Vol.43 No.12 Dec. 2023

# 计及海水淡化电制氢和热惯性的海港 综合能源系统优化运行模型

杜天硕1,2,李军徽1,葛磊蛟2,张博涵3

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;
2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072;
3. 湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室,湖北 武汉 430068)

摘要:针对大型海港综合能源系统存在的多类型能源需求难以平衡的问题,提出了一种考虑海水淡化电制氢 和热惯性的海港综合能源系统优化运行模型。充分发挥海港的地理优势,引入海水淡化装置和电解水制氢 系统作为综合能源的可控负荷,实现风光发电的就近消纳,并为海港提供水负荷;考虑热负荷的惯性和人对 温度舒适度的约束,灵活调整供热负荷的输出,进而构建了以日化综合最小用能成本为目标的海港综合能源 系统优化运行模型。仿真分析表明,所提模型能够在满足海港内负荷需求的基础上,减少系统的运维成本、 购能成本、碳排放成本以及弃风弃光成本。

关键词:海港综合能源系统;热惯性;海水淡化;电解水制氢;电转气 中图分类号:TM76;U658.91 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202309027

# 0 引言

作为海陆交通的重要枢纽,海港的碳排放问题 日益突出,已成为港口行业关注的焦点<sup>[1]</sup>。另外,随 着新型电力系统和经济的快速发展,电气化程度的 提升以及日益增长的冷/热/电/水等能源需求, 促使海港逐渐向"以电为核心,电、热、冷、水多能流 融合"为特点的大型海港综合能源系统转变<sup>[2]</sup>。因 此,为应对不断增长的港口能源需求,并实现国际海 事组织提出的零碳目标<sup>[3]</sup>,海港综合能源系统已成 为当前深入研究的方向,旨在降低碳排放,并增加清 洁能源的利用<sup>[45]</sup>。

综合能源系统所包含的设备种类繁多<sup>[6]</sup>,其中, 冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)、电转气(power to gas, P2G)和储能系统的联 合应用已经受到了广泛关注<sup>[7,8]</sup>。海港综合能源系 统在考虑上述多能流融合的基础上,更加注重对可 再生能源的利用,这对海港能源配置与优化运行提 出了新挑战。现有研究针对海港综合能源系统提出 了不同的优化方案,例如:文献[9]构建了海港综合 能源系统双层优化模型,提升了沿海港口综合能源 系统的经济性和低碳性;文献[10]通过海上电气化 技术之间的协同作用,在一个统一的框架内共同优

收稿日期:2023-05-17;修回日期:2023-09-17

在线出版日期:2023-10-08

基金项目:现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部 重点实验室基金资助项目(MPSS2022-09)

Project supported by the Key Laboratory of Modern Power Systems Simulation and Control & Renewable Energy Technology(MPSS2022-09) 化海边/堆场运营和港口能源系统管理;文献[11] 提出了一种海港综合能源系统物流-能量协同优化 调度方法,降低了综合能源系统的运行成本以及碳 排放量。在海港综合能源优化运行过程中合理地考 虑更多因素,能够进一步丰富多元化能源的利用方 式,从而提高综合能源系统运行的经济性、灵活性和 可持续性<sup>[4]</sup>。

海水淡化设备作为一种可控负荷,具有高效、清 洁、高耗能、出力稳定的特点。在海港综合能源系统 中增加海水淡化设备不仅能满足海港综合能源系统 的水资源需求,同时能够达到削峰、减少弃风弃光的 目的,从而提高可再生能源的利用率<sup>[12-14]</sup>。此外,随 着海港综合能源系统中可再生能源占比的增加,电 解水制氢已经成为调节风光能源输出电力的绿色手 段,这是因为氢能可以实现海港电能的大规模、长时 间储存。且在考虑海水淡化设备的基础上增加电解 水制氢过程可以消耗部分经海水淡化产生的淡水, 进而减轻蓄水池中的蓄水压力。文献[15]提出了考 虑电解水制氢的港口综合能源系统的经济调度模 型,有效降低了总能源成本和碳排放。文献[5]在展 望中指出,在海港综合能源中考虑制氢技术是促进 海港低碳经济发展的重要途径。

