.9
参考温度下的阳极交换电流密度$J_{0,ano,ref}$	1.1×10^{-9} A/cm^2
阳极电子传输所需活化能$E_{exc,ano}$	57 027 J/mol
阴极电荷转移系数α_{cat}	0.179 4
参考温度下的阴极交换电流密度$J_{0,cat,ref}$	0.363 7 A/cm^2
阴极电子传输所需活化能$E_{exc,cat}$	15 989 J/mol
质子传输所需活化能E_{pro}	10 850 J/mol
极限电流密度参考值$J_{lim,ref}$	2.06 A/cm^2
有效扩散所需活化能E_{diff}	2627 J/mol

1.3　PEM电解制氢系统效率模型

基于电化学模型,可进一步构建系统效率模型,其中,产氢效率定义为所产氢气完全燃烧释放的热量与输入的总能量之比。氢气燃烧释放的热量以其低热值为基准,对应电压U_{LHV}约为1.253 V。系统输入的总能量包括热中性电压U_{th}对应的能量和实际运行损耗。损耗部分主要用于克服反应能垒与电解质内阻引起的过电势,以及随湿氢、湿氧排出的饱和水蒸气所携带的显热,该部分显热可折算为水蒸气焓值电压[15]:

$$U_{vap}=\frac{\Delta H_{H_2O,vap}}{2F}\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2,cat}}+\frac{p_{H_2O}}{2p_{O_2,ano}}\right), \tag{11}$$

$$p_{H_2O}=0.006\,109\,4\times\exp\left(\frac{17.625(T_{stack}-273.15)}{T_{stack}-39.11}\right), \tag{12}$$

式中:$\Delta H_{H_2O,vap}$为水蒸气焓值,p_{H_2O}为纯水的饱和蒸汽压。

当$U_{cell}\leqslant U_{th}+U_{vap}$时,即当电解小室电压不大于热中性电压和饱和水蒸气所携带的显热时,外部输入电能不足以同时满足水的电解与液态水气化的能量需求,其能量差额需通过从环境中吸收热量进行补偿,此时的产氢效率$\eta_{H_2,gene}$可表示为:

$$\eta_{H_2,gene}=\frac{U_{LHV}}{U_{th}+U_{vap}}, \tag{13}$$

式中:U_{LHV}为氢气低热值对应的电压。

反之,外部输入电能超出理论需求时,电解过程产生的热量高于反应吸收的热量,将引起运行温度上升,若忽略温度调节措施的能量消耗,产氢效率可表示为:

$$\eta_{H_2,gene}=\frac{U_{LHV}}{U_{cell}}。 \tag{14}$$

法拉第效率$\eta_{H_2,F}$为实际产生的氢气量与依据法拉第定律计算的理论氢气量之比,可表示为[15]:

$$\eta_{H_2,F}=\frac{\dot{n}_{H_2,gene}-\dot{n}_{H_2,rev}}{\dot{n}_{H_2,gene}}=\frac{J-J_{rev}}{J},\tag{15}$$

$$J_{rev}\approx\frac{2\lambda_{H_2}^{T}F\left(p_{H_2}+p_{O_2}\right)+4a_xJ}{\xi_m\delta_m}\times\exp\left(\frac{E_{rev}}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T_{stack}}\right)\right),\tag{16}$$

式中:λ_{H_2}为质子交换膜的氢气渗透系数,a_x为电流密度对渗透系数的影响因子,E_{rev}为参考温度下逆反应过程的活化能,$\dot{n}_{H_2,gene}$为理论产氢速率,$\dot{n}_{H_2,rev}$为逆反应消耗的氢气速率,ξ_m和δ_m分别为质子交换膜膨胀系数和质子交换膜厚度,T_{stack}为电解槽运行温度。

