Vol.43 No.12 Dec. 2023

# 考虑电解槽和蓄电池寿命衰减特性的分布式 电热氢系统优化调度策略

陈 杨<sup>1</sup>, 陈 健<sup>1</sup>, 张 文<sup>1</sup>, 倪筹帷<sup>2</sup>, 赵 波<sup>2</sup> (1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:可再生能源的强波动性会导致分布式电热氢系统中电解槽和蓄电池的寿命衰减加速,为了在提高分布 式电热氢系统经济性的同时延长电解槽和蓄电池的使用寿命,提出一种考虑电解槽和蓄电池寿命衰减特性 的分布式电热氢系统优化调度策略。分析电解槽和蓄电池的寿命衰减特性,建立电解槽和蓄电池的寿命衰 减模型;以综合提升分布式电热氢系统中电解槽和蓄电池寿命以及系统经济性为优化目标,建立考虑电解槽 和蓄电池寿命衰减特性的分布式电热氢系统优化调度模型,并利用场景生成法处理可再生能源和负荷的不 确定性。以一个包含多种能量转换和存储设备的分布式电热氢系统为例进行仿真,结果验证了所提策略的 有效性。

关键词:可再生能源;分布式电热氢系统;电解槽;蓄电池;寿命衰减特性 中图分类号:TM73 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202310029

## 0 引言

大量具有随机性和波动性的可再生能源接入电 网,给电网的安全稳定运行带来了挑战,如何高效利 用可再生能源来减少弃风弃光是一个重要问题。分 布式电热氢系统(distributed electric-thermo-hydrogen system, DETHS)作为一种灵活、高效的能源供 应模式,集成了多种能源和转换设备,能够有效整合 可再生能源和多元储能技术,实现可再生能源的高 效利用和多元负荷供应,从而实现能量的梯级利用 和系统的高效自治<sup>[16]</sup>。然而,DETHS在运行中面临 诸多问题,如可再生能源波动性导致的蓄电池<sup>[5]</sup>和 电解槽<sup>[7]</sup>的寿命衰减加速等问题,因此,需要对这些 问题进行深入研究,以提高系统的经济性以及延长 设备寿命。

电解槽作为电氢耦合的核心设备,将电能转化 为氢能,进而由储氢设备储存氢能。然而,电解槽在 长时间运行过程中会受到输入功率波动的影响,从 而导致其寿命衰减。目前,已有关于输入功率波动 对电解槽寿命影响的研究,变功率运行与恒功率运 行电解槽寿命衰减情况的对比结果显示,变功率运 行的电解槽衰减更快,波动幅度更大,且频率越快, 衰减越快<sup>[810]</sup>。文献[11]综述碱性电解槽和质子交 换膜电解槽在波动性电源输入下的性能衰退机制和 材料劣化机理;文献[12]提出一种电解槽阵列优化

收稿日期:2023-06-30;修回日期:2023-10-30 在线出版日期:2023-11-07 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0702200) Project supported by the National Key R&D Program of

China(2018YFA0702200)

控制策略,将电解槽工作状态分为额定功率、波动功 率和停机3种状态,提升了电解槽阵列的综合寿命, 但没有建立具体的电解槽寿命衰减模型;文献[13] 考虑电解槽长时运行的效率衰减及其输入功率波动 对电解槽耐久性的影响,建立电解槽全寿命周期成 本模型;文献[14]建立一种考虑不同运行工况下电 解槽的效率和寿命衰减模型,但没有考虑不同功率 波动强度下的电解槽寿命衰减情况。

蓄电池作为储能设备,在 DETHS 中起着削峰填 谷的关键作用,其寿命直接影响到系统的能量存储 和释放能力,对系统的经济性有重要影响。蓄电池 的寿命衰减与其充放电过程中的充放电速率和荷电 状态(state of charge,SOC)密切相关。充放电速率 越快,则蓄电池的寿命衰减越快,放电深度越深,对 其寿命影响越大<sup>[15-18]</sup>。文献[19]综合考虑蓄电池剩 余容量、充放电功率及充放电次数对其寿命的影响, 通过推导得出反映蓄电池每次放电损耗的数学模 型;文献[20]将蓄电池寿命损耗带来的经济损失加 入经济调度计算模型中,在提升系统经济性的同时 延长了蓄电池寿命;文献[21]考虑蓄电池充放电深 度和次数对其寿命的影响,利用加权吞吐量法建立 蓄电池寿命评价模型,并在分布式电源的优化配置 评价指标中考虑蓄电池寿命。

综上,现有文献已对蓄电池寿命衰减特性的建 模和量化进行较多研究,但较少研究电解槽的寿命 衰减特性及其建模和量化,且较少同时考虑电解槽 和蓄电池的寿命衰减特性。电解槽的寿命衰减主要 受电解槽功率波动和电解槽启停的影响,体现在效 率的降低;蓄电池的寿命衰减受充放电深度、充放电 频率等影响,体现在有效吞吐量的消耗。电解槽和 蓄电池在 DETHS 中均承担着促进可再生能源消纳 的作用,电解槽的调度曲线可能会影响蓄电池的充 放电行为,反之亦然,因此,有必要探索一种在提升 DETHS 经济性的同时减少电解槽和蓄电池寿命衰 减损耗的优化调度策略。

为此,本文对现有的电解槽寿命衰减模型进行 改进,结合现有的蓄电池寿命衰减模型,将电解槽和 蓄电池的寿命衰减统一量化到目标函数中,提出一 种考虑电解槽和蓄电池寿命衰减特性的DETHS优 化调度策略,采用场景法处理可再生能源出力的 不确定性,并且采用MATLAB中的YALMIP工具调 用Gurobi求解器进行仿真求解,验证所提优化调度 策略能够在有效提升系统经济效益的同时减少电解 槽和蓄电池的寿命损耗。

#### 1 DETHS结构及设备建模

DETHS可以实现系统内部多种能源供应,满足 多类型负荷需求。本文研究的DETHS包含能量供 给、能量转换、能量储存和能量消耗4个部分,其结 构示意图如图1所示。光伏和风机提供清洁电能, 系统可通过向上级电网购电弥补系统内的能量短 缺;以电解槽和燃料电池(本文采用质子交换膜电解 槽和质子交换膜燃料电池)为主体的能量转换单元 可以有效降低能源的梯级损耗,提高综合利用率;能 量储存部分包含电储能、氢储能、热储能等多能储存 设备,可以起到削峰填谷的作用。



Fig.1 Schematic diagram of DETHS structure

#### 1.1 电解槽数学模型

本文在文献[22-23]的基础上,根据电解槽的启 动延时、启停能力、产氢和产热特性、工作范围、启动 功率、爬坡能力、温度范围等特性参数建立电解槽 模型。

#### 1)电解槽启停模型。

考虑启动延时的电解槽启停特性的数学模型为:

$$\mathbf{L}_{\text{on,}t-\alpha^{\text{EC}}}^{\text{EC}} - A_{\text{off,}t}^{\text{EC}} = U_t^{\text{EC}} - U_{t-\Delta t}^{\text{EC}}$$
(1)

$$A_{\text{on},t}^{\text{EC}} \leq 1 - U_{t-\Delta t}^{\text{EC}}$$

$$A_{\text{off},t}^{\text{EC}} \leq U_{t-\Delta t}^{\text{EC}} \tag{3}$$

$$\sum_{t=1}^{T} A_{\text{on},t}^{\text{EC}} \leq A_{\text{on,max}}^{\text{EC}}$$
(4)

$$\sum_{t=1}^{T} A_{\text{off}, t}^{\text{EC}} \leq A_{\text{off, max}}^{\text{EC}}$$
(5)