传统的综合能源系统通常要时刻保持热负荷的 平衡,造成了碳排放的增加。部分研究在传统综合 能源中考虑了热惯性以缓解该问题,例如:文献[16] 在综合能源系统中考虑热惯性,并通过园区规模的 综合能源系统验证了模型的有效性;文献[17]提出 考虑P2G与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度 模型,以系统运营成本最低为目标对模型进行了优 化;文献[18]在综合能源系统中引入人体舒适度模型,算例分析结果表明该模型可以提高经济性和新能源的消纳。由于热力系统具有较大的惯性,热用户对于热的感受具有滞后性,基于这种模糊感受,引入热舒适度模型,可以使综合能源系统的出力和热负荷需求在时间上具有区分性,增强系统的调峰能力。

尽管现有研究已经证明考虑海水淡化、电解水 制氢以及热惯性有助于提高综合能源系统的经济性 和灵活性,但是鲜有研究面向多类型能源需求难以 平衡的难题,将三者进行综合考虑对海港综合能源 系统进行优化调度。

综上所述,本文针对现有海港综合能源系统研究的不足,提出一种计及海水淡化电制氢和热惯性的海港综合能源系统的优化调度模型。首先,分析了海水淡化装置(sea water desalting plant,Des)和海港综合能源系统中各机组数学模型和约束条件,以海港综合能源系统日运行成本最低为目标,构建了考虑热惯性和舒适度的系统模型;其次,针对由于引入海水淡化装置、蓄水池之间的耦合关系造成的求解陷入局部最优解的问题,提出了自适应螺旋飞行麻雀搜索算法(adaptive spiral flying sparrow search algorithm,ASFSSA);最后,通过仿真验证了所提模型的可行性,结果表明与传统方法相比,所提模型的运行成本更低,碳排放量更少。

# 1 海港综合能源系统

## 1.1 系统拓扑结构

海港综合能源系统的结构模型如附录A图A1 所示。其中,电负荷由海港基地附近的风机(wind turbine,WT)、光伏(photovoltaic,PV)、蓄电池(battery,BAT)、燃气轮机(gas turbine,GT)以及从电网 购电提供;海港综合能源系统所需要的热负荷由燃 气锅炉(gas boiler,GB)、余热锅炉(waste heat boiler, WHB)提供<sup>[19]</sup>;冷负荷由吸收式制冷机(absorption chiller,AC)和电制冷机提供。经过海水淡化装置的 淡水一部分提供给P2G装置中的电解槽电解水制 氢,一部分提供给水负荷,储存在蓄水池(reservoir, Res)中<sup>[20]</sup>。P2G装置的原理如附录A图A2所示,电 解槽(electrolyzer,EL)电解水产生的氢气在甲烷反 应器(methanation reactor,MR)中与二氧化碳发生 Sabatier反应合成甲烷。

#### 1.2 关键设备的数学模型

在海港综合能源系统中引入海水淡化装置,可 作为一种可控电力负荷,达到削峰、减少弃风弃光的 目的,并为系统提供淡水。海水淡化系统与蓄水池 相结合,使得海水淡化装置的运行更加灵活。本文 模型中,海水淡化系统优先使用多余的新能源发电 进行海水淡化,保证综合能源系统效益的最大化。 海水淡化系统采用反渗透膜法,所消耗功率与海水 淡化机组的产水体积之间的关系为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_0} \frac{P_{\text{des}}(t)}{G_i} = V(t) \\ G_i = f_{\text{os}} C_{\text{zero}} \frac{1}{R} \ln \frac{1}{1-R} \\ R = \frac{V}{V_0} \end{cases}$$
(1)

式中: $N_{\rm D}$ 为海水淡化装置的数量; $P_{\rm des}(t)$ 为t时刻单 台海水淡化装置的额定功率; $G_i$ 为第i台海水淡化装 置产水比能耗;V(t)为t时刻海水淡化机组的产水体 积; $f_{\rm os}$ 为渗透压系数; $C_{\rm zero}$ 为海水初始浓度;R为回收 率;V为淡水产量; $V_0$ 为进水量。

蓄水池在t时刻的水量 $V_{v}(t)$ 为:

 $V_{v}(t) = V_{v}(t-1) + V(t) - V_{load}(t) - V_{el}(t)$  (2) 式中: $V_{v}(t-1)$ 为蓄水池在t-1时刻的水量; $V_{load}(t)$ 为 t时刻水负荷的需求量; $V_{el}(t)$ 为t时刻电解槽用 水量。