PEM电解槽产氢压力远低于储运需求,压缩过程需消耗能量以克服巨大压差,其多级压缩过程的效率η_{CH}可表示为[15]:

$$\eta_{CH}=1-\frac{\frac{\kappa}{\kappa-1}RT_{H_2,in}Z\left(c_{CH}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}-1\right)}{s_{CH}\Delta H_{LHV}\eta_{CH}},\tag{17}$$

$$s_{CH}=\ln\left(\frac{p_{H_2,tank}}{p_{cat}}\right)/\ln\left(c_{CH}\right),\tag{18}$$

式中:s_{CH}为压缩级数,κ为氢气的热容系数,$T_{H_2,in}$为压缩机入口氢气的温度,Z为压缩因子,c_{CH}为单级压缩系数,ΔH_{LHV}为氢气低热值,η_{CH}为压缩机效率,$p_{H_2,tank}$为储氢压力,p_{cat}为阴极压力。

PEM电解制氢系统总效率$\eta_{H_2,tot}$为产氢效率$\eta_{H_2,gene}$、法拉第效率$\eta_{H_2,F}$和氢气多级压缩效率η_{CH}的乘积,可以表示为:

$$\eta_{H_2,tot}=\eta_{H_2,gene}\cdot\eta_{H_2,F}\cdot\eta_{CH}。\tag{19}$$

2　影响制氢系统效率的因素分析

在可再生能源制氢系统中,离网场景侧重于最大化消纳可再生电力,并降低储能需求。基于电化学与系统效率模型,可将系统总效率表示为输入功率的函数:

$$\eta_{H_2,tot}=f\left(P_{stack},T_{stack},p_{H_2,cat}\right),\tag{20}$$

式中:P_{stack}为制氢功率。

在给定输入功率下,运行温度与阴极压力是影响系统总效率的关键因素。以100 m³/h(20 ℃、101.325 kPa条件下)PEM电解制氢系统为例,量化分析输入功率变化时运行温度与阴极压力对系统效率的影响程度,系统关键参数详见表2。

表2　PEM电解制氢系统关键参数

Tab. 2　Key parameters of PEM electrolytic hydrogen production system

参数	数值
水蒸气焓值$\Delta H_{H_2O,vap}$	41 572 J/mol
PEM氢气渗透系数λ_{H_2}	5.31×10^{-16} mol/(cm•s•Pa)
电流密度对渗透系数的影响因子α_x	1.2×10^{-5} cm
PEM膨胀系数ξ_m	1.15
逆反应过程的活化能E_{rev}	20 000 J/mol
氢气的热容系数κ	1.4
压缩因子Z	1
单级压缩系数c_{CH}	2.75
压缩机效率η_{CH}	82.5%
储氢压力$p_{H_2,tank}$	20 MPa

2.1　运行温度对制氢系统效率的影响

在1.6 MPa额定压力下,系统产氢效率、法拉第效率与总效率随输入功率和运行温度的变化如图2—图4所示。结果表明,系统产氢效率随输入功率增加而下降,但随运行温度升高而提升。系统法拉第效率随输入功率增加逐渐上升,且增速逐渐减缓;在固定功率下随运行温度升高而降低。系统总效率随输入功率增加呈先上升后下降的趋势,存在最大效率功率点。当输入功率小于该最大效率对应功率点时,系统总效率随输入功率增加而提升,随运行温度升高而降低;但随着输入功率进一步增加,系统总效率随输入功率增加而下降,随运行温度升高而提升。以上结果均与理论分析一致。

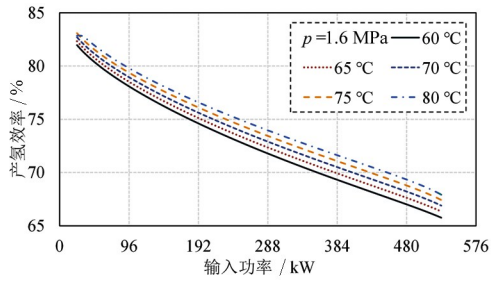


图2　额定压力下温度对功率–产氢效率关系的影响

Fig. 2　Effect of temperature on the power-hydrogen production efficiency relationship at rated pressure