式中:t为当前采样时段;T为采样时段总数;α<sup>EC</sup>为电 解槽启动延时;A<sup>EC</sup><sub>on,t</sub>、A<sup>EC</sup><sub>off,t</sub>分别为电解槽的开始启动 动作和开始关停动作;U<sup>EC</sup>为 0-1 变量,表示电解槽 的开关状态;Δt 为单位时间间隔;A<sup>EC</sup><sub>on,max</sub>、A<sup>EC</sup><sub>off,max</sub>分别 为电解槽日内开机和停机次数上限。

2)电解槽产出模型,即:

$$m_{\mathrm{H2},t}^{\mathrm{EC}} = \left(\eta_{\mathrm{H2}}^{\mathrm{EC}} P_{t}^{\mathrm{EC}} \Delta t\right) U_{t}^{\mathrm{EC}} / \gamma \tag{6}$$

$$Q_t^{\rm EC} = \eta_{\rm heat}^{\rm EC} P_t^{\rm EC} \tag{7}$$

式中: $m_{H2,t}^{EC}$ 为产出的氢气质量; $\eta_{H2}^{EC}$ 、 $\eta_{heat}^{EC}$ 分别为电解 槽产氢和产热效率; $P_t^{EC}$ 为电解槽工作功率; $\gamma$ 为1kg 氢气的热值等效系数; $Q_t^{EC}$ 为电解槽产生的热功率。

3)电解槽功率模型。

电解槽工作功率上、下限约束分别为:

$$P_{t}^{\text{EC}} \leq U_{t}^{\text{EC}} P_{\max}^{\text{EC}} + \sum_{\tau=0}^{\alpha^{\text{CL}}} A_{\text{on, }t-\tau\Delta t}^{\text{EC}} P_{\text{boot}}^{\text{EC}}$$
(8)

$$P_{t}^{\text{EC}} \ge U_{t}^{\text{EC}} P_{\min}^{\text{EC}} + \sum_{\tau=0}^{\alpha^{\text{EC}}-1} A_{\min,t-\tau\Delta t}^{\text{EC}} P_{\text{boot}}^{\text{EC}}$$
(9)

式中: P<sup>EC</sup><sub>max</sub>、P<sup>EC</sup>分别为电解槽在开机状态下的工作 功率上、下限; P<sup>EC</sup>为电解槽启动过程中消耗的电 功率。

电解槽爬坡功率约束为:

 $|P_{\iota}^{\text{EC}} - P_{\iota-\Delta \iota}^{\text{EC}}| \leq U_{\iota}^{\text{EC}} \Delta P_{\max}^{\text{EC}} + (1 - U_{\iota}^{\text{EC}}) P_{\max}^{\text{EC}}$ (10) 式中:  $\Delta P_{\max}^{\text{EC}}$  为电解槽在开机状态下的单位时段最大 爬坡功率。

4)电解槽温度模型,即:

$$T_{t+\Delta t}^{\rm EC} = T_t^{\rm EC} + \left(Q_t^{\rm EC} - Q_{\rm loss,t}^{\rm EC} - Q_{\rm move,t}^{\rm EC}\right) \Delta t / C^{\rm EC}$$
(11)

$$Q_{\text{loss},t}^{\text{EC}} = \left(T_t^{\text{EC}} - T_a^{\text{EC}}\right) / R^{\text{EC}}$$
(12)

$$T_{\min}^{\rm EC} \leqslant T_t^{\rm EC} \leqslant T_{\max}^{\rm EC} \tag{13}$$

式中: $T_t^{EC}$ 为电解槽温度; $Q_{loss,t}^{EC}$ 为电解槽损失的热功 率; $Q_{move,t}^{EC}$ 为输出系统外的热功率; $C^{EC}$ 为电解槽集总 热容; $T_a^{EC}$ 为电解槽外界温度; $R^{EC}$ 为电解槽热阻;  $T_{max}^{EC}$ 分别为电解槽温度上、下限。

#### 1.2 氢燃料电池模型

类似地,本文建立考虑氢燃料电池的启动延时、 启停能力、产氢和产热特性、工作范围、启动功率、爬 坡能力、温度范围等特性参数的氢燃料电池模型,具 体如附录A式(A1)--(A14)所示。

常规设备如电锅炉、蓄电池、储氢罐、储热罐等的数学模型如附录A式(A15)—(A20)所示。

#### 2 电解槽和蓄电池的寿命衰减模型

#### 2.1 电解槽的寿命衰减特性及建模

电解槽的持续运行会导致电解槽寿命衰减,目 前难以直接对电解槽的寿命衰减进行准确的数学建 模,大多研究通过试验测量电解槽的电压变化间接 反映寿命衰减情况,这是由于电解槽运行时催化层 会产生不可逆损失,膜内阻变大,电解槽过电压增 加,在保证输出氢气流速不变的条件下,需要保持电 流不变,而工作电压上升表明电解槽制氢效率下降。 当电解槽工作电压上升至最高工作电压时,为保证 系统效率,需要更换电解槽,相关研究表明,在温度、 压强等参数确定的情况下,电解槽电压变化与其功 率波动情况关系密切。

电解槽平稳运行时会有一定的寿命衰减,在输入风、光等波动电源的情况下,电解槽输入功率的频 繁波动以及电解槽的频繁启停会导致其寿命衰减加快。基于以上特性,本文参考文献[14],用电解槽效 率的衰减反映电解槽的寿命衰减,考虑平稳运行、波 动运行和启停这3种典型工况下的电解槽寿命衰 减。在平稳运行时,电解槽的效率衰减系数很小;在 波动运行时,波动越大,对应的效率衰减量也越大; 启停对电解槽寿命的影响最大。

本文建立的电解槽寿命衰减模型为:

$$\begin{cases} D_{1,t}^{\text{EC}} = \lambda_{1}^{\text{EC}} U_{t}^{\text{EC}} \\ D_{2,t}^{\text{EC}} = \lambda_{2}^{\text{EC}} | P_{t}^{\text{EC}} - P_{t-1}^{\text{EC}} | / P_{\text{rate}}^{\text{EC}} \\ D_{3,t}^{\text{EC}} = \lambda_{3}^{\text{EC}} (A_{\text{op},t}^{\text{EC}} + A_{\text{off},t}^{\text{EC}}) \end{cases}$$
(14)

$$D^{\rm EC} = \sum_{t=1}^{T} \left( D^{\rm EC}_{1,t} \Delta t + D^{\rm EC}_{2,t} / \Delta t + D^{\rm EC}_{3,t} \right)$$
(15)

$$L_{\rm de}^{\rm EC} = D^{\rm EC} / \lambda_{\rm rate}^{\rm EC}$$
 (16)

$$L_{\rm rate}^{\rm EC} = \left(\eta_{\rm rate}^{\rm EC} - \eta_{\rm lim}^{\rm EC}\right) / \lambda_{\rm rate}^{\rm EC}$$
(17)

