第 50 卷 第 12 期：5539-5551 高电压技术 Vol.50, No.12: 5539-5551
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240566

考虑效率优化的电制氢(P2H)多机集群系统调度运行框架

董雁楠[1]，李相俊[2]，韩子娇[3]，白金彤[1]，马少华[1]
（1. 沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870；2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京 100192；3. 国网辽宁省电力有限公司，沈阳 110004）

摘　要：电制氢(power to hydrogen, P2H)技术是“双碳”目标背景下实现电力脱碳的关键技术。受碱性电解池(alkaline electrolysis cell, AEC)单机容量的限制，P2H 厂(站)利用 AEC 的可拓展性形成大容量多机集群系统。然而，现有调度运行框架研究难以保证 P2H 多机集群系统的性能最优。为此，提出了一种考虑效率优化的 P2H 多机集群系统调度运行框架，旨在提升系统效率并优化 AEC 间的功率分配。首先，分析了温度与负载率对产氢效率的影响，建立了包含辅机系统的 P2H 效率模型。然后，在此基础上构建了 P2H 多机集群系统效率优化模型，将其线性化为混合整数规划问题求解最优效率下各机组运行功率，并进一步提出 P2H 多机集群系统的优化调度模型。最后，基于 IEEE 33 节点配电网系统进行算例分析。结果表明，所提调度运行框架能降低系统运行成本，提升系统产氢效率和产氢量。研究成果可为 P2H 多机集群系统高效经济运行提供参考。

关键词：电制氢；碱性电解池；多机集群系统；调度运行框架；效率优化

Dispatch Operation Framework for Multi-electrolysis Cells Power to Hydrogen (P2H) Cluster System Considering of Efficiency Optimization

DONG Yannan[1], LI Xiangjun[2], HAN Zijiao[3], BAI Jintong[1], MA Shaohua[1]
(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. State Key Laboratory of Control and Operation of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract：Power-to-hydrogen (P2H) technology is a crucial technique for achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals and decarbonizing electricity. Due to the limitations capacity in alkaline electrolysis cell (AEC), P2H plants/stations utilize the inherent scalability of AEC to form large-capacity multi-electrolysis cells cluster system. However,according to existing research on dispatch operation frameworks, it is hard to ensure the optimal performance of cluster system. Therefore, a dispatch operation framework for P2H multi-electrolysis cells cluster system that considers efficiency optimization models is proposed, aiming to enhance system efficiency and optimize the power distribution among AECs. Firstly, the effects of temperature and loading rate on the efficiency of hydrogen production are analyzed, and an efficiency optimization model for P2H including auxiliary systems is established. Based on this, an efficiency optimization model for cluster system is constructed,in which the process is linearized into a mixed-integer programming problem to solve for the power distribution of each AEC under the optimal efficiency;moreover, an optimization scheduling framework for P2H cluster system is proposed. Finally, case studies are analyzed based on the IEEE 33-node distribution network system. The results show that the proposed dispatch operation framework can reduce system operating costs, enhance system hydrogen production efficiency, and increase hydrogen production. The research findings can provide references for the efficient and economical operation of P2H multi-electrolysis cells cluster system.

Key words：P2H; AEC; multi-electrolysis cells cluster system; scheduling operation framework; efficiency optimization

---

基金资助项目：国家重点研发计划政府间合作项目(基于高温电解水制氢联合生物气高效制甲烷的大型电网储能关键技术研究) (2021YFE0191200)；国网辽宁省电力有限公司科技项目(电制氢提升电力系统灵活性关键技术研究) (2021YF-81)。
Project supported by National Key R & D Program Intergovernmental Cooperation Project (2021YFE0191200), Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. (2021YF-81).

0 引言

在我国推进“双碳”目标和新型电力系统建设路径下，利用新能源电制氢(power to hydrogen, P2H)是促进新能源消纳，实现能源绿色低碳转型的重要途径[1-2]。随着新能源装机规模的不断增加，P2H电解池或将成为新型电力系统中最大的可调配柔性用电负荷[3]。P2H的经济成本较高，降低系统运行成本并提高转化链的整体效率是其规模化应用的关键[4]。

目前，主要的P2H电解池包括碱性电解池(alkaline electrolysis cell, AEC)、质子交换膜电解池，高温固体氧化物电解池和阴离子交换膜电解池等4类[5-7]。AEC因其成本低、操作简单及运行稳定等特点，适用于大规模新能源制氢场景[8-9]。然而，AEC存在产氢效率低、功率运行范围窄和成本较高等问题[10]。现阶段对于电解池效率提升方法的研究主要集中在其本体上，如优化电极材料[11]，改进催化剂结构等[12]。此外，文献[13-15]及先前的研究[16]重点关注了整流电源效率。然而，以上研究未全面考虑P2H辅机系统能量损失对效率的影响，也没有在电解池机组间协调运行层面提出有效的效率提升方法。

除电解池效率影响外，P2H技术的经济性和系统的调度模型直接相关。关于P2H在配电网及综合能源系统中的调度运行研究，文献[1,17-21]将电解池考虑为固定转换效率的常数线性模型，并未全面考虑电解反应的外特性与运行效率的关系。文献[22-23]进一步考虑了P2H电解池的外特性和效率运行特性，但其制氢过程电化学机理模型的数学形式不统一，且未考虑多个电解池运行时的优化策略。由于电解池单机容量的限制，P2H厂(站)通常利用电解池的可拓展性形成大容量多机集群系统[24]。文献[25]提出了P2H模块统一运行模型，并研究了3种P2H技术的选型与规划理论。在此基础上，文献[26]建立了考虑AEC氧中氢(hydrogen to oxygen, HTO)含量的碱性电制氢厂优化运行模型。对于电解池多机集群系统，文献[27]考虑了P2H多机集群调度的不确定性，并提出了统一求解框架。文献[28]考虑AEC的功率调节特性与启停特性，提出了离网型AEC多机轮值策略，延长了AEC的寿命。进一步，文献[29]在分析电解池单机运行基础上，提出考虑多工况组合的综合能源系统优化调度，通过多工况快速切换提高系统的经济性。上述研究从分散到统一、从单一到集群的方式研究了P2H多机集群系统的建模与调度运行，但系统的产氢效率的优化有待进一步考虑。因此，探究P2H多机集群系统的效率特性，正确的处理机组间的不均匀性，明智的分配机组间功率，能够提高氢气产量与系统经济性。

本文建立了计及电解特性与辅机系统效率的AEC效率优化模型，提出了考虑效率优化的P2H多机集群系统调度运行框架，主要贡献在于：

1）揭示了与温度与电流密度对制氢效率的影响，全面分析了P2H系统主要能耗环节。建立了AEC及其辅机设备的效率模型，并推导效率表达式，确定电解池最优效率曲线。

2）提出计及电解特性与辅机系统效率的P2H多机集群系统稳态效率优化模型，包括AEC机组间功率分配以及开关策略。

3）提出了考虑效率优化的P2H多机集群系统调度运行框架，并基于IEEE 33节点配电网验证其在调度系统的有效性。

本文首先介绍了典型P2H多机集群系统结构；然后，建立AEC及其辅机设备的效率模型，并提出计及电解特性的AEC多机集群系统最优效率模型；在此基础上提出考虑效率优化的P2H多机集群系统调度运行框架，以最小化系统运行成本；最后，基于33节点配电网算例进行仿真计算，重点分析P2H机集群系统在不同场景下的产氢效率与经济效益。

1 P2H多机集群系统结构

典型的P2H多机集群系统包括电解池与辅机系统。系统中的电解池为碱性电解池，辅机设备包括泵组、储水罐、AC-DC整流器、压缩机及热回收换热器，系统结构如图1所示。其中，P2H多机集群系统中的单机电解池与辅机系统采用“一拖一”形式配置以提高系统的可靠性及灵活性。单机电解池与辅机系统可视为一个AEC电制氢模块，各个模块间通过并联形成集群。P2H多机集群系统接收配电网调度指令，利用新能源机组的清洁电能制氢。系统通过整流器将交流电转换为直流电输入AEC生成氢气、氧气，并通过压缩机存入储氢罐，供给后端用氢需求。水循环回路一方面通过循环泵为AEC提供碱性溶液，另一方面配合换热器对AEC散热，以控制运行温度。在上述环节中，泵组耗能、干燥、冷却等环节耗能占比较低，本文忽略此部分

损耗，仅分析 AEC 以及辅机系统中的整流器、压缩机效率。通过控制辅机系统来控制 AEC 的功率及运行温度。常见的 P2H 整流器控制方式有相位控制与 PI 控制，用以控制 AEC 的输入功率[30]，运行温度则通过调节换热器阀门开角控制[31]。

2 P2H 多机集群系统效率优化方法

2.1 AEC 及其效率模型

本文 P2H 多机集群系统采用 AEC 作为研究对象。AEC 通常由多个电压小室串联，电压小室的端电压由可逆电压、欧姆过电压与活化过电压之和组成[32]，其外特性方程如式(1)所示。