2.2　阴极压力对制氢系统效率的影响

在80 ℃额定温度下,系统产氢效率、法拉第效率与总效率随输入功率和阴极压力的变化如图5—图7所示。输入功率较低时,系统产氢效率

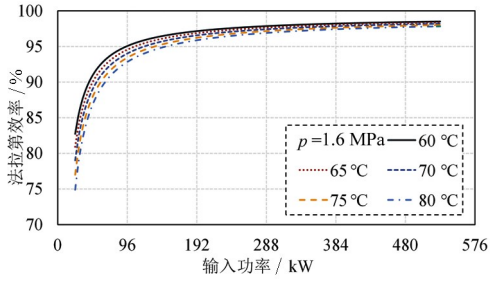


图3　额定压力下温度对功率-法拉第效率关系的影响

Fig. 3　Effect of temperature on the power-Faraday efficiency relationship at rated pressure

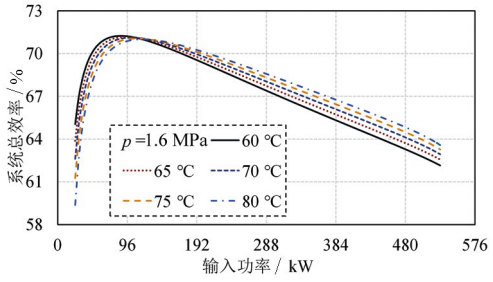


图4　额定压力下温度对功率-系统总效率关系的影响

Fig. 4　Effect of temperature on the power-overall system efficiency relationship at rated pressure

相对稳定,这是由于输入电能不足以同时满足水电解反应与液态水气化所需能量,其差额由系统内部补偿。随着输入功率上升,产氢效率逐渐下降,升高阴极压力会进一步降低产氢效率。系统法拉第效率在所有阴极压力下均随输入功率先快速上升后趋于平稳,并随阴极压力增加而整体下降。系统总效率随输入功率增加均呈现先上升后下降的趋势,存在最大效率功率点。当输入功率小于该最大效率功率点时,系统总效率随输入功率增加而提高,降低阴极压力可显著提升效率;随着输入功率进一步增加,不同阴极压力下的效率曲线逐渐接近,表明系统总效率对阴极压力变化的敏感性减弱。以上结果均与理论分析一致。

结合图4与图7所示结果,在80 ℃、1.6 MPa的额定工况下,单独优化运行温度或阴极压力均可提升系统总效率,具体影响趋势如表3所示,其中正相关表示提高该参数能够提升效率,而负相关则表明提高该参数反而会使效率下降。在此基础上对运行温度与阴极压力进行协同优化,可进一步提升系统总效率。

3　PEM电解制氢系统效率提升方法

为验证温度-压力协同优化对提升PEM电解制氢系统效率的有效性,以系统效率最大化为目

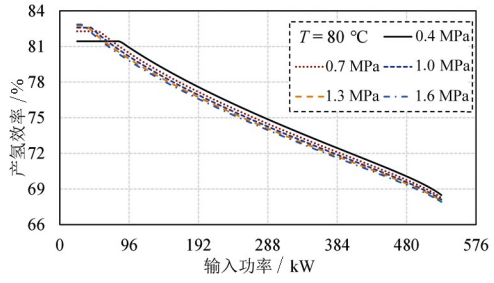


图5　额定温度下压力对功率-产氢效率关系的影响

Fig. 5　Effect of pressure on the power-hydrogen production efficiency relationship at rated temperature

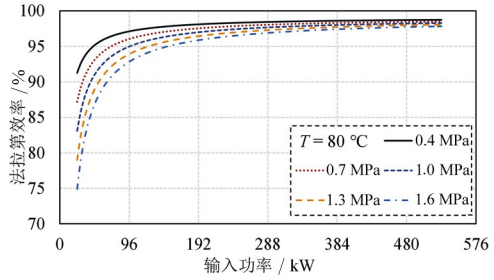


图6　额定温度下压力对功率-法拉第效率关系的影响

Fig. 6　Effect of pressure on the power-Faraday efficiency relationship at rated temperature