式中: $D_{1,t}^{EC}$ ,  $D_{2,t}^{EC}$ ,  $D_{3,t}^{EC}$ 分别为平稳运行、波动运行和启 停时的电解槽效率衰减量; $\lambda_{1}^{EC}$ ,  $\lambda_{2}^{EC}$ ,  $\lambda_{3}^{EC}$ 分别为平稳运行、波动运行和启停时的电解槽效率衰减系数,本 文分别取为2.75×10<sup>-7</sup>、2.75×10<sup>-6</sup>和5.50×10<sup>-6</sup>;  $P_{rate}^{EC}$ 为 电解槽的额定功率; $D^{EC}$ ,  $L_{de}^{EC}$ 分别为运行一个调度周 期的电解槽效率衰减总量和等效寿命衰减总量; $L_{rate}^{EC}$ 为电解槽额定运行寿命; $\eta_{rate}^{EC}$ ,  $\eta_{im}^{EC}$ 分别为电解槽的额 定效率和极限效率; $\lambda_{rate}^{EC}$ 为电解槽的额定效率衰减系数,本文取为2.28×10<sup>-6</sup>。

#### 2.2 蓄电池的寿命衰减特性及建模

蓄电池的寿命损耗与SOC和充放电功率密不可分。文献[19]指出,蓄电池的寿命可表示为蓄电池可供使用的有效吞吐量之和,当累积的有效吞吐量达到蓄电池额定寿命时,需要更换电池。蓄电池的额定使用吞吐量为:

$$G_{\rm R} = L_{\rm R} D_{\rm R} C_{\rm R} \tag{18}$$

式中: $G_{R}$ 为蓄电池的额定使用吞吐量; $L_{R}$ 为蓄电池的额定循环寿命(额定放电深度和额定放电电流下的循环寿命); $D_{R}$ 为蓄电池的额定放电深度; $C_{R}$ 为在额定放电电流下的蓄电池额定容量。

简化后的蓄电池寿命衰减模型为:

$$\begin{cases} d_{\text{eff}} = k_0 (1 - k_1 S_t + k_2 S_t^2) \\ k_0 = \exp(u_1 - 1 + 1/D_R) d_R / D_R^{u_0} \\ k_1 = u_0 + u_1 / D_R \\ k_2 = u_0 (u_0 - 1) / 2 + u_0 u_1 / D_R + u_1^2 / (2D_R^2) \end{cases}$$
(19)

式中: $S_t$ 为t时段的蓄电池SOC; $d_{\text{eff}}$ 为使用一次蓄电 池所消耗的吞吐量; $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 为由蓄电池参数计算出 的常数; $u_0$ 、 $u_1$ 为仿真过程中测试得到的参数; $d_{\text{R}}$ 为 单次放电所消耗的额定吞吐量。

## 3 DETHS优化调度模型及求解步骤

#### 3.1 源荷不确定性的处理

可再生能源和负荷均无法在日前准确预测,这 导致电热氢系统源荷双侧均存在不确定性,给系统 维持实时功率平衡和优化调度带来了挑战,因此,需 要在制定调度方案时预先考虑不确定性的影响。本 文采用场景法处理风、光出力和电、热、氢负荷需求 的不确定性,场景法可以将具有不确定性的电、热、 氢负荷和风、光预测结果转化为确定性的场景集,对 每个典型场景进行调度,在调度方案中考虑不同的 误差水平,并简化计算<sup>[24]</sup>。

## 3.2 DETHS 多场景随机优化调度模型

## 3.2.1 目标函数

本文的优化目标是在提升各场景下电热氢系统 经济性的同时提升电解槽和蓄电池的寿命,目标函 数包含寿命损耗成本和运行净成本。

1)寿命损耗成本,即:

$$F_{\text{life}} = \sum_{\kappa=1}^{K} \pi_{\kappa} \Big( C_{\text{life}}^{\text{EC, }\kappa} + C_{\text{life}}^{\text{EES, }\kappa} \Big)$$
(20)

$$\begin{cases} C_{\text{life}}^{\text{EC},\kappa} = \left(L_{\text{de},\kappa}^{\text{EC}}/L_{\text{rate}}^{\text{EC}}\right)C_{\text{inv}}^{\text{EC}} \\ C_{\text{life}}^{\text{EES},\kappa} = \left(d_{\text{eff},\kappa}^{\text{EES}}/G_{\text{R}}\right)C_{\text{inv}}^{\text{EES}} \end{cases}$$
(21)

式中: $F_{life}$ 为寿命损耗成本; $\pi_{\kappa}$ 为场景 $\kappa$ 出现的概率; K为场景数; $C_{life}^{EC.\kappa}$ 为在场景 $\kappa$ 下电解槽寿命损耗成 本; $C_{life}^{EES.\kappa}$ 为在场景 $\kappa$ 下蓄电池寿命损耗成本和维护 成本之和; $L_{de,\kappa}^{EE}$ 为在场景 $\kappa$ 下电解槽的寿命衰减量;  $C_{inv}^{EC}$ 、公司为电解槽和蓄电池的配置成本; $d_{eff,\kappa}^{EES}$ 为别为电解槽和蓄电池的配置成本; $d_{eff,\kappa}^{EES}$ 为 在场景 $\kappa$ 下蓄电池消耗的有效吞吐量; $c_{main}^{ESS}$ 为蓄电池 的单位维护成本; $P_{\kappa,t}^{ch}$ 、分别为t时段在场景 $\kappa$ 下 蓄电池的充、放电功率。

2)运行净成本,即:

$$F_{\rm op} = \sum_{\kappa=1}^{\kappa} \pi_{\kappa} \Big( C_{\rm cur}^{\kappa} + C_{\rm loss}^{\kappa} + C_{\rm grid}^{\kappa} + C_{\rm car}^{\kappa} - C_{\rm sell}^{\kappa} \Big) \qquad (22)$$

$$\begin{cases} C_{\text{cur}}^{\kappa} = \sum_{t=1}^{T} c_{\text{re}}^{\text{cur}} \left( P_{\text{pv},\kappa,t}^{\text{cur}} + P_{\text{wl},\kappa,t}^{\text{cur}} \right) \\ C_{\text{loss}}^{\kappa} = \sum_{t=1}^{T} \left( c_{\text{ele}}^{\text{loss}} P_{\text{load},\kappa,t}^{\text{loss}} + c_{\text{heat}}^{\text{loss}} Q_{\text{load},\kappa,t}^{\text{loss}} + c_{\text{H2}}^{\text{loss}} m_{\text{H2},\kappa,t}^{\text{loss}} \right) \\ C_{\text{grid}}^{\kappa} = \sum_{t=1}^{T} \left( c_{t}^{\text{buy}} P_{\kappa,t}^{\text{buy}} - c_{t}^{\text{sell}} P_{\kappa,t}^{\text{sell}} \right) \\ C_{\text{car}}^{\kappa} = \sum_{t=1}^{T} c_{\text{car}}^{\text{car}} \eta_{\text{ele-car}} P_{\kappa,t}^{\text{buy}} \\ C_{\text{sell}}^{\kappa} = \sum_{t=1}^{T} \left( c_{\text{heat}}^{\text{sell}} Q_{\kappa,t}^{\text{sell}} + c_{\text{H2}}^{\text{sell}} m_{\text{H2},\kappa,t}^{\text{sell}} \right) \end{cases}$$
(23)