P2G装置采用碱性电解槽进行制氢,碱性电解 槽生产的氢气功率、用水量以及甲烷反应器生产天 然气的速率如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{\rm EL,\,H2}(t) = \eta_{\rm EL} P_{\rm el}(t) \\ V_{\rm el}(t) = P_{\rm el}(t) V_{\rm H20} \\ F_{\rm MR}(t) = \eta_{\rm MR} P_{\rm MR,\,H2}(t) \end{cases}$$
(3)

式中: $P_{\text{EL,H2}}(t)$ 为t时刻电解槽生产的氢气功率; $\eta_{\text{EL}}$ 为电解槽制氢效率; $P_{\text{el}}(t)$ 为t时刻电解槽功率; $V_{\text{H20}}$ 为电解槽单位功率下耗水量; $P_{\text{MR,H2}}(t)$ 为t时刻输入 到甲烷反应器的氢气功率; $\eta_{\text{MR}}$ 为甲烷反应器的生产 天然气效率; $F_{\text{MR}}(t)$ 为P2G装置生成的天然气。

燃气轮机模型为:

$$\begin{cases} P_{\rm GT}(t) = \boldsymbol{\eta}_{\rm GT}^{\rm e} \boldsymbol{F}_{\rm GT}(t) \\ H_{\rm GT}(t) = \boldsymbol{\eta}_{\rm GT}^{\rm h} \boldsymbol{F}_{\rm GT}(t) \end{cases}$$
(4)

式中: $P_{cr}(t)$ 为t时刻燃气轮机的电功率; $H_{cr}(t)$ 为t时刻燃气轮机的热功率; $F_{cr}(t)$ 为t时刻输入燃气轮机的天然气功率; $\eta_{cr}^{\circ}$ 为燃气轮机的电效率; $\eta_{cr}^{h}$ 为燃 气轮机的热效率。

燃气锅炉模型为:

$$H_{\rm GB}(t) = \eta_{\rm GB} F_{\rm GB}(t) \tag{5}$$

式中: $H_{GB}(t)$ 为t时刻燃气锅炉的输出热功率; $F_{GB}(t)$ 为t时刻输入燃气锅炉的天然气功率; $\eta_{GB}$ 为燃气锅炉的热效率。

余热锅炉模型为:

$$H_{\rm WHB}(t) = \eta_{\rm WHB} H_{\rm GT}(t) \tag{6}$$

式中:H<sub>WHB</sub>(t)为t时刻余热锅炉的热功率;η<sub>WHB</sub>为余 热锅炉的热效率。

电制冷机模型为:

$$L_{\rm ver}(t) = \eta_{\rm ver} P_{\rm ver}(t) \tag{7}$$

式中: $L_{ver}(t)$ 为t时刻制冷机的冷效率; $P_{ver}(t)$ 为t时 刻输入制冷机的电功率; $\eta_{ver}$ 为制冷机的制冷效率。

吸收式制冷机模型如下:

$$L_{\rm AC}(t) = \eta_{\rm AC} H_{\rm AC}(t) \tag{8}$$

式中: $L_{AC}(t)$ 为t时刻吸收式制冷机的制冷功率;  $H_{AC}(t)$ 为t时刻吸收式制冷机吸收的热功率; $\eta_{AC}$ 为 吸收式制冷机的制冷效率。

## 2 供热系统热惯性以及舒适度模型

与电力系统中电功率需要保持实时平衡特性不同,供热系统一般具有很大的热惯性,其传播介质一般为热水或蒸汽,传播速度较慢,且具有延迟性,在停止提供热能后的一定时间内,仍然能够保持较为适宜的温度<sup>[21]</sup>。在综合能源系统中考虑热惯性能够减少综合能源系统热源出力,提高经济性、减少碳排放。供热区域热惯性采用的模型为:

$$\begin{cases} k_{3}T_{in}(t) - T_{in}(t-1) = k_{1}H_{load}(t) + k_{2}T_{out}(t) \\ k_{1} = \frac{\Delta T}{C^{a}S} \\ k_{2} = \frac{\mu^{a}\Delta T}{C^{a}} \\ k_{3} = 1 + k_{2} \\ \Delta T = T_{in}(t) - T_{out}(t) \end{cases}$$
(9)