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + U_{\text{act}} + U_{\text{ohm}} \tag{1}$$

式中：U_{cell}为电压小室的端电压；U_{rev}为可逆电压，指电解池电极反应达到平衡时所需的最小电压；U_{act}为活化过电压，是温度相关的函数；U_{ohm}为欧姆过电压，是温度和压力相关的函数。

$$U_{\text{act}} = s \cdot \lg\left(\left(\lambda_1 + \frac{\lambda_2}{T} + \frac{\lambda_3}{T^2}\right) \cdot j_{\text{cell}} + 1\right) \tag{2}$$

$$U_{\text{ohm}} = ((r_1 + d_1) + r_2 \cdot T + d_2 \cdot p) \cdot j_{\text{cell}} \tag{3}$$

式中：s、λ_1、λ_2、λ_3为过电压系数；T为 AEC 温度；j_{cell}为 AEC 电流密度；p为 AEC 压力；d_1和d_2为压力系数；r_1和r_2为温度系数。

在 AEC 的电解反应过程中，电解池阳极出口 HTO 含量的变化是由反应过程杂质累积引起的动态过程。其中，HTO 应保持在 0%~2%范围内，AEC 在此安全运行范围内运行。AEC 中的 HTO 含量H_{HTO}如式(4)所示[33]。

$$\begin{aligned} H_{\text{HTO}} = {} & (C_1 + C_2 T + C_3 T^2 + (C_4 + C_5 T + C_6 T^2) \cdot \\ & \exp\left(\frac{C_7 + C_8 T + C_9 T^2}{j_{\text{cell}} A_{\text{cell}}}\right)) + \\ & (E_1 + E_2 p + E_3 p^2 + (E_4 + E_5 p + E_6 p^2) \cdot \\ & \exp\left(\frac{C_7 + C_8 p + C_9 p^2}{j_{\text{cell}} A_{\text{cell}}}\right)) \end{aligned} \tag{4}$$

式中：A_{cell}为电解池面积；C_1—C_9为温度对 HTO 影响的常数系数；E_1—E_9为压力对气体纯度影响的常数系数(由经验参数给出)。

基于上述理论分析，AEC 的外特性与 j_{cell}、T和压力相关，得到外特性曲线如图 2 所示。

由图 2 可知，AEC 的电压与其电流密度正相关，且当电流密度增大到一定水平后近似呈线性关系。AEC 的 HTO 随电流密度的增大而减小，随温度的升高而增大。对于本文所建 AEC 模型，当电流密度水平大于额定电流密度的 10%时，HTO 保持在 0~2%的安全运行范围内。

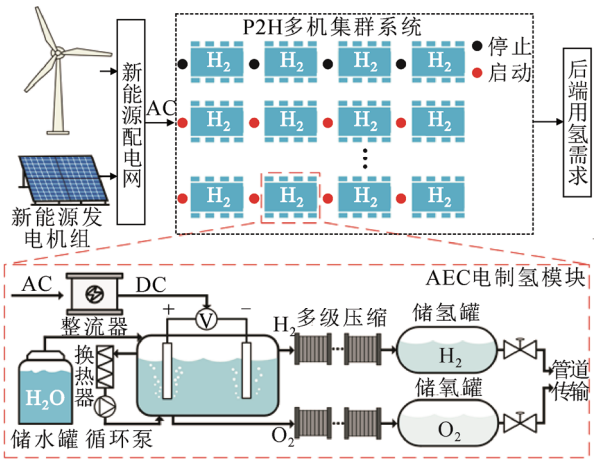


图 1 P2H 多机集群系统结构

Fig.1 The structure of the P2H multi-electrolysis cells cluster system

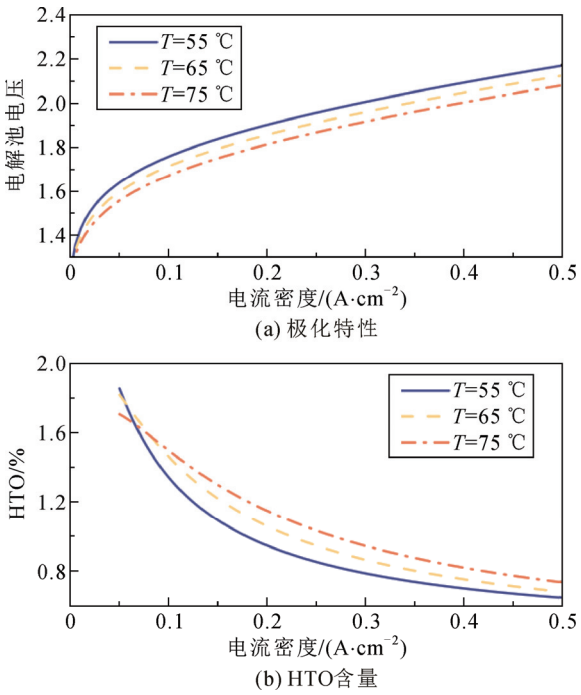


图 2 碱性电解池外特性

Fig.2 The external characteristics of AEC

此外，考虑到 AEC 的电解特性，其反应过程热环节分为两个阶段，即端电压处于吸收热量阶段(1.229~1.481 V)与热回收阶段(1.481 V~U_{cell})。本文考虑两阶段热环节效率模型如式(5)—(6)所示。

$$\eta_{\text{hy,heat}} = \Delta H_{\text{LHV}} \Big/ \left(\Delta H_{\text{HHV}} + p_{\text{wa}}\left(\frac{1}{p_{\text{hy}}} + \frac{1}{2p_{\text{ox}}}\right)\Delta H_{\text{vap}}\right) \tag{5}$$

$$\eta_{\text{hy,u}} \approx U_{\text{LHV}} / U_{\text{cell}} = 1.253\ \text{V} / U_{\text{cell}} \tag{6}$$

式中：$\eta_{\mathrm{hy,heat}}$为吸收热量阶段制氢效率；$\eta_{\mathrm{hy,u}}$为热回收阶段制氢效率；ΔH_{LHV}为氢气低热值焓变；ΔH_{HHV}为氢气高热值焓变；ΔH_{vap}为蒸发热焓变；p_{wa}为水分压；p_{hy}为氢分压；p_{ox}为氧分压；U_{LHV}为氢气低热值焓变等效电压。

同时，在 P2H 过程中使用法拉第效率来评估 AEC 产氢的效率，其效率模型如式(7)所示。

$$\eta_{\mathrm{F}}=\frac{\left(\nu_{\mathrm{hy}}-\nu_{\mathrm{re}}\right)\Delta H_{\mathrm{LHV}}}{\nu_{\mathrm{hy}}\Delta H_{\mathrm{LHV}}}=\frac{j_{\mathrm{cell}}-j_{\mathrm{x}}}{j_{\mathrm{cell}}}=1-\frac{j_{\mathrm{x}}}{j_{\mathrm{cell}}} \tag{7}$$

式中：η_{F}为法拉第效率；ν_{hy}为制氢速率；ν_{re}为逆反应速率；j_{x}为交换电流密度。

2.2 P2H 辅机效率模型

2.2.1 P2H 整流器效率模型

AEC 是典型低电压大电流负载，PWM 整流器因其输出纹波低、功率因数高及损耗小等优势被用作制氢电源。PWM 整流器的建模与控制方法可见先前的研究[16]，其效率模型可由开关损耗和通态损耗表示[34]，如式(8)所示。

$$\eta_{\mathrm{PWM}}=\frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}}=\frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{out}}+U_{\mathrm{ce}}\cdot I_{\mathrm{c\text{-}ave}}+f_{\mathrm{s}}\cdot\left(P_{\mathrm{on}}+P_{\mathrm{off}}\right)} \tag{8}$$

式中：P_{out}为整流器的输出功率；P_{in}表示整流器的输入功率；η_{PWM}为整流器的效率；U_{ce}为 IGBT 导通时的饱和电压；$I_{\mathrm{c\text{-}ave}}$为 IGBT 平均集电极电流；$f_{\mathrm{s}}$为开关频率；$P_{\mathrm{on}}$为 IGBT 开通损耗；$P_{\mathrm{off}}$为 IGBT 关断损耗。

$$P_{\mathrm{on}}=\int_{t_{\mathrm{on1}}}^{t_{\mathrm{on2}}}U_{\mathrm{cp\text{-}on}}(t)\cdot I_{\mathrm{c\text{-}on}}(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

$$P_{\mathrm{off}}=\int_{t_{\mathrm{off1}}}^{t_{\mathrm{off2}}}U_{\mathrm{cp\text{-}off}}(t)\cdot I_{\mathrm{c\text{-}off}}(t)\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中：$t_{\mathrm{on1}}/t_{\mathrm{off1}}$和 $t_{\mathrm{on2}}/t_{\mathrm{off2}}$分别为开通/关断过程开始与结束时刻；$U_{\mathrm{cp\text{-}on}}(t)$和 $U_{\mathrm{cp\text{-}off}}(t)$分别为开通/关断过程集电极-发射极电压；$I_{\mathrm{c\text{-}on}}(t)$和 $I_{\mathrm{c\text{-}off}}(t)$分别为开通/关断过程集电极电流。