式中: $F_{op}$ 为运行净成本; $C_{cur}^{\kappa}$ 、 $C_{grid}^{\kappa}$ 、 $C_{car}^{\kappa}$ 、 $C_{sell}^{\kappa}$ 分别 为场景  $\kappa$ 下的弃风弃光惩罚成本,切负荷惩罚成本, 购、售电成本,碳排放惩罚成本和售热售氢收益; $c_{rer}^{cur}$ 为弃风和弃光惩罚系数; $P_{pr,\kappa,t}^{cur}$ , $P_{wt,\kappa,t}^{cur}$ 分别为弃光和 弃风功率; $c_{ele}^{loss}$ 、 $c_{les}^{loss}$ , $P_{pr,\kappa,t}^{cur}$ , $P_{wt,\kappa,t}^{cur}$ 分别为弃光和 弃风功率; $c_{ele}^{loss}$ 、 $c_{les}^{loss}$ , $c_{les}^{loss}$ , $P_{bod,\kappa,t}^{loss}$ 为切电负荷功率; $Q_{losd,\kappa,t}^{loss}$ 为切息负荷质量; $c_{t}^{loss}$ , $c_{t}^{loss}$ 为切息负荷 功率; $m_{12,\kappa,t}^{loss}$ 为切息负荷质量; $c_{t}^{loss}$ , $c_{t}^{sell}$ 分别为购、售电 单价; $P_{\kappa,t}^{loss}$ , $\eta_{ele-car}$ 为电-碳转换系数; $c_{heat}^{sell}$ , $c_{tl}^{sell}$ 分别 为出售热功率和氢气的单价; $Q_{\kappa,t}^{sell}$ , $m_{H2,\kappa,t}^{sell}$ 分别为售出 的热功率和氢气质量。

3.2.2 约束条件

调度中除了需满足各种设备的运行约束外,还 需满足风机、光伏出力和负荷约束,购电功率约束以 及电、热、氢能量平衡约束。

风机、光伏出力和负荷约束为:

$$P_{\kappa,t}^{\text{pv}} = P_{t}^{\text{pv}} + \xi_{\kappa,t}^{\text{pv}}, \quad 0 \leq P_{\text{pv},\kappa,t}^{\text{cur}} \leq P_{\kappa,t}^{\text{pv}}$$

$$P_{\kappa,t}^{\text{wt}} = \bar{P}_{t}^{\text{wt}} + \xi_{\kappa,t}^{\text{wt}}, \quad 0 \leq P_{\text{wt},\kappa,t}^{\text{cur}} \leq P_{\kappa,t}^{\text{wt}}$$

$$P_{\kappa,t}^{\text{load}} = \bar{P}_{t}^{\text{load}} + \xi_{\kappa,t}^{\text{ele}}, \quad 0 \leq P_{\text{load},\kappa,t}^{\text{loas}} \leq P_{\kappa,t}^{\text{load}}$$

$$Q_{\kappa,t}^{\text{load}} = \bar{Q}_{t}^{\text{load}} + \xi_{\kappa,t}^{\text{heat}}, \quad 0 \leq Q_{\text{load},\kappa,t}^{\text{load}} \leq Q_{\kappa,t}^{\text{load}}$$

$$m_{\text{H2},\kappa,t}^{\text{load}} = \bar{m}_{\text{H2},\kappa,t}^{\text{load}} + \xi_{\kappa,t}^{\text{heat}}, \quad 0 \leq m_{\text{load},\kappa,t}^{\text{load}} \leq m_{\text{H2},\kappa,t}^{\text{load}}$$

式中: $P_{\kappa,\iota}^{\text{pv}}, P_{\kappa,\iota}^{\text{wt}}$ 和 $P_{\kappa,\iota}^{\text{load}}, Q_{H2,\kappa,\iota}^{\text{load}}, \mathcal{O}$ 别为光伏、风机出 力和电、热、氢负荷的实际值; $\bar{P}_{t}^{\text{pv}}, \bar{P}_{t}^{\text{wt}}$ 和 $\bar{P}_{t}^{\text{load}}, \bar{Q}_{t}^{\text{load}}, \bar{m}_{H2,\kappa,\iota}^{\text{load}}, \mathcal{O}$ 别为光伏、风机出力和电、热、氢负荷的日前 预测值; $\xi_{\kappa,\iota}^{\text{pv}}, \xi_{\kappa,\iota}^{\text{wt}}$ 和 $\xi_{\kappa,\iota}^{\text{ele}}, \xi_{\kappa,\iota}^{\text{heat}}, \xi_{\kappa,\iota}^{\text{H2}}$ 分别为光伏、风机出力和电、热、氢负荷的日前 和电、热、氢负荷的预测误差。

购、售电功率约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\kappa,t}^{\text{buy}} \leq P_{\max}^{\text{buy}} U_{\kappa,t}^{\text{buy}} \\ 0 \leq P_{\kappa,t}^{\text{sell}} \leq P_{\max}^{\text{sell}} U_{\kappa,t}^{\text{sell}} \\ U_{\kappa,t}^{\text{buy}} + U_{\kappa,t}^{\text{sell}} \leq 1 \end{cases}$$
(25)

式中: $P_{\max}^{\text{buy}}$ 、 $P_{\max}^{\text{sell}}$ 分别为购、售电功率上限; $U_{\kappa,\iota}^{\text{buy}}$ 、 $U_{\kappa,\iota}^{\text{sell}}$ 分别为购、售电状态。

电功率平衡约束为:

$$P_{\kappa,t}^{\mathrm{pv}} - P_{\mathrm{pv},\kappa,t}^{\mathrm{cur}} + P_{\kappa,t}^{\mathrm{wt}} - P_{\mathrm{wt},\kappa,t}^{\mathrm{cur}} + P_{\mathrm{ele},\kappa,t}^{\mathrm{FC}} + P_{\kappa,t}^{\mathrm{buy}} =$$

 $P_{\kappa,t}^{\text{load}} - P_{\text{load},\kappa,t}^{\text{loss}} + P_{\kappa,t}^{\text{sell}} + P_{\kappa,t}^{\text{EC}} + P_{\kappa,t}^{\text{ch}} - P_{\kappa,t}^{\text{ds}} + P_{\kappa,t}^{\text{EB}} \quad (26)$ 式中:  $P_{\text{fc},\kappa,t}^{\text{FC}}$ 为 t 时段在场景  $\kappa$ 下的燃料电池产电功 率; $P_{\kappa,t}^{\text{EC}}$ 为t时段在场景 $\kappa$ 下的电解槽耗电功率; $P_{\kappa,t}^{\text{EB}}$ 为t时段在场景 $\kappa$ 下的电锅炉消耗电功率。

熱切率半衡切束万:  

$$Q_{\kappa,t}^{\text{EB}} + Q_{\text{move},\kappa,t}^{\text{EC}} + Q_{\text{move},\kappa,t}^{\text{FC}} = Q_{\kappa,t}^{\text{ch}} - Q_{\kappa,t}^{\text{dis}} + Q_{\kappa,t}^{\text{load}} - Q_{\text{load},\kappa,t}^{\text{loss}} + Q_{\kappa,t}^{\text{sell}}$$
(27)

式中: $Q_{\text{move},\kappa,t}^{\text{EC}}$ , $Q_{\text{move},\kappa,t}^{\text{FC}}$ 分别为t时段在场景 $\kappa$ 下的电解 槽和燃料电池输出的热功率; $Q_{\kappa,t}^{\text{EB}}$ 为t时段在场景 $\kappa$ 下的电锅炉产热功率; $Q_{\kappa,t}^{\text{ch}}$ , $Q_{\kappa,t}^{\text{dis}}$ 分别为t时段在场景  $\kappa$ 下的储热罐充、放热功率。

氢气质量平衡约束为:

 $m_{\mathrm{H2,}\kappa,t}^{\mathrm{EC}} + m_{\mathrm{H2,}\mathrm{out,}\kappa,t}^{\mathrm{HST}} - m_{\mathrm{H2,}\mathrm{in,}\kappa,t}^{\mathrm{HST}} =$ 