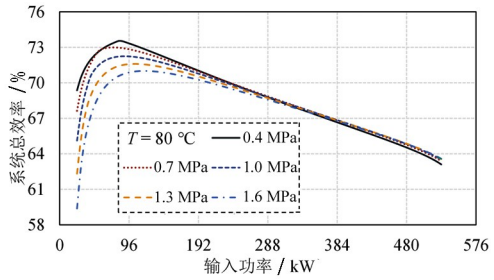


图7　额定温度下压力对功率-系统总效率关系的影响

Fig. 7　Effect of pressure on the power-overall system efficiency relationship at rated temperature

表3　温度与压力对制氢系统效率的影响

Tab. 3　Effects of temperature and pressure on the efficiency of a hydrogen production system

效率		运行温度	阴极压力
产氢效率	未满足最低能量需求	负相关	正相关
	满足最低能量需求	正相关	负相关
法拉第效率		负相关	负相关
压缩效率		负相关	正相关

标,对比分析以下4种优化策略的性能。

策略1:制氢系统在额定温度与压力下运行,为参考基准;

策略2:在额定阴极压力下优化运行温度;

策略3:在额定运行温度下优化阴极压力;

策略4:协同优化运行温度与阴极压力。

各策略的输入功率、运行温度及阴极压力范

围如表 4 所示，输入功率为 24～528 kW(5%～110%额定功率)。

表 4　不同优化策略下的参数范围选择

Tab. 4　Parameter range selection under different optimization strategies

运行策略	运行温度/℃	阴极压力/MPa
策略 1	80	1.6
策略 2	60～80	1.6
策略 3	80	0.1～1.6
策略 4	60～80	0.1～1.6

不同优化策略下，制氢系统最优运行温度与最优阴极压力随输入功率的变化分别如图 8 和图 9 所示。结果表明，在策略 4 下，二者均随输入功率动态变化。低输入功率时，较低运行温度有助于提升系统总效率；随着输入功率增加，最优运行温度逐渐上升，在 19% 额定功率时达到电解槽上限。当输入功率低于该值时，因运行温度与阴极压力之间的耦合作用，策略 4 的最优运行温度不同于策略 2，最优阴极压力不同于策略 3。

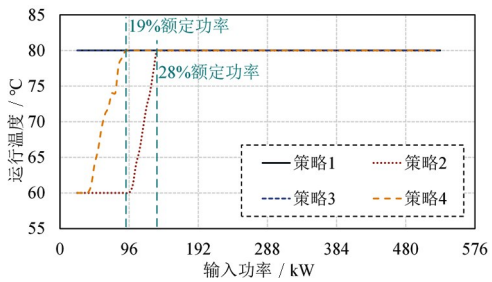


图 8　不同策略下制氢系统的最优运行温度

Fig. 8　Optimal operating temperature of hydrogen production system under different strategies

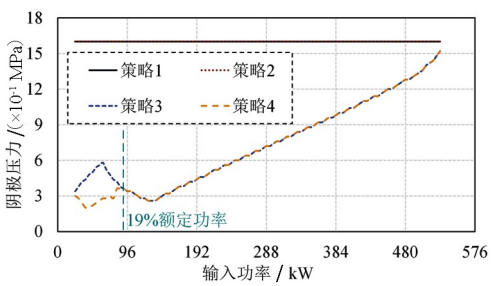


图 9　不同策略下制氢系统的最优阴极压力

Fig. 9　Optimal cathode pressure of hydrogen production system under different strategies

图 10 为不同优化策略下制氢系统产氢效率随输入功率的变化曲线。策略 2 和策略 3 分别在低于 11% 和 28% 额定功率时，产氢效率低于策略 1，而策略 4 在整个功率范围内均高于策略 1。这表明协同优化运行温度与阴极压力可全面提升产氢效率，避免单一优化时导致的产氢效率下降。