2.2.2 P2H 压缩机效率模型

压缩机是电制氢系统中的关键辅机，通常采用多级往复式压缩机，将电解池产生的氢气压缩至数兆帕到数十兆帕的储氢罐中。本文建模考虑其为多级等比压缩，且压缩机的吸气温度为 90 ℃[35]。压缩环节的能量损耗影响 P2H 系统效率，故该环节的效率模型如式(11)—(13)所示[36-37]。

$$\eta_{\mathrm{com}}=1-\frac{W_{\mathrm{com}}\gamma_{\mathrm{c}}}{\left(\nu_{\mathrm{hy}}-\nu_{\mathrm{re}}\right)\Delta H_{\mathrm{LHV}}}\cdot\frac{1}{\eta_{\mathrm{c}}} \tag{11}$$

$$W_{\mathrm{com}}=\frac{\kappa}{\kappa-1}\left(\nu_{\mathrm{hy}}-\nu_{\mathrm{re}}\right)RT_{\mathrm{in}}\theta\left(c_{\mathrm{c}}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}-1\right) \tag{12}$$

$$\gamma_{\mathrm{c}}=\frac{\lg\dfrac{p_{\mathrm{com}}}{p_{\mathrm{hy}}}}{\lg c_{\mathrm{c}}} \tag{13}$$

式中：η_{com}为压缩环节效率；W_{com}是压缩环节单级压缩功率；γ_{c}为压缩环节压缩级数；η_{c}为单级压缩效率；κ为氢气绝热系数；R为氢气气体常数；T_{in}为压缩环节前氢气的温度；θ为压缩因子；c_{c}为单级压缩比；p_{com}为储氢压强。

至此，完成 P2H 系统及其效率模型建模，具体参数见表 1。

2.3 计及电解特性的 AEC 最优效率模型

2.3.1 总效率模型

在本文考虑的电解池两阶段热环节效率模型基础上，叠加法拉第效率、整流器效率与压缩机效率，可得计及电解特性的 AEC 及其辅机系统总效率模型如式(14)所示。

$$\eta_{\mathrm{AEC}}=\min\left(\eta_{\mathrm{hy,heat}},\eta_{\mathrm{hy,u}}\right)\eta_{\mathrm{F}}\eta_{\mathrm{PWM}}\eta_{\mathrm{com}} \tag{14}$$

式中：η_{AEC}为 AEC 及辅机系统的总效率。

此外，多个电压小室串联组成 AEC 堆栈，其表达式如式(15)所示。

$$\begin{cases}U_{\mathrm{AEC}}=n\cdot U_{\mathrm{cell}}\\P_{\mathrm{AEC}}=k\cdot U_{\mathrm{AEC}}\cdot j_{\mathrm{cell}}\cdot A_{\mathrm{cell}}\end{cases} \tag{15}$$

式中：U_{AEC}为电解池电压；n为电解池电压小室个数；P_{AEC}为电解池总功率；k为电解池个数。

基于 2.1 节中对电解池外特性的分析，本文设

表 1 P2H 系统参数

Table 1 Parameters of P2H system

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	1	运行温度/℃	30~90
电解液质量分数/%	30~40	U_{rev}/V	1.229
p/bar	5	A_{cell}/m^2	0.1
z	2	F/(C·mol^{-1})	96 485
s/V	0.338 24	λ_1/(m^2·A^{-1})	−0.015 39
λ_2/(m^2·℃·A^{-1})	2.001 81	λ_3/(m^2·℃·A^{-1})	15.241 78
d_1/(Ω·m^2)	$-3.129\,96\times10^{-6}$	d_1/(Ω·m^2·bar^{-1})	$4.471\,37\times10^{-7}$
c_{c}	2.75	T_{in}/℃	90
κ	1.4	η_{c}	0.825
C_1	0.099 01	C_2/℃$^{-1}$	−0.002 07
C_3/℃$^{-2}$	$1.310\,64\times10^{-5}$	C_4	−0.084 83
C_5/℃$^{-1}$	0.001 79	C_6/℃$^{-2}$	$-0.133\,9\times10^{-5}$
C_7/(A·m^{-2})	1 481.45	C_8/(A·m^{-2}·℃$^{-1}$)	−23.603 45
C_9/(A·m^{-2}·℃$^{-2}$)	−0.257 74	E_1	3.714 17
E_2/bar^{-1}	−0.930 63	E_3/bar^{-2}	0.058 17
E_4	−3.720 68	E_5/bar^{-1}	0.932 19
E_6/bar^{-2}	−0.058 26	E_7/(A·m^{-2})	−18.382 15
E_8/(A·m^{-2}·bar^{-1})	5.873 16	E_9/(A·m^{-2}·bar^{-2})	−0.464 25

定单机 AEC 的额定功率为 1 MW，运行负载率为 10%~100%。其中，负载率在 10%~30%时 AEC 可短时运行，短时运行期间采用气体分离装置提纯氢气，确保系统的可靠性[32]。碱性电解池的运行方式如图 3 所示。

为进一步探索 AEC 的效率优化模型，基于 AEC 及其辅机系统总效率模型与表 1 系统参数，设定 AEC 的温度变化范围为 30~90 ℃，绘制单机容量 1 MW 的 AEC 关于负载功率及温度的效率曲面如图 4 所示。

由图 4 可知，AEC 的总效率由考虑电解特性的 AEC 效率(两阶段热环节效率)、法拉第效率、整流器效率与压缩机效率叠加而成，其效率并非随负载率和温度单调变化。叠加后的总效率曲面如图 5 所示，90 ℃效率曲线如图 5 所示，考虑两阶段电解特性的单台 AEC 最优效率曲线如图 5 所示。

由图 5 可知，单机 AEC 的效率并非随负载率与运行温度单调变化，在负载率较低时高温反而降低系统效率。当负载率较高时，AEC 效率随运行温度的升高而升高。过高的温度会加速 AEC 老化，减少 AEC 使用寿命，因此运行温度通常由换热器控制在 90 ℃以下。

2.3.2 P2H 多机集群系统稳态效率优化模型

基于以上分析，AEC 的实际工作点对其效率影响较大，对 P2H 多机集群系统产氢效率优化，有助于明智决策各 AEC 机组负载率。对于 k 个 AEC 的 P2H 多机集群系统，建立最大 AEC 效率模型目标函数如式(16)所示。其中，l 代表配电网节点；x 代表 AEC 编号；t 代表日内运行时段。

$$g=\max\left(\frac{\sum_{i=1}^{k}P_{l,x,t}\eta_{l,x,t}s_{l,x,t}}{\sum_{i=1}^{k}P_{l,x,t}}\right) \tag{16}$$

式中：$P_{l,x,t}$ 为单机 AEC 在 t 时刻的功率；$\eta_{l,x,t}$ 为第 x 个 AEC 的效率；$s_{l,x,t}$ 为第 x 个 AEC 的启停状态。

约束条件如式(17)所示。

$$\begin{cases}0.1P_{\max l,x,t}\le P_{l,x,t}\le P_{\max l,x,t}\\ \sum_{i=1}^{k}P_{l,x,t}s_{l,x,t}\le\sum_{i=1}^{k}P_{l,x,t},s_{l,x,t}\in(0,1)\end{cases} \tag{17}$$

式中：$P_{\max,l,x,t}$ 为 AEC 的运行功率上限。

以上效率优化函数适用于 P2H 多机集群系统，基于 MATLAB 实现并使用 CPLEX 求解器求解。本文以 4 台 AEC 的 P2H 多机集群系统为例，图 6 为求解后的 AEC 机组效率优化策略效率曲线与传统效率曲线对比。