式中: $T_{in}(t)$ 为t时刻室内温度; $T_{out}(t)$ 为t时刻室外温 度; $H_{load}(t)$ 为t时刻的热负荷; $\Delta T$ 为供热温度差; $C^{a}$ 为单位面积下的热熔;S为供热面积; $\mu^{a}$ 为单位温度 差下的热损失; $k_{1}$ — $k_{3}$ 为系数。

人体对冷热感受程度具有模糊性,采用平均标 度预测(predicted mean vote,PMV)评价指标描述人 体对冷热感受程度<sup>[22]</sup>,如式(10)所示。

$$\lambda_{\rm PWV} = 2.43 - \frac{3.76 \left( T_{\rm r} - T_{\rm in}(t) \right)}{M \left( T_{\rm el} + 0.1 \right)} \tag{10}$$

式中:M为人体能量代谢率;T<sub>et</sub>为人体所穿服装热阻;T<sub>r</sub>为人体在热舒适状态下的平均皮肤温度,取 33.5℃。

现行的PMV指标有7级标尺,如附录A图A3所示,PMV值为0时对应人体的最佳热舒适状态。

基于上述原理,将供热系统的热惯性以及PMV 指标引入模型中,在满足人体舒适度的前提下,灵活 调整供热负荷的输出,减少系统的运行成本和碳 排放。

# 3 考虑海水淡化电制氢和热惯性的海港综合 能源系统优化运行

本文在考虑系统运维成本、购买成本、弃风弃光 成本以及碳排放成本的基础上,以系统总日化成本 最低为优化目标,综合考虑设备出力、蓄水池、蓄电 池、机组出力限额、功率平衡、供热平衡以及 PMV 等 约束,通过模型求解,优化海港综合能源系统的日内 优化运行模型,减少碳排放成本,促进风电的消纳, 且满足系统内用水负荷的需求。海港综合能源系统 模型框架如图1所示。

目标函数				
经济性影响指标				
碳排放成本	弃风弃光成本			
运行成本	购水成本			
购电成本	购气成本			

计及海水淡化电制氢和热惯性的海港综合能源系统模型

电源出力约束	蓄水池水量约束			
蓄电池约束	海水淡化启停约束			
P2G功率约束	制热制冷装置约束			
海水淡化装置约束	供暖温度与PMV约束			
约束条件				

#### 图1 海港综合能源系统模型框架

Fig.1 Model framework for seaport integrated energy system

#### 3.1 目标函数

为保证综合能源的合理经济性,提出最小化综 合日化成本。

$$\begin{cases} f = \min C \\ C = C_{\max} + C_{\text{cut}} + C_{\text{buy}} + C_{\text{co2}} \\ C_{\max} = \sum_{i=1}^{n} C_{\max,i} P_{i} \\ C_{\text{cut}} = \sum_{t=1}^{n} g_{q} P_{\text{cut}}(t) \\ C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{24} g_{e} P_{e,\text{buy}}(t) + \sum_{i=1}^{24} g_{g} F_{g,\text{buy}}(t) + \\ \sum_{t=1}^{24} g_{\text{H20}} P_{\text{H20,buy}}(t) \\ C_{\text{co2}} = c_{\text{co2}} \sum_{t=1}^{24} (\alpha_{\text{co2}} P_{e,\text{buy}}(t) + \beta_{\text{co2}} F_{g,\text{buy}}(t)) \end{cases}$$
(11)

式中:f,n分别为目标函数和设备的种类数; $C \ C_{man}$ 、  $C_{cut}, C_{buy}, C_{co2}$ 分别为日化成本、运维成本、弃风弃光 成本、购买成本、碳排放成本; $C_{man,i}$ 为第i台设备的 运维成本; $P_i$ 为第i台设备的设备容量; $g_a$ 为弃风弃 光价格; $P_{eut}(t)$ 为t时刻弃风弃光功率; $g_e$ 为购电价格; $P_{e,buy}(t)$ 为t时刻购电功率; $g_g$ 为购气价格; $F_{g,buy}(t)$ 为t时刻购气功率; $g_{H20}$ 为购水价格; $P_{H20,buy}(t)$ 为t时 刻购水量; $c_{eo2}$ 为单位碳价; $\alpha_{eo2}$ 为电网的二氧化碳排 放因子,取 0.785; $\beta_{eo2}$ 为天然气的二氧化碳排放因子,取 0.19。