 $m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{FC}} + m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{load}} - m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{sell}} + m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{sell}}$  (28) 式中: $m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{EC}}$ 为t时段在场景 $\kappa$ 下电解槽产出的氢气 质量; $m_{\mathrm{H2},\mathrm{out},\kappa,t}^{\mathrm{HST}}$ 、加 $_{\mathrm{H2},\mathrm{in},\kappa,t}^{\mathrm{HST}}$ 分别为t时段在场景 $\kappa$ 下的储 氢罐充、放氢质量; $m_{\mathrm{H2},\kappa,t}^{\mathrm{FC}}$ 为t时段在场景 $\kappa$ 下的燃料 电池耗氢质量。

#### 3.3 求解步骤

考虑电解槽和蓄电池寿命衰减特性的 DETHS 优化调度模型以运行成本最低和寿命衰减最小为目 标,以 30 min 为单位采样时段,制定 DETHS 的日前 出力计划,模型求解流程图如图2所示。



#### 4.1 算例概况

#### 4.1.1 算例数据

以图1的DETHS为研究对象进行算例分析。电 解槽和燃料电池参数见附录B表B1,储能设备参数 见附录B表B2,分时购电价见附录B表B3。售电价 为购电价的80%;电锅炉产热效率为0.9,日最大启 停次数为4;电解槽成本为4000元/kW,蓄电池成 本为1500元/(kW·h);氢气售价为40元/kg,售热单 价为0.5元/(kW·h);电氢转换系数为33kW·h/kg; 蓄电池容量为1000 kW·h,储氢罐容量为500kg,储 热罐容量为10000 kW·h,电锅炉容量为1000kW。 4.1.2 源荷不确定性的处理

采用拉丁超立方采样生成1000个场景,并通过 改进的层次*k*-means算法进行场景削减,得到日前预 测的5个典型场景,如附录C图C1所示,场景1—5 的概率分别为0.318、0.347、0.116、0.113、0.106。

#### 4.2 算例结果分析

为分析考虑电解槽和蓄电池寿命衰减特性的合 理性和有效性,本文设置4个案例进行对比分析:案 例1,不考虑电解槽和蓄电池的寿命损耗,目标函数 为期望运行成本最低;案例2,不考虑电解槽的寿命 损耗,目标函数为期望运行成本与蓄电池的寿命损 耗,目标函数为期望运行成本与电解槽的寿命损耗 耗,目标函数为期望运行成本与电解槽的寿命损耗 成本之和最低;案例4,综合考虑电解槽和蓄电池的 寿命损耗,目标函数为期望运行成本与电解槽和蓄 电池的寿命损耗成本之和最低。

优化结果如图3所示,具体数据如附录B表B4 所示。



图 3 不同案例的优化结果 Fig.3 Optimization results of different cases

由图3可知:案例1不考虑设备寿命损耗成本, 其运行收益最高,但该案例的调度方案导致的电解 槽和蓄电池寿命损耗也最严重,在运行收益中减去 寿命损耗成本后,总收益反而最低;案例2的运行收 益比案例1稍微降低,这是由于案例2考虑了蓄电池 的寿命衰减成本,为了尽量降低蓄电池的寿命损耗, 会牺牲一部分运行收益,但由于蓄电池成本相对较 低,这对调度结果的影响不大;案例3的运行收益比 案例1降低幅度更大,这是由于案例3考虑了电解槽 的寿命衰减成本,且电解槽的成本更高,电解槽的寿 命损耗成本在总目标函数中的权重也会更大,因此 该案例的调度方案会舍弃更多的运行收益以降低电 解槽的寿命损耗;案例4的运行收益最低,这是由于 同时该案例考虑了蓄电池和电解槽的寿命损耗成 本,但该案例的寿命损耗成本最低,系统综合收益 最高。

1000个场景下案例1和案例4的各项成本和收益统计情况如附录C图C2所示。由图可知,相较于不考虑寿命衰减的情况,考虑寿命衰减时,为了减少电解槽和蓄电池的出力曲线波动,会增加购电量,从而增加了碳排放惩罚成本,这在大幅降低电解槽和蓄电池寿命损耗的同时也增加了售氢和售热收益,因此,案例4的运行收益略低于案例1,但总收益却高于案例1。

为了进一步分析考虑电解槽和蓄电池寿命损耗 对各设备调度方案的影响,以出现概率最高的典型 场景2为例进行分析,该场景下案例1和案例4的各 设备调度结果如图4所示。





由图4可知:案例4的电解槽工作功率曲线比案例1更平稳,波动更小,这是由于电解槽功率波动会加速其寿命衰减,为了降低电解槽寿命损耗成本,在案例4的调度方案中会使用其他设备综合消纳可再生能源的波动,而不考虑寿命损耗成本的案例1会优先使用电解槽消纳功率波动;案例4的蓄电池SOC在采样时段8-20低于案例1,而在采样时段33-48高于案例1,大多时候保持在0.6左右,这是由于蓄电池的寿命衰减与SOC水平相关,蓄电池的SOC过高和过低均会使其寿命损耗增加,为了降低蓄电池的寿命损耗成本,会尽可能使蓄电池工作在合适的SOC下。

案例1和案例4的电功率平衡结果如附录C图 C3所示。由图可知:在案例4中,为了减少电解槽和 蓄电池的出力曲线波动,会调节电锅炉的出力和购 电功率,在风、光出力不足时从外部电网购电,在风、 光出力过大时利用电锅炉将电能转化为热能供给热 负荷;在案例1中,为了降低运行成本,会通过直接 快速调节电解槽的输入功率和充、放电平衡可再生 能源的波动。

热功率和氢气质量平衡结果分别如附录C图 C4、C5所示。由图可知,在案例4中,在保证电解槽 功率曲线更加平稳的同时,为了平衡热负荷的波动, 增加了电锅炉、燃料电池以及储热罐的使用频率。

由于本文模型中电解槽和蓄电池的寿命损耗成 本与其配置成本密切相关,且考虑到随着技术的成 熟,电解槽和蓄电池的成本将会逐渐降低,为了体现 电解槽和蓄电池配置成本变化对其出力曲线的影 响,在案例4中固定电解槽成本,改变蓄电池成本, 蓄电池的SOC曲线变化如图5所示。蓄电池配置成 本越高,则蓄电池寿命衰减成本在目标函数中的权 重越大,蓄电池工作的SOC范围会越大,从而降低蓄 电池寿命损耗成本。



Fig.5 Relationship between SOC curve and allocation cost of battery

固定蓄电池配置成本,改变电解槽成本,电解槽 的工作功率曲线变化如图6所示。电解槽配置成本 越高,则电解槽寿命衰减成本在目标函数中的权重 越大,电解槽的工作功率曲线会越平稳,从而降低电 解槽的寿命损耗成本。