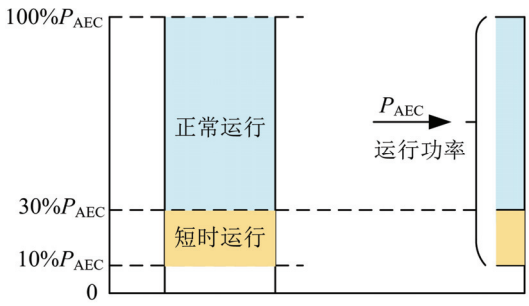


图 3 碱性电解池运行方式

Fig.3 The operating range of the AEC

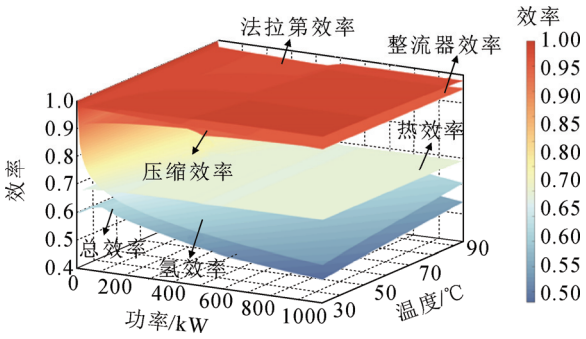


图 4 AEC 效率曲面

Fig.4 The efficiency curve of AEC

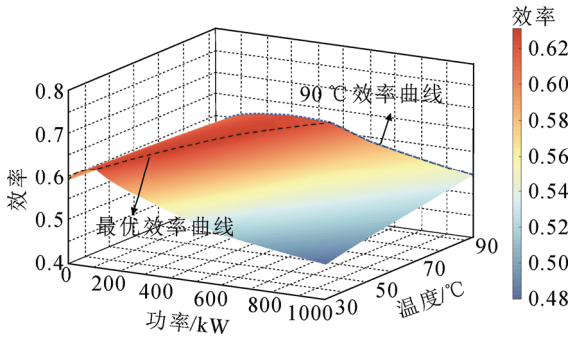


图 5 碱性电解池电制氢系统最优效率曲线

Fig.5 The optimal efficiency curve of AEC

由图 6 可知，相比依次启动效率曲线，所提优化效率模型系统效率提升约 0~7.5%。相比 90 ℃效率曲线，所提效率优化模型系统效率提升约 0~2%，同时将 P2H 多机集群系统的工作范围由 400~4 000 kW 提升至 100~4 000 kW。综上，所提效率模型兼顾依次启动及 90 ℃效率曲线的优点，在提升效率的同时避免了功率不足时出现的大面积停机。

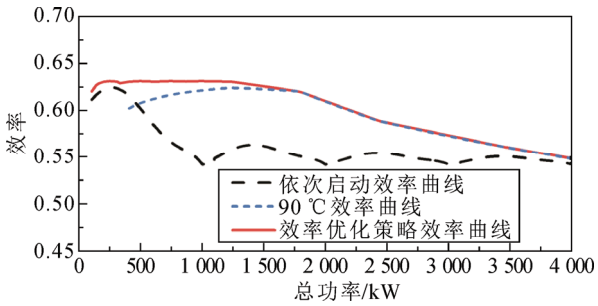


图 6 不同策略 P2H 效率曲线对比

Fig.6 Comparison of efficiency curves for different strategies in P2H

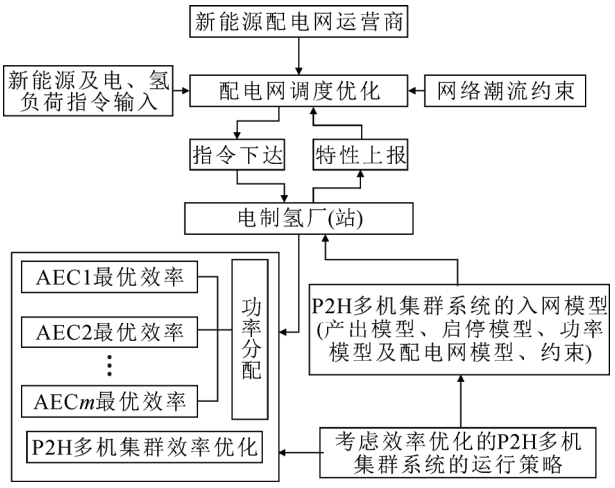


图 7 电制氢多机集群系统配电网调度方案

Fig.7 Dispatch scheme for multi-electrolysis cells cluster system in P2H distribution networks

3 配电网 P2H 多机集群系统调度模型

至此，本文已完成计及电解特性的单机 AEC 最优效率模型及 P2H 多机集群系统稳态效率优化模型研究。基于此，将多机集群 AEC 作为灵活性负荷建模至配并电网参与配电网调度运行，调度方案如图 7 所示。

由图 7 可知，新能源配电网接收新能源及电、氢负荷输入指令后，经辐射网络将新能源及主网出力分配至各节点负荷。对于 P2H 多机集群系统入网模型，AEC 内部控制优化确保其内部工况变量（j_{cell} 和 T）最优，以达到电解池最优效率。在此基础上，电制氢厂（站）所在节点通过接受配电网调度指令后，依据本文提 P2H 多机集群系统稳态效率优化模型优化下层 AEC 多机组运行模式，进一步分配各机组负载率，以提升产氢量及配电网运行收益。机组间协调分配即在内部最优约束下最小化系统运行成本，可看作双层优化问题，通过消去工况变量以最优效率曲线代替下层问题以降低求解维度。

3.1 电制氢电解池机组运行模型

1）产出模型

当 P2H 多机集群系统的工作电流达到最优时，其内部 AEC 的工作电流 $I_{l,x,t}$ 也是最优的。AEC 处于开机状态时，其产出模型可由式(18)表示。

$$I_{l,x,t} = s_{l,x,t} f(P_{l,x,t}) \tag{18}$$

式中：$f(P_{l,x,t})$表示 AEC 的电解反应特性。

2）启停模型

AEC 的启停动作与工作状态关系见式(19)。

$$y_{l,x,t} - z_{l,x,t} = s_{l,x,t} - s_{l,x,t-1} \tag{19}$$

式中：$y_{l,x,t}$ 为 AEC 开始启动动作指示变量；$z_{l,x,t}$ 表示 AEC 开始关停动作指示变量。

AEC 不能同时开启与关闭，且 AEC 的初始工作状态与日内最后一个时段工作状态相关。其约束可表示为式(20)—(21)。

$$y_{l,x,t} + z_{l,x,t} \le 1 \tag{20}$$

$$s_{l,x,0} = s_{l,x,\tau} \tag{21}$$

式中：τ 为为典型日对应的时刻。

3）功率模型

考虑到 AEC 自身外特性的影响，其运行区间、爬坡能力模型如式(22)—(23)所示。

$$s_{l,x,t} P_{\min} \le P_{l,x,t} \le s_{l,x,t} P_{\max} \tag{22}$$

$$0 \le \left| P_{l,x,t} - P_{l,x,t-1} \right| \le \Delta P_{\max} \tag{23}$$

式中：$\Delta P_{\max}$ 为 AEC 在单位时间内的最大爬坡能力；$P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为 AEC 功率下限和上限。

3.2 目标函数与约束条件

1）目标函数

所提 P2H 多机集群系统调度框架的决策目标是最小化配电网系统全调度周期运行成本，目标函数主要包括主网购电成本、AEC 启停成本及售氢收益，其余决策变量包括新能源日内发电、各时段计划电、氢负荷及电、氢价格。系统的目标函数如式(24)所示。

$$\min C_{\text{OPEX}} = C^{\text{oc}} + C^{\text{main}} - C^{\text{hy}} \tag{24}$$

式中：C_{OPEX} 为系统运行成本；C^{oc} 为 AEC 运行过程中的启停成本；C^{main} 为主网购电成本；C^{hy} 为售氢收益。

其中，

$$C^{\text{oc}} = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{l \in \Omega^{\text{P2H}}} (c^{\text{open}} y_{l,x,t} + c^{\text{close}} z_{l,x,t}) \tag{25}$$

$$C^{\text{main}}=\sum_{t=1}^{\tau}\sum_{l\in\Omega^{\text{P2H}}}c^{\text{elec}}P_{l,x,t}^{\text{main}}\Delta t \tag{26}$$

$$C^{\text{hy}}=c^{\text{hy}}\sum_{t=1}^{\tau}\sum_{l\in\Omega^{\text{P2H}}}P_{l.x,t}^{\text{out}}\Delta t \tag{27}$$

式中：c^{open}为 AEC 单位启动成本；c^{close}为 AEC 单位关闭成本；c^{elec}为购电单价；$P_{l,x,t}^{\text{main}}$为 AEC 在 t 时刻的购电功率；c^{hy}为售氢单价；$P_{l,x,t}^{\text{out}}$为 AEC 在 t 时刻的制氢功率；Δt 为时间步长。

2）约束条件

风电、光伏新能源日内实际出力不应大于其资源上限，主网出力应小于其上限,约束如式(28)—(29)所示。

$$P_{l,t}^{\text{ne}}\le P_{l,t}^{\text{ne,avail}} \tag{28}$$

$$\begin{cases}0\le P_t^{\text{g}}\le P^{\text{g,max}}\\0\le Q_t^{\text{g}}\le Q^{\text{g,max}}\end{cases} \tag{29}$$

式中：$P_{l,t}^{\text{ne}}$为 l 节点 t 时刻新能源出力；$P_{l,t}^{\text{ne,avail}}$为 l 节点 t 时刻新能源出力上限；P_t^{g}为 t 时刻主网输出有功功率；Q_t^{g}为 t 时刻主网输出无功功率；$P^{\text{g,max}}$为主网输出有功功率上限；$Q^{\text{g,max}}$为主网输出无功功率上限。