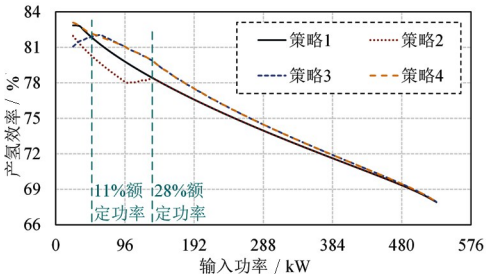


图 10　不同策略下制氢系统的产氢效率

Fig. 10　Hydrogen production efficiency of hydrogen production system under different strategies

制氢系统的法拉第效率在不同优化策略下随输入功率的变化如图 11 所示。在全部输入功率范围内，策略 3 的法拉第效率始终高于策略 2，表明优化阴极压力比优化运行温度的影响更显著。策略 4 的法拉第效率始终最高，说明协同优化运行温度与阴极压力可全面提升法拉第效率，降低氢氧交叉渗透的风险。

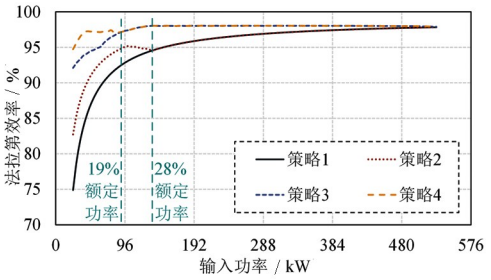


图 11　不同策略下制氢系统的法拉第效率

Fig. 11　Faraday efficiency of hydrogen production system under different strategies

如图 12 所示，不同优化策略下制氢系统总效率随输入功率增加均呈现先上升后下降的趋势。策略 4 在整个输入功率范围内效率最高，其最大系统总效率较策略 1、策略 2 和策略 3 分别提高 3.17、2.94、0.59 个百分点。优化运行温度与阴极压力使得系统总效率峰值向低功率区偏移，拓宽了系统的高效运行区间。相关效率参数详见表 5。

不同输入功率下的制氢系统效率提升流程如图 13 所示，首先，基于可再生能源功率预测结果生成制氢功率规划曲线，以最大程度消纳可再生能源并降低储能需求；其次，通过协同优化获取不同输入功率下的最优运行温度与阴极压力；最后，建立功率、温度与压力的对应关系，从而确定各时段最优的温度与压力设定值。

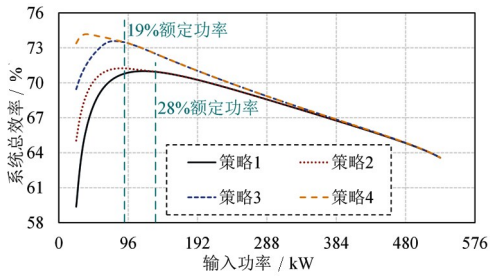


图12　不同策略下制氢系统的总效率

Fig. 12　Overall system efficiency of hydrogen production system under different strategies

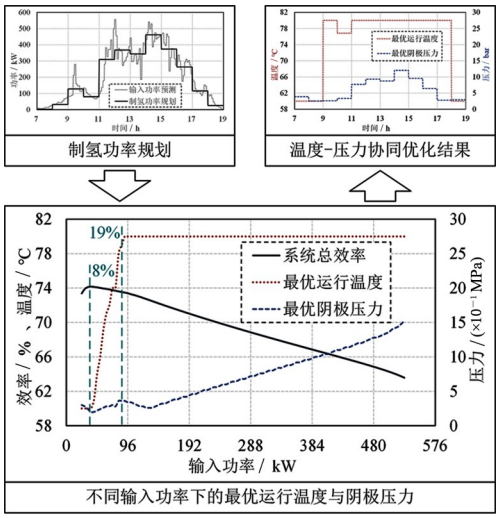


图13　PEM电解制氢系统效率提升流程

Fig. 13　Efficiency optimization process of PEM electrolytic hydrogen production system