Fig.6 Relationship between output curve and allocation cost of electrolytic cell

由于售热和售氢价格变化也会对本文所提优化 调度策略产生不可忽视的影响,因此,在不同的售热

和售氢价格下进行优化调度,结果如附录C图C6所 示。由图可知:在售热单价较低时,系统不会向外售 热,而是在氢气价格较高时出售氢气,在氢气价格较 低时将多余的电能向外出售,电解槽制氢供给氢负 荷,存在部分功率波动,因此,电解槽寿命衰减较大, 同时由于直接向外售电,蓄电池的使用频率较低,蓄 电池的寿命衰减成本较低;随着售热单价的增加,系 统开始向外售热,且在氢气价格较低时只向外售热, 当氢气价格增加后同时向外售热和售氢,此时售电 量急剧减少,电解槽寿命衰减成本逐渐降低,这是由 于当售热和售氢价格增高后,系统通过从外部购电 使电解槽高功率平稳运行,同时将电解槽产出的氢 气和氧气向外出售,尤其在售氢和售热价格均最高 时,系统大量购电,此时电解槽寿命衰减最小,而蓄 电池更多地参与平抑电功率波动,从而使其寿命衰 减增加。

## 5 结论

本文提出一种综合考虑电解槽和蓄电池寿命衰 减特性的DETHS优化调度策略。通过对比分析4个 案例下的系统运行收益、电解槽和蓄电池的寿命损 耗成本及总收益,得出以下结论。

1)不考虑电解槽和蓄电池寿命损耗成本的调度 方案能够获得最高的经济收益,但使电解槽和蓄电 池的寿命损耗最严重。

2)在考虑电解槽和蓄电池寿命损耗成本的调度 方案中,电解槽的工作功率曲线更平稳,蓄电池工作 的SOC在大多时候维持在合适水平,从而降低了设 备寿命损耗成本,这使系统的经济收益略微降低,但 使综合收益更高。

3)在考虑寿命损耗成本的情况下,售氢和售热 单价对系统优化调度结果具有关键性的影响,售氢 和售热单价较低时,蓄电池的寿命衰减成本较低,电 解槽的寿命衰减成本较高,而售氢和售热价格较高 时则相反。

为了制定更加准确的DETHS优化调度方案,后 续笔者将深入研究电解槽的效率变化特性,考虑电 解槽温度对电解槽效率的影响,并将更加全面地考 虑DETHS中其他设备(如燃料电池、储氢罐等)的寿 命衰减特性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1] 韩子娇,李正文,张文达,等. 计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10): 99-106.

HAN Zijiao, LI Zhengwen, ZHANG Wenda, et al. Economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of photovoltaic output power[J]. Electric

Power Automation Equipment, 2021, 41(10):99-106.

 [2]周建力,乌云娜,董昊鑫,等. 计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化,2021,45(24): 30-40.

ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 30-40.

- [3] 王奖,邓丰强,张勇军,等.园区能源互联网的规划与运行研究综述[J].电力自动化设备,2021,41(2):24-32,55.
   WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy Internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24-32,55.
- [4] 岳大为,赵文体,袁行行,等. 计及电-氢混合储能的孤岛直流 微电网可靠性评估[J]. 电力工程技术,2023,42(3):27-35.
   YUE Dawei,ZHAO Wenti,YUAN Hanghang, et al. Reliability evaluation of islanded DC microgrid considering electric-hydrogen hybrid energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(3):27-35.
- [5] 黄彦博,冯忠楠,随权,等.考虑实时SOC与动态循环效率的电 池损耗评估及储能定容策略[J].太阳能学报,2022,43(11): 413-423.
   HUANG Yanbo, FENG Zhongnan, SUI Quan, et al. Battery

loss assessment and energy storage capacity configuration strategy considering real-time SOC and dynamic cycling efficiency [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2022,43(11):413-423.

- [6]张昊天,韦钢,袁洪涛,等.考虑氢-电混合储能的直流配电网 优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(14):72-81.
   ZHANG Haotian, WEI Gang, YUAN Hongtao, et al. Optimal scheduling of DC distribution network considering hydrogenpower hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(14):72-81.
- [7] KOJIMA H, NAGASAWA K, TODOROKI N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12):4572-4593.
- [8] GUSAIN D, CVETKOVIC M, BENTVELSEN R, et al. Technical assessment of large scale PEM electrolyzers as flexibility service providers [C] //2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands; IEEE, 2020:1074-1078.
- [9] ALIA S M, STARIHA S, BORUP R L. Electrolyzer durability at low catalyst loading and with dynamic operation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(15):F1164-F1172.
- [10] 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.
- [11] 丁显,冯涛,何广利,等.风电光伏波动性电源对电解水制氢 电解槽影响的研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(10): 3275-3284.
  DING Xian,FENG Tao,HE Guangli,et al. Research progress of the influence of wind power and photovoltaic of power fluctuation on water electrolyzer for hydrogen production[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3275-3284.
- [12] 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.

- [13] 袁铁江,张红,杨洋,等.新能源-PEM电解制氢全寿命经济性 评估[J].中国电力,2023,56(3):30-35,46.
  YUAN Tiejiang,ZHANG Hong,YANG Yang, et al. Whole life cycle economic assessment of renewable energy-PEM electrolyzer hydrogen production[J]. Electric Power,2023,56(3):30-35.46.
- [14] 李梓丘,乔颖,鲁宗相. 计及效率与寿命的海上风电-多堆氢能系统运行优化[J]. 综合智慧能源,2022,44(5):69-77.
  LI Ziqiu, QIAO Ying, LU Zongxiang. Operation optimization of offshore wind-multi-stack hydrogen system considering efficiency and lifetime[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022,44 (5):69-77.
- [15] 胡泽春,夏睿,吴林林,等.考虑储能参与调频的风储联合运行 优化策略[J].电网技术,2016,40(8):2251-2257.
  HU Zechun,XIA Rui,WU Linlin, et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation [J]. Power System Technology, 2016, 40 (8):2251-2257.
- [16] 梅书凡,檀勤良,代美.考虑风光出力季节性波动的储能容量 配置[J].电力工程技术,2022,41(4):51-57.
   MEI Shufan,TAN Qinliang,DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(4):51-57.
- [17] 邱纯,应展烽,冯奕,等. 计及碳配额的混合储能综合微能源网 优化运行研究[J]. 电力工程技术,2022,41(2):119-127.
   QIU Chun, YING Zhanfeng, FENG Yi, et al. Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering carbon quote[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):119-127.
- [18] 王荔妍,陈启鑫,何冠楠,等.考虑电池储能寿命模型的发电计 划优化[J].电力系统自动化,2019,43(8):93-100.
  WANG Liyan, CHEN Qixin, HE Guannan, et al. Optimization of generation scheduling considering battery energy storage life model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43 (8):93-100.
- [19] 杨艳红,裴玮,邓卫,等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网目前调度优化[J]. 电工技术学报,2015,30(22):172-180.
   YANG Yanhong,PEI Wei,DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J].
   Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [20] 孙黎霞, 鞠平, 白景涛, 等. 计及蓄电池寿命的冷热电联供型微 电网多目标经济优化运行[J]. 发电技术, 2020, 41(1):64-72. SUN Lixia, JU Ping, BAI Jingtao, et al. Multi-objective economic optimal operation of microgrid based on combined cooling, heating and power considering battery life[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1):64-72.
- [21] 谢姿,张惠娟,刘琪,等.考虑蓄电池寿命的分布式电源容量优 化配置[J].太阳能学报,2021,42(10):424-430.
   XIE Zi,ZHANG Huijuan,LIU Qi, et al. Optimal configeration of distributed power supply capacity considering battery life [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(10):424-430.
- [22] 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):4021-4033.
  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):4021-4033.
- [23] ZHANG L Q, DAI W Z, ZHAO B, et al. Multi-time-scale economic scheduling method for electro-hydrogen integrated

energy system based on day-ahead long-time-scale and intraday MPC hierarchical rolling optimization [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11:1132005.