对于风电、光伏等新能源约束，因本文的核心研究内容与创新点为考虑电解池效率优化的 P2H 多机集群系统调度运行模型，而风电、光伏等新能源的不确定性为配电网系统带来的功率变化只会对 P2H 系统的总输出功率调度结果产生影响，不会对多机集群系统内部 AEC 机组间功率分配产生影响。故本文所提调度运行框架依然适用于考虑风光不确定性影响的情况。

电解池是电制氢多机集群系统的核心电-氢转换设备，可将富余的新能源发电转换为氢能，改写 3.1 节中部分模型进一步得到约束如式(30)—(32)所示。

$$P_{l,x,t}=f(\eta_{\text{AEC}l,x,t}) \tag{30}$$

$$0\le P_{\text{up}l,x,t}\Delta t\le\min(P_{\max l,x,t}^{\text{up}},P_{l,x,t}\Delta t) \tag{31}$$

$$0\le P_{\text{down}l,x,t}\Delta t\le\min(P_{\max l,x,t}^{\text{down}},P_{l,x,t}\Delta t) \tag{32}$$

式中：$\eta_{\text{AEC}l,x,t}$为 AEC 的在 t 时刻的运行效率；$P_{\text{up}l,x,t}$为 AEC 向上爬坡功率；$P_{\text{down}l,x,t}$为电解池向下爬坡功率；$P_{\max l,x,t}^{\text{up}}$和$P_{\max l,x,t}^{\text{down}}$分别为电解池向上/向下爬坡功率最大值。

P2H 系统氢功率平衡需要满足 AEC 输出的氢功率与储氢罐输出的氢功率之和等于氢负荷与储氢罐输入的氢功率之和。此外，储氢罐输入、输出功率应不超过其自身容量，储氢罐中储存的能量不应大于其容量。约束如式(33)—(37)所示。

$$P_{l,t}^{\text{hs,out}}+P_{l,t}^{\text{ed,out}}=P_{l,t}^{\text{hs,in}}+H_{l,t}^{\text{load}} \tag{33}$$

$$0\le P_{l,t}^{\text{hs,in}}\le x_l^{\text{hs}}W_l^{\text{hs}} \tag{34}$$

$$0\le P_{l,t}^{\text{hs,out}}\le x_l^{\text{hs}}W_l^{\text{hs}} \tag{35}$$

$$S_{l,t}^{\text{hs}}\le x_l^{\text{hs}}W_l^{\text{hs}} \tag{36}$$

$$S_{l,0}^{\text{hs}}=S_{l,24}^{\text{hs}} \tag{37}$$

式中：$P_{l,t}^{\text{hs,out}}$为 l 节点 t 时刻储氢罐输出功率；$P_{l,t}^{\text{ed,out}}$为 l 节点 t 时刻电解槽输出功率；$P_{l,t}^{\text{hs,in}}$为 l 节点 t 时刻储氢罐输入功率；$H_{l,t}^{\text{load}}$为 l 节点 t 时刻氢负荷；W_l^{hs}为 l 节点储氢罐最大容量；x_l^{hs}为 l 节点储氢罐规划状态；$S_{l,t}^{\text{hs}}$为 l 节点 t 时刻储氢罐中的能量。

3.3 配电网潮流约束

配电网潮流约束主要包括电功率平衡约束、电压约束与传输容量约束。

1）配电网电功率平衡约束

电功率平衡需要保证流入节点的电功率等于流出节点的电功率和线路损耗之和。其中，流入节点的电功率包括前一节点流出的电功率和节点上新能源产生的电功率。流出节点的电功率包括传统负荷和节点上 AEC 消耗的电功率。配电网电功率平衡如式(38)所示。

$$\begin{cases}P_{bm,t}^{\text{out}}+P_{l,t}^{\text{ne}}=P_{l,t}^{\text{load}}+P_{l,t}^{\text{P2H}}+P_{ml,t}^{\text{out}}+P_{ml,t}^{\text{loss}}\\Q_{bm,t}^{\text{out}}+Q_{l,t}^{\text{ne}}=Q_{l,t}^{\text{load}}+Q_{l,t}^{\text{P2H}}+Q_{ml,t}^{\text{out}}+Q_{ml,t}^{\text{loss}}\end{cases} \tag{38}$$

式中：$P_{bm,t}^{\text{out}}$和$Q_{bm,t}^{\text{out}}$为 t 时刻支路 bm 流出的有功功率和无功功率；$P_{l,t}^{\text{ne}}$和$Q_{l,t}^{\text{ne}}$为 t 时刻节点 l 输入新能源的有功功率和无功功率；$P_{l,t}^{\text{load}}$和$Q_{l,t}^{\text{load}}$为 t 时刻节点 l 的传统有功功率负荷和传统无功功率负荷；$P_{l,t}^{\text{P2H}}$和$Q_{l,t}^{\text{P2H}}$为 t 时刻节点 l 的 AEC 有功功率负荷和无功功率负荷；$P_{ml,t}^{\text{out}}$和$Q_{ml,t}^{\text{out}}$为 t 时刻支路 ml 输出的有功功率和无功功率；$P_{ml,t}^{\text{loss}}$和$Q_{ml,t}^{\text{loss}}$为支路 ml 上的有功损耗和无功损耗。

2）电压约束

电压约束包括压降约束和电压极限约束。对于支路 ml，分别如式(39)—(40)所示。

$$(U_{l,t})^2=(U_{m,t})^2-2(r_{ml}P_{ml,t}+x_{ml}Q_{ml,t})+(r_{ml}^2+x_{ml}^2)I_{ml,t}^2 \tag{39}$$

$$U_{m,t}^2\le\frac{P_{ml,t}^2+Q_{ml,t}^2}{I_{ml,t}^2} \tag{40}$$

式中：$U_{l,t}$为 t 时刻 l 节点电压；$U_{m,t}$为 t 时刻 m 节点电压；$P_{ml,t}$为 t 时刻流过 ml 支路的有功功率；$Q_{ml,t}$

为 t 时刻流过 ml 支路的无功功率；r_{ml} 为 ml 支路电阻；x_{ml} 为 ml 支路电抗；$I_{ml,t}$ 为 t 时刻 ml 支路电流。

3）传输容量约束

由于新能源出力的波动性和不确定性大，考虑支路传输极限约束如式(41)所示。

$$\left\| \begin{matrix} P_{ml,t}-I_{ml,t}^2 r_{ml} \\ Q_{ml,t}-I_{ml,t}^2 x_{ml} \end{matrix} \right\| \le S_{ml}^{\text{cap}} \tag{41}$$

式中：S_{ml}^{cap} 为 ml 支路传输容量。

综上所述，本文所提优化调度框架模型中含非线性约束及大量零一决策变量，采用大 M 法将其松弛为线性混合整数规划问题便于快速求解。

4 算例分析

4.1 算例描述

本文将 P2H 多机集群系统作为配电网灵活性资源进行算例分析。在文献[38]中的 33 节点配电网的基础上，用 P2H 多机集群系统和风电场分别替换原系统的 7 和 5、15 节点，光伏系统替换原系统的 8、31 节点，替换后的 IEEE 33 节点拓扑结构如图 8 所示。其中，P2H 多机集群系统由 4 台 AEC 组成，单机容量为 1 MW，最低运行功率为 0.1 MW，AEC 运行参数如表 1 所示。电价与氢价如图 9 所示，典型日配电网传统负荷与风电功率如图 10 所示。研究基于 MATLAB2018b 平台建模，采用 YALMIP 工具包调用 CPLEX 求解器进行求解，仿真硬件环境为 i7-11700K CPU @ 3.60 GHz, Intel(R) Core (TM)。

为验证所提调度运行框架的有效性，本节基于以下 4 种典型场景建模并进行分析。

场景 1：P2H 多机集群系统 AEC 采用依次启动策略；

场景 2：P2H 多机集群系统 AEC 采用 90 ℃效率均分策略；

场景 3：P2H 多机集群系统 AEC 采用本文所提效率优化策略；

场景 4：P2H 多机集群系统 AEC 采用本文所提效率优化策略并分析 AEC 不均一情况。

4.2 调度结果分析

P2H 多机集群系统不同场景下的调度结果与制氢总量分别如表 2 所示。

由表 2 可知，场景 1 中 AEC 依次启动的日平均产氢效率与日产氢量明显低于场景 2、场景 3 和场景 4。场景 3 中本文所提策略日平均产氢效率比场景 1 高 4.6%，比场景 2 高 0.58%，日运行成本比场景 1 低 9.83%，比场景 2 低 0.62%。由此可见，所提策略日内运行结果具有更高的效率与经济效率。此外，在相同策略下 AEC 不均一的场景 4 具有更高的日平均产氢效率，这表明多样化 AEC 组合在分配机组负载时具有更灵活的特性，能够扩展系统的可行域。综上，场景 3 考虑了 AEC 多机集