4　案例分析

为进一步验证温度-压力协同优化的有效性,本研究构建了由风机、PEM电解槽与储能电池构成的离网型风电制氢系统,并基于实际工况进行对比。不同策略在实际风电出力下的仿真结果如图14所示。

相比策略1,策略4的平均效率提升3.29个百分点,产氢量增加3.68%,阳极氢气含量平均值(AHC)从12.97%降至4.93%。但策略4的运行温度与阴极压力动态响应明显滞后于功率变化,导致系统偏离最优工况,总效率下降、AHC升高。为此,本研究综合评估了PEM电解槽运行温度和氢气侧气液分离器出口压力的最大可控调节速率,并基于温度-压力协同优化结果,将输入功率变化率限

表5　不同策略下制氢系统性能比较

Tab. 5　Performance comparison of hydrogen production systems under different strategies

参数	平均产氢效率/%	平均法拉第效率/%	最小法拉第效率/%	平均压缩效率/%	平均系统总效率/%	最大系统总效率/%
策略1	74.67	95.26	74.89	95.69	67.94	71.01
策略2	74.38	95.93	82.73	95.74	68.24	71.24
策略3	75.18	97.56	92.09	94.18	69.02	73.59
策略4	75.24	97.83	94.72	94.09	69.21	74.18

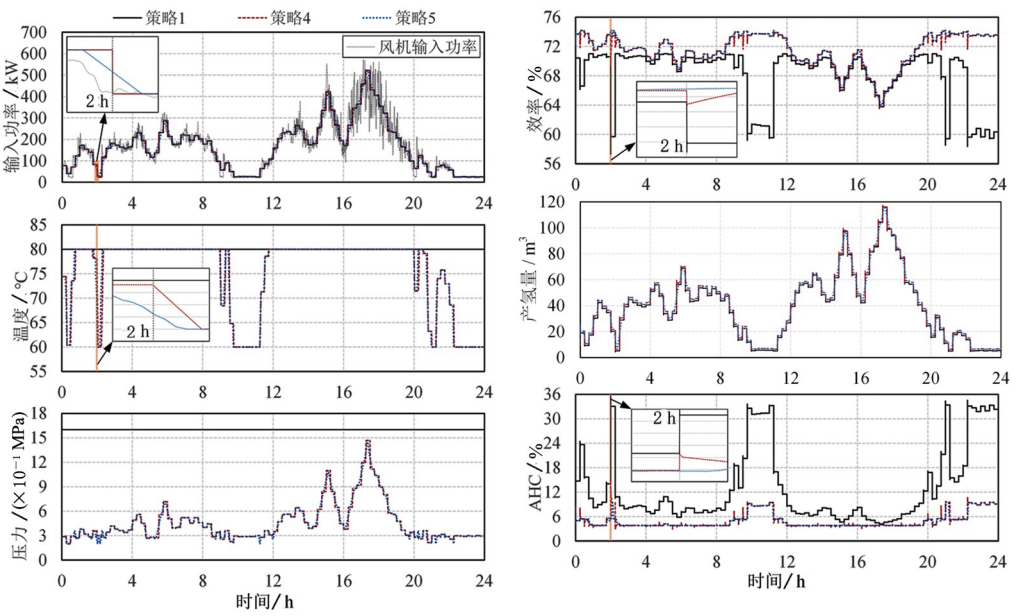


图14　离网型风电制氢系统仿真结果

Fig. 14　Simulation results of off-grid wind power hydrogen production system

制在0.1 kW/s以内,作为策略5,使系统能在功率波动中持续跟踪最优运行轨迹,AHC最大值降低5.15个百分点。本案例表明,引入功率变化率约束的协同优化策略可使PEM电解制氢系统在不提升功率、温度及压力调节速率的条件下,高效跟随可再生能源功率波动,并缓解因工况快速变化导致的寿命衰减。具体仿真结果见表6(产氢量为20 ℃、101.325 kPa条件下的数值)。

表6　离网型风电制氢系统仿真结果比较

Tab. 6　Comparison of simulation results of off-grid wind power hydrogen production system