### 3.2 约束条件

海港园区型综合能源系统需要满足的不等式约 束包括电源出力约束、蓄电池约束、P2G功率约束、 海水淡化装置约束、蓄电池水量约束、海水淡化装置 启停次数约束、储氢罐约束、制热制冷装置约束和供 暖温度与PMV约束;等式约束包括电、热、气、冷、氢 功率平衡。具体表达式见附录B式(B1)—(B14)。

#### 3.3 模型求解

本文构建的考虑海水淡化电制氢和热惯性的海 港综合能源系统模型是一个含有等式约束以及不等 式约束的混合整数线性模型,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) = 0 \\ h_i(x) \le 0 \end{cases}$$
(12)

在引入海水淡化、蓄水池约束后,模型将变得复杂,常规的求解算法存在适应性差、容易陷入局部最优解和收敛速度慢的问题,因此采用全局搜索能力强、收敛速度快、鲁棒性强的ASFSSA。该算法首先在传统的麻雀优化算法中引入tent混沌映射初始化策略以提高初始种群的质量;然后,结合Levy飞行机制和自适应搜索权重来平衡搜索方法,在提高搜索效率的同时提高所获得的每个解的质量,从而增强算法的搜索能力,具体过程见附录C式(C1)—(C4)。

最后,引入可变螺旋位置更新策略,使追随者位 置更新变得更加灵活,开发了各种搜索路径进行位 置更新,并平衡了算法的全局搜索和局部搜索。可 变螺旋位置更新策略的公式如下:

$$x_{i,j}^{t^{d}+1} = \begin{cases} Q e^{\frac{x_{i,m}^{e} - x_{i,j}^{e}}{t^{2}}} & i > \frac{N}{2} \\ x_{B}^{t^{d}+1} + \left| x_{i,j}^{t^{d}+1} - x_{B}^{t^{d}+1} \right| A^{+} L e^{zl} \cos\left(2\pi l\right) & \ddagger \& \end{cases}$$
(13)

式中:Q为服从正态分布的随机数;N为混沌序列中的粒子数; $x_{wrost}^{s^{i}}$ 为种群中最差个体位置; $x_{B}^{s^{i+1}}$ 为种群中最佳个体位置; $z=e^{k\cos[\pi(1-i/N_{ker,max})]}$ ,其随操作次数而变化,螺旋线的大小和振幅根据 cos函数进行动态调整,k为变化系数,k=5, $N_{iter_max}$ 为最大迭代次数;L为元素为1的矩阵;A<sup>+</sup>为随机数矩阵;l为均匀分布随机数, $l\in[-1,1]$ 。

优化调度模型流程图如图2所示,输入光伏风 电预测数据、设备的参数以及电、热、冷、水负荷需 求,对海港综合能源系统进行日内优化调度。





### 4 算例仿真

## 4.1 算例设置

本文以北方某海港为例进行算例分析,以24 h 为1个周期进行优化调度。海港内风光电源及各设 备参数如附录D表D1—D3所示,海港内水负荷需求 及风电预测、光伏预测、负荷需求分别如附录D图 D1及图D2所示。分时电价如附录D表D4所示,天 然气价取 0.35 元 / (kW·h),g<sub>q</sub>=0.2 元 / (kW·h), g<sub>H20</sub>=5 元 /m<sup>3</sup>,C<sub>C02</sub>=0.17 元 / (kW·h)。