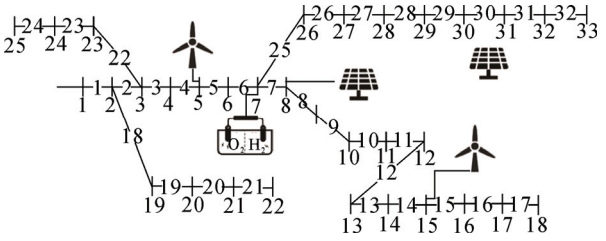


图 8 IEEE 33 节点系统拓扑结构

Fig.8 Topology of IEEE 33 bus system

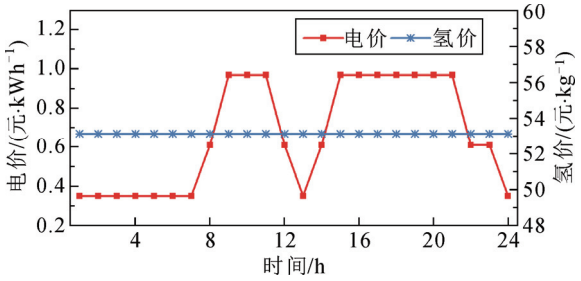


图 9 氢气价格与实时电价

Fig.9 Hydrogen price and real-time electricity price

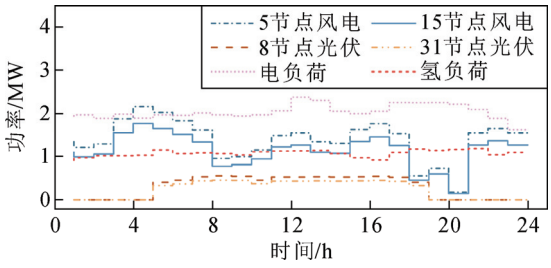


图 10 风电、光伏功率及电负荷、氢负荷分布

Fig.10 System parameters of WP, PV, electric load and hydrogen load

表 2 不同场景下的调度结果

Table 2 Scheduling results in different scenarios

调度情况	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
AEC 机组差异	无	无	无	产氢效率
优先关停机组	随机	随机	随机	低效机组
日运行成本/元	−23 674.18	−25 842.01	−26 001.90	−26 065.64
日平均产氢效率/%	55.16	59.18	59.76	60.31
日产氢量/kg	603.20	644.01	647.02	648.22

群效率优化模型及其变工况调度框架，具有更低的系统运行成本，其电功率和氢功率平衡关系如图 11 和图 12 所示。

由图 11 可知，风电与光伏是配电网系统的主要能量来源，在风电与光伏富余时段优先使用新能源电制氢。此外，在电价较低的 01:00—05:00 时段及负荷高峰 19:00—22:00 时段向主网购电。图 12 中，AEC 作为系统唯一产氢设备，在 00:00—07:00 时段、13:00—17:00 时段运行活跃，未供氢负荷的氢气由储氢罐储存，AEC 与储氢罐的协调运行提升了配电网系统的灵活性。

图 13 为场景 3 新能源配电网节点电压分布。

可以看出，在本文所提调度框架下新能源配电网的节点电压日内全时段始终保持在 0.9 p.u.到 1.1 p.u.的安全运行区间内。在促进新能源消纳、提升配电网系统灵活性的基础上，同时保证了系统的可靠性。

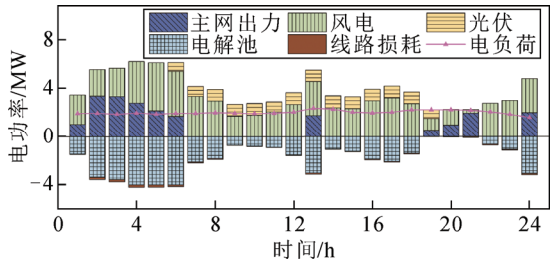


图 11 场景 3 电功率平衡

Fig.11 Electric power balance in Scenario 3

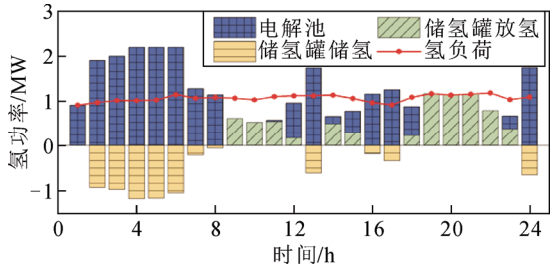


图 12 场景 3 氢功率平衡

Fig.12 Hydrogen power balance in Scenario 3

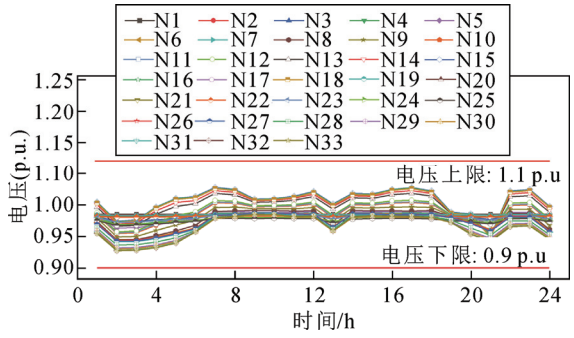


图 13 配电网系统节点电压分布

Fig.13 Node voltage of distribution network system

4.3 P2H 多机集群系统运行结果分析

P2H 多机集群系统接收到调度指令后，基于效率优化模型协调不同 AEC 机组间的负载分配。图 14—图 21 为各场景下 AEC 机组启停安排、负载分配、工况变量及运行结果情况。

场景 1 各 AEC 机组启停安排及负载率如图 14 所示。图 15 为场景 1 各 AEC 机组工况变量及运行结果。

由图 14 可知，在依次启动策略下，电解池 3 和电解池 4 在日内大部分时段处于关停状态，电解池 1 和电解池 2 开启时段几乎均为满功率运行。由于 AEC 的最大功率点并非是最高效率运行点，该运行方式下会降低系统产氢效率。由图 15 可知，在

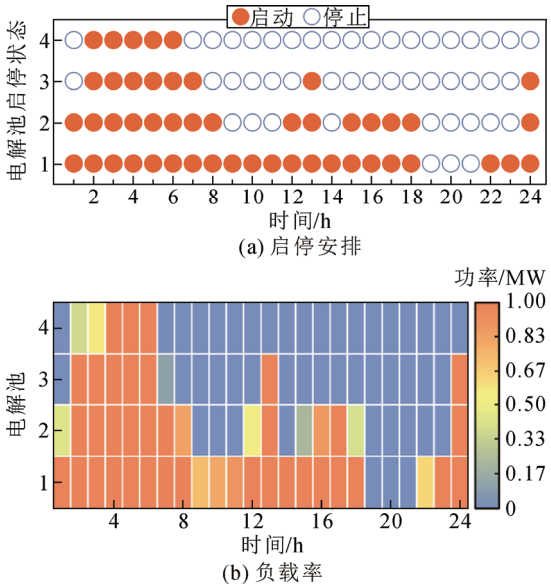


图 14 场景 1 下 AEC 机组启停安排与负载率

Fig.14 Start-stop schedule and load rate of AEC unit in Scenario 1

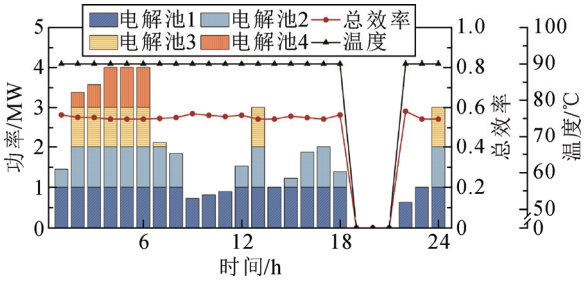


图 15 场景 1 下 AEC 机组变工况运行结果

Fig.15 Results of AEC unit operation under different conditions in Scenario 1

场景 1 下系统日平均产氢效率为 55.16%，AEC 温度始终维持在 90 ℃，系统日产氢量为 603.20 kg。

场景 2 各 AEC 机组启停安排及负载率见图 16。图 17 为场景 2 各 AEC 机组工况变量及运行结果。

由图 16 可知，电解池在新能源低谷及电价较高时段(19:00—21:00)被关停。由于场景 2 条件下 P2H 多机集群系统中的 AEC 是完全一致的，且关停时刻也相同，因此 AEC 同时关停并同时开启。考虑到资源分配的等边际法则，其余调度时段各电解池负载率也都是均一分配的。