参数	日平均效率/%	总产氢量/m^3	AHC平均值/%	AHC最大值/%
策略1	68.17	950.17	12.97	35.63
策略4	71.46	985.14	4.93	14.67
策略5	71.50	985.73	4.88	9.52

5　结论

提出一种基于温度-压力协同优化的可再生能源电解制氢系统效率提升方法,得到以下主要结论:

1) 在给定输入功率下,系统总效率主要由运行温度与阴极压力决定。低功率运行时,采用低温低压可抑制氢气渗透,从而提升效率、拓宽高效运行范围;高功率运行时,最优温度接近允许上限,而压力影响显著减弱。

2) 对于任一给定输入功率,系统总效率均存在对应的最优运行温度与阴极压力组合。

3) 温度-压力协同优化在全输入功率范围内始终保持最高效率。相较于恒温恒压策略,该策略使日平均效率提升3.29个百分点,产氢量增加3.68%,阳极氢气含量平均值由12.97%降至4.93%。

4) 若对输入功率变化率进行优化,温度-压力协同优化能够缓解温度与压力的动态响应显著滞后于功率变化的问题,并使阳极氢气含量最大值降低5.15个百分点。

参考文献:

[1] 王士博,孔令国,蔡国伟,等. 电力系统氢储能关键应用技术现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报,2023,43(17):6660-6680.

[2] 何新宇,杨晓辉,杨华强,等. 基于太阳能全光谱利用的掺氢综合能源系统规划[J]. 电力工程技术,2026,45(4):24-33.

[3] 李建林,郑新龙,孙浩元,等. 基于IAW-MOPSO算法的PEMEL制氢动态性能控制技术[J]. 电力工程技术,2026,45(5):115-126.

[4] 吕振宇,丁磊,吴在军,等. 考虑电-氢-热多能互补的微网多目标优化配置[J]. 电力工程技术,2024,43(2):11-20.

[5] Cheng Kangle, He Shan, Hu Bing. Power adaptive control strategy for multi-stack PEM photovoltaic hydrogen systems considering electrolysis unit efficiency and hydrogen production rate [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 75: 104200.

[6] 陈磊磊,年珩,赵建勇,等. 含多电解槽的新能源制氢能量管理优化[J]. 电力工程技术,2024,43(2):2-10.

[7] 蔡昌春,何瑶瑶,石庆伦,等. 考虑绿证-碳交易与需求响应的含氢IES低碳优化调度[J]. 电力工程技术,2025,44(3):43-52.

[8] Scheepers F, Stähler M, Stähler A, et al. Temperature optimization for improving polymer electrolyte membrane-water electrolysis system efficiency[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116270.

[9] 韩鹏飞,徐潇源,王晗,等. 基于功率-温度自适应控制的多堆质子交换膜电解制氢系统效率优化[J]. 电工技术学报,2024,39(7):2236-2248.

[10] Koponen J, Kosonen A, Ruuskanen V, et al. Control and energy efficiency of PEM water electrolyzers in renewable energy systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(50): 29648-29660.

[11] Tjarks G, Gibelhaus A, Lanzerath F, et al. Energetically-optimal PEM electrolyzer pressure in power-to-gas plants[J]. Applied Energy, 2018, 218: 192-198.

[12] 刘元,肖碧涛,卢昂,等. 面向波动可再生能源的质子交换膜电制氢系统最优压强运行[J]. 电力自动化设备,2024,44(8):210-217.

[13] Bornemann L, Lange J, Kaltschmitt M. Optimizing temperature and pressure in PEM electrolyzers: a model-based approach to enhanced efficiency in integrated energy systems [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 325: 119338.

[14] Aguado R, Tostado-Véliz M, Desideri U, et al. Optimizing proton exchange membrane electrolyzer performance through dynamic pressure and temperature control: a mixed-integer linear programming approach [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 345: 120402.

[15] Sayed-Ahmed H, Toldy Á I, Santasalo-Aarnio A. Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers: critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113883.

责任编辑:张伟博　陈松楠