[24] 南斌,姜春娣,董树锋,等. 计及源荷不确定性的综合能源系统 日前-日内协调优化调度[J]. 电网技术,2023,47(9):3669-3680.
NAN Bin, JIANG Chundi, DONG Shufeng, et al. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering uncertainties in source and load [J]. Power System Technology,2023,47(9):3669-3680.

#### 作者简介:

陈 杨(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合 能源系统的规划与优化运行分析(E-mail:chenyang20182022@ 163.com);

陈 健(1986—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究 方向为综合能源系统的规划与优化运行分析(E-mail: ejchen@sdu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

## Optimal scheduling strategy of distributed electric-thermo-hydrogen system considering lifetime decay characteristics of electrolytic cell and battery

CHEN Yang<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>, NI Chouwei<sup>2</sup>, ZHAO Bo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: The strong fluctuation of renewable energy will lead to the life decay acceleration of electrolytic cell and battery in the distributed electric-thermo-hydrogen system. In order to extend the service life of electrolytic cell and battery while improve the economy of distributed electric-thermo-hydrogen system, an optimal scheduling strategy for distributed electric-thermo-hydrogen system is proposed considering the life decay characteristics of electrolytic cell and battery. The life decay characteristics of electrolytic cell and battery. The life decay characteristics of electrolytic cell and battery are analyzed, and the life decay models of electrolytic cell and battery are established. Taking the comprehensive improvement of the life of electrolytic cell and battery and the system economy in the distributed electric-thermo-hydrogen system as the optimal object, an optimal scheduling model of distributed electric-thermo-hydrogen system considering the life decay characteristics of electrolytic cell and battery is established, and the scenario generation method is used to deal with the uncertainty of renewable energy and load. A distributed electric-thermo-hydrogen system containing a variety of energy conversion and storage devices is taken as an example for simulation, and the results verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: renewable energy; distributed electric-thermo-hydrogen system; electrolytic cell; electric batteries; lifetime decay characteristics

## 附录 A:

## 氢燃料电池启停模型:

考虑启动时延的氢燃料电池启停特性的数学模型如下:

$$A_{\text{on},t-\alpha^{\text{EC}}}^{\text{FC}} - A_{\text{off},t}^{\text{FC}} = U_t^{\text{FC}} - U_{t-\Delta t}^{\text{FC}}$$
(A1)

$$A_{\text{on},t}^{\text{FC}} \le 1 - U_{t-\Delta t}^{\text{FC}} \tag{A2}$$

$$A_{\text{off},t}^{\text{FC}} \le U_{t-\Delta t}^{\text{FC}} \tag{A3}$$

$$\sum_{t=1}^{T} A_{\text{on},t}^{\text{FC}} \le A_{\text{on,max}}^{\text{FC}}$$
(A4)

$$\sum_{t=1}^{T} A_{\text{off},t}^{\text{FC}} \le A_{\text{off},\text{max}}^{\text{FC}}$$
(A5)

式中: 0-1 变量 $U_{t}^{\text{FC}}$ 为氢燃料电池的开关状态,  $A_{\text{off},t}^{\text{FC}}$  分别为氢燃料电池的开始启动动作和开始关停 动作;  $\alpha^{\text{FC}}$ 为氢燃料电池启动延时;  $A_{\text{off},\text{max}}^{\text{FC}}$  分别为氢燃料电池日内开机和停机次数上限。

氢燃料电池产出模型:

$$P_t^{\rm FC} = \left(\gamma m_{\rm H2,t}^{\rm FC}\right) / \Delta t \tag{A6}$$

$$P_{\text{ele},t}^{\text{FC}} = \eta_{\text{ele}}^{\text{FC}} P_t^{\text{FC}} U_t^{\text{FC}}$$
(A7)

$$Q^{\rm FC} = \eta_{\rm heat}^{\rm FC} P_t^{\rm FC} \tag{A8}$$

式中:  $P^{\text{FC}}$ 为燃料电池的等效工作功率;  $\eta_{\text{ele}}^{\text{FC}}$ 和  $\eta_{\text{heat}}^{\text{FC}}$ 分别为氢燃料电池产电和产热效率,  $P_{\text{ele},t}^{\text{FC}}$ 和  $Q_t^{\text{FC}}$ 分别为氢燃料电池产电和产热功率,  $m_{\text{H2},t}^{\text{FC}}$ 为氢燃料电池消耗的氢气质量。

## 氢燃料电池功率模型:

氢燃料电池工作上下限功率约束:

$$P_{t}^{\text{FC}} \ge \left( U_{t}^{\text{FC}} P_{\min}^{\text{FC}} + \sum_{\tau=0}^{\alpha^{\text{FC}} -\Delta t} A_{\text{on}, t-\tau \Delta t}^{\text{FC}} P_{\text{boot}}^{\text{FC}} \right)$$
(A9)

$$P_{t}^{\text{FC}} \leq \left( U_{t}^{\text{FC}} P_{\max}^{\text{FC}} + \sum_{\tau=0}^{\alpha^{\text{FC}}} A_{\text{on}, t-z\Delta t}^{\text{FC}} P_{\text{boot}}^{\text{FC}} \right)$$
(A10)

式中: **P**<sup>FC</sup><sub>max</sub> / **P**<sup>FC</sup><sub>min</sub> 分别为氢燃料电池在开机状态下工作功率上/下限; **P**<sup>FC</sup><sub>boot</sub> 为氢燃料电池启动过程中消耗的 功率。

氢燃料电池爬坡功率约束:

$$\left|P_{t}^{\text{FC}} - P_{t-\Delta t}^{\text{FC}}\right| \le U_{t}^{\text{FC}} \Delta P_{\text{max}}^{\text{FC}} + \left(1 - U_{t}^{\text{FC}}\right) P_{\text{max}}^{\text{FC}}$$
(A11)

式中: Δ**P**<sup>FC</sup> 为氢燃料电池在开机状态下单位时段最大爬坡功率, **P**<sup>FC</sup> 为氢燃料电池的工作功率上限。 **氢燃料电池温度模型**:

$$T_{t+\Delta t}^{\text{FC}} = T_t^{\text{FC}} + \left(Q_t^{\text{FC}} - Q_{\text{loss},t}^{\text{FC}} - Q_{\text{move},t}^{\text{FC}}\right) \Delta t / C^{\text{FC}}$$
(A12)

$$Q_{\text{loss},t}^{\text{FC}} = \left(T_t^{\text{FC}} - T_a^{\text{FC}}\right) / R^{\text{FC}}$$
(A13)

$$T_{\min}^{\rm FC} \le T_t^{\rm FC} \le T_{\max}^{\rm FC} \tag{A14}$$

式中:  $T_a^{FC}$  为氢燃料电池外界温度,  $C^{FC}$  为氢燃料电池集总热容,  $R^{FC}$  为氢燃料电池热阻,  $Q_{loss}^{FC}$  为氢燃料电池 损失的热功率,  $Q_{move,t}^{FC}$  为输出系统外的热功率,  $T_t^{FC}$  为氢燃料电池温度,  $T_{max}^{FC}$  和 $T_{min}^{FC}$  分别为氢燃料电池温度上 下限。

电锅炉模型:

$$Q_t^{\rm EB} = \eta^{\rm EB} P_t^{\rm EB} \tag{A15}$$

$$P_{\min}^{\text{EB}} U_t^{\text{EB}} \le P_t^{\text{EB}} \le P_t^{\text{EB}} U_t^{\text{EB}}$$
(A16)

$$\sum_{t=1}^{T} |U_t^{\text{EB}} - U_{t-1}^{\text{EB}}| \le N_t^{\text{EB}}$$
(A17)