4.2 算例分析

为了验证考虑海水淡化电制氢和热惯性的综合 能源系统最优调度模型的有效性和可行性,本文对 4种优化模型进行分析。

模式1:不考虑海水淡化电制氢和热惯性的海港综合能源系统模型。

模式2:考虑海水淡化电制氢,但不考虑热惯性 的海港综合能源系统模型。

模式3:考虑热惯性,但不考虑海水淡化电制氢 的海港综合能源系统模型。

模式4:考虑海水淡化电制氢以及热惯性的海 港综合能源系统模型。

4.2.1 系统成本分析

4种模式下的成本如表1所示。为展示考虑海 水淡化制氢带来的成本效益,将模式2与模式1进行 对比。可以看出,考虑海水淡化电制氢可以为电制 氢以及负荷提供水,减少了购水成本与弃风弃光成 本,总成本较模式1降低了249.07元。为展示考虑 热惯性的成本效益,将模式3与模式1进行对比。可 看出,由于模式3考虑了负荷的热惯性,减少了产热 设备的出力,系统的运维成本、购买成本以及碳排放 成本得以降低,总成本较模式1降低了1554.28元。 模式4同时考虑了海水淡化电制氢以及热惯性, 减少了产热设备的出力以及弃风弃光现象的产生, 同时满足了海港内用水负荷的需求以及制氢用水 需求,使得购能成本、碳排放成本大幅度降低。相比 于模式1—3,模式4的总成本分别降低了1814.85、 1565.78、260.57元,具有最佳的成本效益。综上所 述,考虑海水淡化电制氢以及热惯性,在满足海港内 供水需求后,能够有效减少海港内部弃风弃光现象 的产生,同时灵活调整机组的热出力,减少系统的碳 排放,促进内部多能流互补,从而降低海港综合能源 系统的总运行成本。

表1 4种模式的成本

Table 1 Costs of four modes

模式	运维成 本 / 元	购买成 本 / 元	碳排放 成本 / 元	弃风弃光 成本 / 元	总成 本 / 元
1	1474.47	6039.32	5548.64	280.75	13343.18
2	1404.12	5898.78	5548.64	245.57	13094.11
3	1 382.46	5087.56	5048.34	270.54	11788.90
4	1470.64	4647.36	5168.70	251.63	11 528.33

4.2.2 机组电出力与风光消纳分析

上述4种模式下,各设备的出力以及购电如附录D图D3一D6所示。模式3和模式4的燃气轮机 出力小于模式1和模式2的出力,说明考虑热惯性 可以有效降低热力的消耗。模式2和模式4利用 弃风弃光进行海水淡化,减少了一部分的弃风弃光。 4种模式下的弃风弃光功率如图3所示。弃风主要 发生在00:00-05:00时段内,这是因为用电负荷较 少、风电出力较多,此时段内海水淡化装置工作,生 产淡水以供使用。这证明在海港综合能源系统内引 入海水淡化装置和电解水制氢系统作为综合能源的 可控负荷,可以实现风光的就近消纳,从而提高光伏 和风电的利用率。4种模式下,模式4的弃风弃光功 率最少,模式1最多,充分体现了本文所提模型的有 效性。



图3 4种模式下风光消纳对比

Fig.3 Comparison of WT and PV consumption under four modes

4.2.3 机组热出力分析

在考虑热惯性以后,供热区域室内外温度以及 不同季节的供热负荷分别如图4和附录D图D7所 示。4种模式的动机供热功率如图5所示。由图可 以看出,在考虑热惯性后减少了供热设备出力,模式 3和模式4的供热功率较模式1和模式2有所减少, 能够减少碳排放和购气成本,在考虑热舒适度和热 惯性的08:00-09:00和20:00-23:00时段,燃气轮 机增加了出力,余热锅炉供热功率增加。





图6、7显示了4种模式下供热设备的具体出力, 余热锅炉从燃气轮机发出的热量中再次进行产热, 由于考虑了负荷的热惯性,模式3和模式4的余热锅 炉比模式1和模式2的余热锅炉吸收的热量要少,同 时模式3和模式4的燃气锅炉的出力也要比模式1 和模式2的要少,降低了碳排放。同时吸收式制冷 机在09:00—10:00时段内吸收一部分热量进行制 冷,减少一部分电制冷机的出力,由于模式3和模式







图7 模式3、4供热设备冬季出力

Fig.7 Output of heating equipment in Mode 3 and Mode 4 during winter

4的供热功率比模式1和模式2的要小,导致吸收式 制冷机提供的冷功率要少,模式3和模式4的电制 冷机增加了一部分出力。综上所述,考虑热负荷惯 性和热舒适度弹性后,在温度允许范围内减少了一 部分热功率出力,提高了系统的调峰能力,减少了能 耗成本与碳排放成本,进而降低了综合能源系统的 总运行成本。

4.2.4 海水淡化电制氢分析

148

以模式4为例,氢气平衡如附录D图D8所示。 制取的氢气,优先供给海港的用氢负荷,满足用氢负 荷以后再流向P2G装置。以模式4为例,电解槽的 耗水量如附录D图D9所示。可以看出,在00:00— 05:00时段内P2G装置中电解槽耗水量明显较多,说 明此时间段内海水淡化装置利用弃风进行工作,提 高了新能源的利用率。