由图 17 可知，在场景 2 下系统日平均产氢效率为 59.18%，AEC 温度始终维持在 90 ℃，系统日产氢量为 644.01 kg，该场景下策略表明相比场景 1，在资源分配等边际法则下平均分配负载功率有助于提高产氢效率。

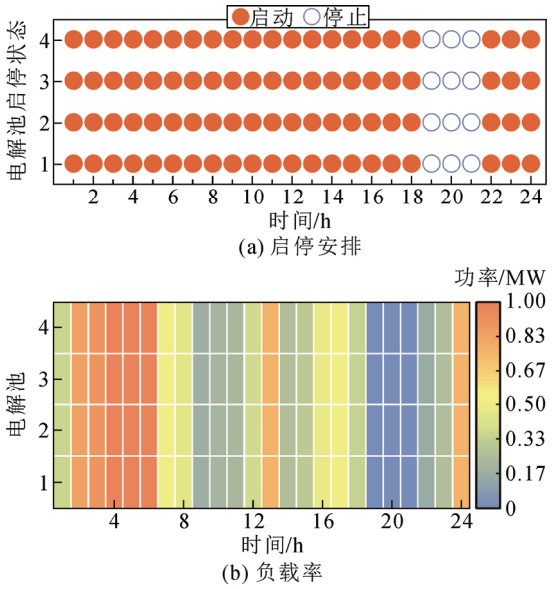


图 16 场景 2 下各 AEC 机组启停安排与负载率

Fig.16 Start-stop schedule and load rate of AEC unit in Scenario 2

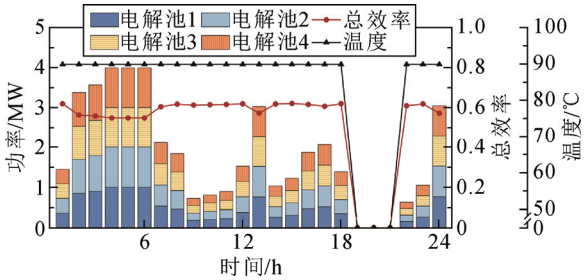


图 17 场景 2 下各 AEC 机组变工况运行结果

Fig.17 Results of AEC unit operation under different conditions in Scenario 2

场景 3 各 AEC 机组启停安排及负载率如图 18 所示。图 19 为场景 3 各 AEC 机组工况变量及运行结果。

由图 18 可知，电解池同时在新能源低谷及电价较高时段(19:00—21:00)被关停。由于考虑了优化效率模型对调度结果的影响，P2H 多机集群系统在负载率较低的调度时段依据优化结果控制各 AEC 机组的启停与功率。因场景 3 条件下 AEC 也是完全一致的，优先关停或启动的 AEC 是随机的，故电解池 3 和电解池 4 在电价较高时段(09:00—10:00 随机关停)。电解池依旧遵循资源分配的等边际法则，其余调度时段各电解池负载率也都是均一分配的。

同样的，在场景 3 下系统日平均产氢效率为 59.76%，比场景 1、场景 2 日平均产氢效率分别提

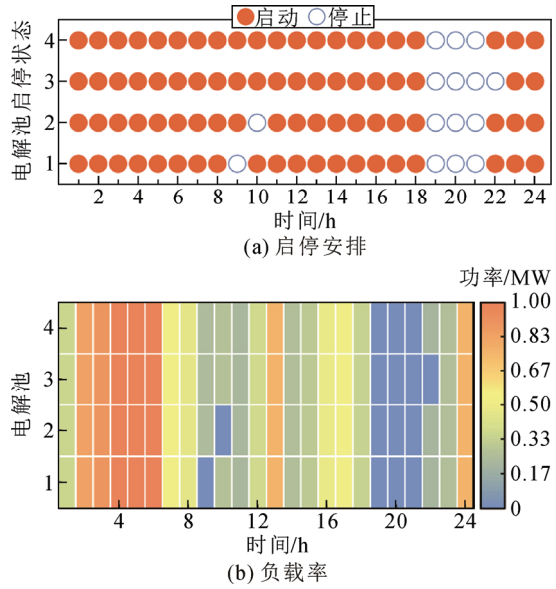


图 18 场景 3 下各 AEC 机组启停安排与负载率

Fig.18 Start-stop schedule and load rate of AEC unit in Scenario 3

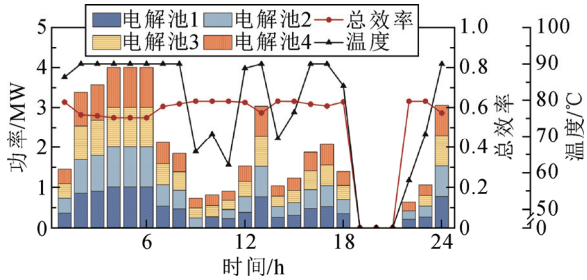


图 19 场景 3 下各 AEC 机组变工况运行结果

Fig.19 Results of AEC unit operation under different conditions in Scenario 3

高 4.6%和 0.58%。效率优化模型主要作用于 AEC 机组低负载率时段，AEC 温度控制在最优效率运行状态。系统日产氢量为 647.02 kg，比场景 1 和场景 2 产量分别提高了 43.82 kg 和 3.01 kg。

场景 4 各 AEC 机组启停安排及负载率如图 20 所示。图 21 为场景 4 各 AEC 机组工况变量及运行结果。

由图 20 和图 21 可知，电解池同时在新能源低谷及电价较高时段(19:00—21:00)被关停。该场景下，在电价较高时段始终优先关停电解池 2 (09:00—10:00 优先关停)，这是因为保持较高效的 AEC 能够提高系统总氢气产量。此外，开机电解池中负载率优先向电解池 1 集中，在整个调度时段电解池 1 的负载率始终为同调度时刻最高，该优化结果依旧遵循资源分配的等边际法则。

基于以上分析，优先集中开启效率较高的单机 AEC 能够提升多机集群系统日平均产氢效率及日氢气产量。场景 4 下系统日平均产氢效率为 60.31%，比场景 3 提高 0.55%。系统日产氢量为 648.22 kg，比场景 3 产量提高了 1.2 kg。

综上，本文所提 P2H 多机集群系统调度框架能够有效提升运行效率与氢气产量，且相较于 AEC 完全一致的系统，差异化的配置或许能达到更高的产量。

5 结论

本文建立了包含辅机系统的 P2H 效率模型，并在此基础上以效率最优为目标求解计算及电解特性的多机集群系统效率优化曲线，进一步提出系统优化调度框架。通过 IEEE 33 节点配电网进行算例分析，主要得出以下结论：

1）本文所提效率优化模型充分发挥了多机集群系统功率分配时的组合特性，相比传统平均分配策略增加了系统的运行功率范围，提升了系统的灵活性。

2）相比于传统 AEC 依次启动策略，本文所提考虑效率优化的系统调度框架日平均产氢效率提升 4.6%，相比于传统平均分配策略，日平均产氢效率提升 0.58%。相较于 AEC 完全一致的 P2H 多机集群系统，差异化 AEC 配置能够扩大系统可行域。

3）本文所提调度框架提升了经济性，相比于传统 AEC 依次启动策略，本文所提考虑效率优化的系统调度框架日运行成本降低 9.83%，相比于传统平均分配策略，日运行成本降低 0.62%。

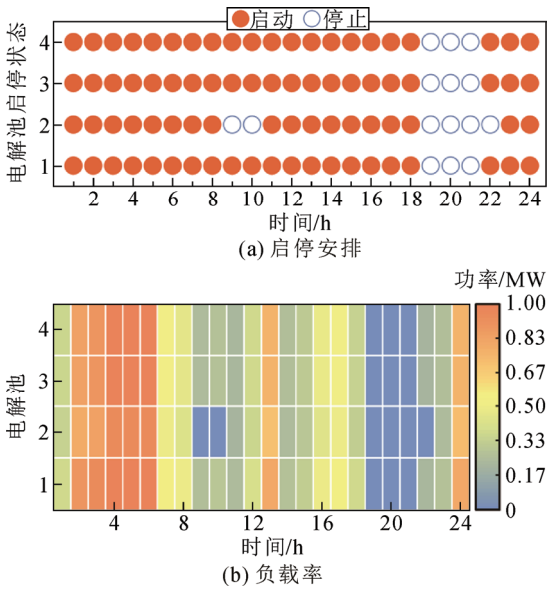


图 20 场景 4 下各 AEC 机组启停安排与负载率

Fig.20 Start-stop schedule and load rate of AEC unit in Scenario 4

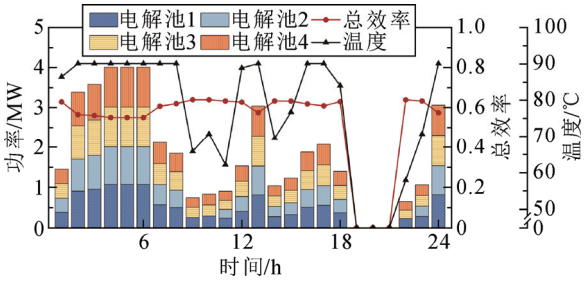


图 21 场景 4 下各 AEC 机组变工况运行结果

Fig.21 Results of AEC unit operation under different conditions in Scenario 4

后续的研究工作中将进一步改进 P2H 多机集群系统调度模型，并考虑将 P2H 过程产热及产氢下游供应链也纳入调度主体，形成综合能源网络调度实例。

参考文献 References

[1] 张 红，袁铁江，谭 捷，等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：83-93.
ZHANG Hong, YUAN Tiejiang, TAN jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-93.