式中: η<sup>EB</sup> 为电锅炉电热转换效率, P<sup>EB</sup><sub>max</sub> 和 P<sup>EB</sup><sub>min</sub> 分别为电锅炉出力上下限, U<sup>EB</sup><sub>t</sub> 为电锅炉在 t 时段的启停状态, N<sup>EB</sup><sub>t</sub> 为电锅炉日最大启停次数。

蓄电池模型:

$$\begin{cases} S_{\min} \leq S_{t} \leq S_{\max} \\ S_{t} = S_{t-\Delta t} - P_{t}^{\text{dis}} \Delta t / (\eta_{\text{dis}} E_{\text{rate}}^{\text{ESS}}) + \eta_{\text{ch}} P_{t}^{\text{ch}} \Delta t / E_{\text{rate}}^{\text{ESS}} \\ S_{\text{T}} = S_{0} \\ 0 \leq P_{t}^{\text{ch}} \leq P_{\max}^{\text{ch}} B_{t}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{t}^{\text{dis}} \leq P_{\max}^{\text{dis}} B_{t}^{\text{dis}} \\ B_{t}^{\text{ch}} + B_{t}^{\text{dis}} \leq 1 \end{cases}$$
(A18)

式中:  $S_t$ 为t时段的蓄电池的 SOC,  $E_{rate}^{ESS}$ 为蓄电池的额定容量,  $P_t^{ch}$ 和 $P_t^{dis}$ 分别为t时段蓄电池的充放电 功率,  $\eta_{ch}$ 和 $\eta_{dis}$ 分别为充放电效率,  $P_{max}^{ch}$ 和 $P_{max}^{dis}$ 分别为蓄电池充放电最大功率限值,  $S_{max}$ 和 $S_{min}$ 分别为电 池 SOC 的上下限,  $B_t^{ch}$ 和 $B_t^{dis}$ 分别为充放电标志位。

储热罐模型:

$$\begin{cases}
H_{\min} \leq H_{t} \leq H_{\max} \\
H_{t} = H_{t-\Delta t} - Q_{t}^{\operatorname{dis}} \Delta t / \eta_{\operatorname{heat}}^{\operatorname{dis}} + \eta_{\operatorname{heat}}^{\operatorname{ch}} Q_{t}^{\operatorname{ch}} \Delta t \\
H_{T} = H_{0} \\
0 \leq Q_{t}^{\operatorname{ch}} \leq Q_{\max}^{\operatorname{ch}} A_{t}^{\operatorname{ch}} \\
0 \leq Q_{t}^{\operatorname{dis}} \leq Q_{\max}^{\operatorname{dis}} A_{t}^{\operatorname{dis}} \\
A_{t}^{\operatorname{ch}} + A_{t}^{\operatorname{dis}} \leq 1
\end{cases}$$
(A19)

式中: $H_t$ 为t时段的蓄热池的热量, $Q_t^{ch}$ 和 $Q_t^{dis}$ 分别为t时段储热罐的充放热功率, $\eta_{heat}^{ch}$ 和 $\eta_{heat}^{dis}$ 分别为蓄热 和放热效率, $Q_{max}^{ch}$ 和 $Q_{max}^{dis}$ 分别为热储能放热最大功率限值, $H_{max}$ 、 $H_{min}$ 分别为蓄热池容量的上下限, $A_t^{ch}$ 、  $A_t^{dis}$ 分别为蓄放热标志位。

储氢罐模型:

$$\begin{cases} m_{\min}^{\text{HST}} \leq m_{t}^{\text{HST}} \leq m_{\max}^{\text{HST}} \\ m_{t+1}^{\text{HST}} = m_{t}^{\text{HST}} + \eta_{\text{in}}^{\text{HST}} m_{t}^{\text{HST,in}} - m_{t}^{\text{HST,out}} / \eta_{\text{out}}^{\text{HST}} \\ m_{t}^{\text{HST}} = m_{0}^{\text{HST}} \\ 0 \leq m_{t}^{\text{HST,in}} \leq B_{t}^{\text{HST,in}} \cdot m_{\max}^{\text{HST,in}} \\ 0 \leq m_{t}^{\text{HST,out}} \leq B_{t}^{\text{HST,out}} \cdot m_{\max}^{\text{HST,out}} \\ 0 \leq m_{t}^{\text{HST,out}} + B_{t}^{\text{HST,in}} \leq 1 \end{cases}$$
(A20)

式中: $m_t^{\text{HST}}$ 为储氢罐中氢气质量; $\eta_{\text{in}}^{\text{HST}}$ 和 $\eta_{\text{out}}^{\text{HST}}$ 分别为充放氢效率; $m_{\text{max}}^{\text{HST}}$ 和 $m_{\text{min}}^{\text{HST}}$ 分别为储氢罐储氢量上下限; $m_{\text{in},t}^{\text{HST}}$ 和 $m_{\text{out},t}^{\text{HST}}$ 分别为t时段向储氢罐中充进的氢气或者放出的氢气质量; $B_{\text{in},t}^{\text{HST}}$ 和 $B_{\text{out},t}^{\text{HST}}$ 分别为注入氢气和释放氢气的上限。

## 附录 B:

表 B1 电解槽和燃料电池运行参数	
Table B1 Operating parameters of electrolytic cell and fuel	cell
I ATTING IABLE IN	

1 (	T Operating parameters of electrolytic cell and T						
	设备参数	电解槽	燃料电池				
	产氢/电效率	0.65	0.45				
	产热效率	0.3	0.5				
	温度下限/℃	50	25				
	温度上限/℃	80	100				
	出力上/下限	1/0.05	1/0.05				
	爬坡上限	100%/30min	100%/30min				
	开机次数上限	2	2				
	关机次数上限	2	2				
	启动延时	0	0				

## 表 B2 储能设备参数

T-1-1- D2

Table B2 Energy storage equipment parameters						
	设备	充放效率	储能范围/%	充放速率上限/%		
	电储能	0.95/0.95	20~90	20		
	热储能	0.95/0.95	10~90	20		
	储氢罐	0.95/0.95	30~80	10		

## 表 B3 分时电价

Table B3 Time-of-use price				
价格/[元・(kW・h) <sup>-1</sup> ]	时间段			
0.45	00:00-06:00			
1.21	07:00-11:00、18:00-22:00			
0.73	12:00-17:00			

#### 表 B4 不同案例的优化结果

Table B4 Optimization results of different cases

案例	弃风弃光切	购售电费	碳排放成	售氢售热	蓄电池寿命损	电解槽寿命损	总寿命损耗	运行收	总收益(含寿
	负荷惩罚/元	用/元	本/元	收益/元	耗成本/元	耗成本/元	成本/元	益/元	命损耗)/元
1	0	5129.56	5735.39	16961.26	1083.39	1923.69	3007.08	6096.3	3089.22
2	0	5214.62	5723.83	16952.27	887.99	1973.72	2861.72	6013.81	3152.1
3	0	5643.08	6067.77	17484.84	1152.33	980.21	2132.54	5773.98	3641.45
4	0	5591.15	6011.41	17305.54	910.61	991.13	1901.74	5702.99	3801.24

# 附录 C:







Fig.C3 Electric power balance results







图 C6 不同售热和售氢价格下收益情况 Fig.C6 Profit under different heat and hydrogen sales prices