[2] 潘光胜，顾 伟，张会岩，等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J]. 电力系统自动化，2020，44(23)：1-10.
PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accomodation of high proportion of

renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10.

[3] 邱一苇，吉　旭，朱文聪，等. 面向新能源规模化消纳的绿氢化工技术研究现状与关键支撑技术展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(18)：6934-6954.
QIU Yiwei, JI Xu, ZHU Wencong, et al. Research status of green hydrogen-based chemical engineering technology and prospect of key supporting technologies for large-scale utilization of new energies[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6934-6954.

[4] SONG S J, LIN H Y, SHERMAN P, et al. Production of hydrogen from offshore wind in China and cost-competitive supply to Japan[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6953.

[5] XING X T, LIN J, SONG Y H, et al. Modeling and operation of the power-to-gas system for renewables integration: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 168-178.

[6] 李建林，张则栋，李光辉，等. 基于模型层级分析的质子交换膜电解槽建模研究进展[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1105-1117.
LI Jianlin, ZHANG Zedong, LI Guanghui, et al. Research on modeling of proton exchange membrane electrolyzer based on model hierarchical analysis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1105-1117.

[7] 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.
WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Current status, challenges and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6680.

[8] OLIVIER P, BOURASSEAU C, BOUAMAMA P B. Low-temperature electrolysis system modelling: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 280-300.

[9] HU S, GUO B, DING S L, et al. A comprehensive review of alkaline water electrolysis mathematical modeling[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120099.

[10] 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 of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.

[11] DU Y, XIE F K, LU M F, et al. Continuous strain tuning of oxygen evolution catalysts with anisotropic thermal expansion[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1780.

[12] LIAO P S, KANG J W, ZHONG Y C, et al. Recent advances of two-dimensional metal-organic frameworks in alkaline electrolysis water for hydrogen production[J]. Science China Chemistry, 2023, 66(7): 1924-1939.

[13] KOPONEN J, RUUSKANEN V, KOSONEN A, et al. Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6171-6182.

[14] RUUSKANEN V, KOPONEN J, KOSONEN A, et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters[J]. Journal of Power Sources, 2020, 459: 228075.

[15] RUUSKANEN V, KOPONEN J, KOSONEN A, et al. Power quality estimation of water electrolyzers based on current and voltage measurements[J]. Journal of Power Sources, 2020, 450: 227603.

[16] 董雁楠，李相俊，韩子娇，等. 整流器拓扑结构与电解特性对质子交换膜电解池比能耗影响[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4131-4141.
DONG Yannan, LI Xiangjun, HAN Zijiao, et al. Effect of rectifier topology and electrolysis characteristics on specific energy consumption of proton exchange membrane electrolysis cell[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4131-4141.

[17] 陈锦鹏，胡志坚，陈颖光，等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：48-55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.

[18] 邓　杰，姜　飞，王文烨，等. 考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行[J]. 电网技术，2022，46(5)：1692-1702.
DENG Jie, JIANG Fei, WANG Wenye, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering electric-heat flexible load and hydrogen energy refined modeling[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1692-1702.

[19] PAN G S, GU W, LU Y P, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.

[20] WANG H X, CAI X Y, YANG Z H, et al. Optimized operation framework of distributed thermal storage aggregators in the electricity spot market[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2272-2283.

[21] 李　奇，赵淑丹，蒲雨辰，等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报，2021，36(3)：486-495.
LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.

[22] LI J R, LIN J, SONG Y H, et al. Operation optimization of power to hydrogen and heat (P2HH) in ADN coordinated with the district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1672-1683.

[23] 江岳文，杨国铭，陈宇辛，等. 考虑电解槽动态制氢效率的氢网运行优化[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：3014-3026.
JIANG Yuewen, YANG Guoming, CHEN Yuxin, et al. Optimal operation for the hydrogen network under consideration of the dynamic hydrogen production efficiency of electrolyzers[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3014-3026.

[24] XING X T, LIN J, SONG Y H, et al. Intermodule management within a large-capacity high-temperature power-to-hydrogen plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1432-1442.

[25] 李佳蓉，林　今，邢学韬，等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：4021-4032.
LI Jiarong, LIN Jin, XING Xuetao, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of power-to-hydrogen (P2H) modules in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4021-4032.

[26] QIU Y W, ZHOU B X, ZANG T L, et al. Extended load flexibility of utility-scale P2H plants: optimal production scheduling considering dynamic thermal and HTO impurity effects[J]. Renewable Energy, 2023, 217: 119198.

[27] 周步祥，吴晨旭，邱一苇，等. 计及光伏出力时序不确定性的电制氢多机集群优化调度[J]. 电力建设，2023，44(9)：108-117.
ZHOU Buxiang, WU Chenxu, QIU Yiwei, et al. Optimal scheduling of multi-electrolyzer power-to-hydrogen clusters considering the temporal uncertainty of photovoltaic power[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 108-117.

[28] 牛　萌，洪振鹏，李　蓓，等. 考虑制氢效率提升的风电制氢系统

优化控制策略[J]. 太阳能学报，2023，44(9)：366-376.
NIU Meng, HONG Zhenpeng, LI Bei, et al. Optimal control strategy of wind power to hydrogen system considering electrolyzer efficiency improvement[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 366-376.

[29] 陈朝旭，张亚超，朱 蜀，等. 考虑多电解槽多工况组合运行的电-氢-热综合能源系统优化调度[J/OL]. 电网技术，2024：1-11 [2024-04-07]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673. pst. 2023.2140.
CHEN Zhaoxu, ZHANG Yachao, ZHU Shu, et al. Optimal scheduling of electricity-hydrogen-heat integrated energy system considering combined operation of multi-electrolyzers under multiple conditions[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-11[2024-04-07]. https://doi.org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2023.2140.

[30] 郭小强，魏玉鹏，万燕鸣，等. 新能源制氢电力电子变换器综述[J]. 电力系统自动化，2021，45(20)：185-199.
GUO Xiaoqiang, WEI Yupeng, WAN Yanming, et al. Review on power electronic converters for producing hydrogen from renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 185-199.

[31] QI R M, LI J R, LIN J, et al. Thermal modeling and controller design of an alkaline electrolysis system under dynamic operating conditions[J]. Applied Energy, 2023, 332: 120551.

[32] 袁铁江，张江飞，滕 越. 基于虚拟同步机的新能源制氢系统协调控制策略[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-13[2024-04-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20230811.0904.002.html.
YUAN Tiejiang, ZHANG Jiangfei, TENG Yue. Coordinated control strategy of the renewable energy hydrogen production system based on VSG[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-13[2024-04-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230811.0904.002. html.

[33] SÁNCHEZ M, AMORES E, RODRÍGUEZ L, et al. Semi-empirical model and experimental validation for the performance evaluation of a 15 kW alkaline water electrolyzer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(45): 20332-20345.

[34] RASHID M H. Power electronics handbook[M]. 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2018.

[35] 周迎千，冯 霄，杨敏博. 基于压缩机选型的炼厂氢网络集成[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2023，63(5)：723-729.
ZHOU Yingqian, FENG Xiao, YANG Minbo. Synthesis of refinery hydrogen networks considering compressor types[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(5): 723-729.

[36] 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.

[37] 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.
HAN Pengfei, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Operational efficiency enhancement of multi-stack proton exchange membrane electrolyzer systems with power-temperature adaptive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2236-2248.

[38] [38]LI X J, WANG L J, YAN N, et al. Cooperative dispatch of distributed energy storage in distribution network with PV generation systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 0604304.



董雁楠(通信作者)
1992—，男，博士生
主要从事新能源电力系统运行控制、电能质量方面的研究工作
E-mail: bubblebazinga@foxmail.com

DONG Yannan
Ph.D. candidate
Corresponding author



李相俊
1979—，男，博士，教授级高工
主要从事大规模储能技术、智能电网、电动汽车、电工理论新技术方面的研究工作
E-mail: lixiangjun@epri.sgcc.com.cn

LI Xiangjun
Ph.D., Professor



马少华
1963—，女，博士，教授
主要从事新能源电力系统运行、可靠性技术方面的研究工作

MA Shaohua
Ph.D., Professor

收稿日期 2024-04-15 修回日期 2024-07-15 编辑 陈 蔓