在满足海港系统内用水负荷后,蓄水池的剩余 水量如图8所示。由图中各时刻蓄水池剩余水量可 以看出,海水淡化装置产生的淡水在满足用水需求 后会存储在蓄水池中。这说明考虑海水淡化装置能 够在减少弃风的同时生产淡水以供使用,具有良好 的经济效益。



图8 蓄水池剩余水量

Fig.8 Remaining water volume of reservoir

# 4.3 优化算法对比分析

为验证本文所采用的ASFSSA具有较好的搜索能力,基于测试函数验证其性能提升效果。选取典型的Schwefel单峰函数和Rastrigrin函数作为测试函数,将ASFSSA与粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和麻雀搜索算法(sparrow search

algorithm,SSA)进行对比,种群数均取50,迭代次数 取为500,对比结果分别如附录D图D10和图D11所 示。由图可以看出,在测试函数中本文所提出的 ASFSSA与SSA和PSO算法相比,能够更早地收敛,并 具有更高的收敛精度,充分证明了本文所提ASFSSA 的优越性。

进一步,以模式4为例,将ASFSSA与PSO算法和SSA进行对比,结果如附录D图D12所示。可以看出,ASFSSA在该场景下的求解结果要优于SSA和PSO;且ASFSSA在满足求解精度的同时,收敛速度更快,更能满足工程的应用需求。

## 5 结论

针对当前海港综合能源系统中存在碳排放过高 以及弃风弃光问题,本文提出了一种考虑海水淡化 电制氢和热惯性的海港综合能源系统优化运行模 型。相比于已有的研究,本文对海水淡化设备、电解 水制氢、热惯性以及人体舒适度等因素进行了综合 考虑,具有一定的理论借鉴价值。最后,采用本文所 提ASFSSA在满足系统内约束的情况下,以最小化 运维成本、购买成本、碳排放成本以及弃风弃光成本 之和为目标进行了仿真优化。由仿真结果可知:

1)在海港综合能源系统中,引入海水淡化装置 以及电制氢装置,能够在一定程度上减少弃风现象 的产生,提高风光等可再生能源的利用率,同时满足 系统内部用氢负荷,实现海港的绿色低碳化发展,具 有推广价值;

2)在引入热惯性模型后,可以在满足用户需求 和舒适度的前提下,在温度允许范围内减少一部分 热功率出力,这样既提高了系统的调峰能力,又降低 了海港综合能源系统的碳排放,从而促进海港的低 碳发展;

3)本文所采用的ASFSSA在收敛速度与收敛精度方面均优于SSA和PSO算法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] CHOUDHARY P, VENKATA SUBHASH G, KHADE M, et al. Empowering blue economy: from underrated ecosystem to sustainable industry [J]. Journal of Environmental Management, 2021,291:112697.
- [2] GAN Mi, LI Dandan, WANG Jiawei, et al. A comparative analysis of the competition strategy of seaports under carbon emission constraints [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310:127488.
- [3] IRIS Ç, LAM J S L. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112:170-182.

[4]方斯顿,赵常宏,丁肇豪,等.面向碳中和的港口综合能源系统
 (一):典型系统结构与关键问题[J].中国电机工程学报,2023,43(1):114-135.
 FANG Sidun,ZHAO Changhong,DING Zhaohao, et al. Port in-

tegrated energy systems toward carbon neutrality(part I):typical topology and key problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(1):114-135.

- [5] 林森,文书礼,朱森,等.海港综合能源系统低碳经济发展研究 综述[J/OL].中国电机工程学报.(2022-12-07)[2023-09-17]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222359.
- [6]赵景茜,米翰宁,程吴文,等.考虑岸电负荷弹性的港区综合能 源系统规划模型与方法[J].上海交通大学学报,2021,55(12): 1577-1585.

ZHAO Jingqian, MI Hanning, CHENG Haowen, et al. A planning model and method for an integrated port energy system considering shore power load flexibility[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12):1577-1585.

[7]朱振山,盛明鼎,陈哲盛. 计及液态空气储能与综合需求响应 的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2022,42 (12):1-8.

ZHU Zhenshan, SHENG Mingding, CHEN Zhesheng. Low-carbon economic dispatching of integrated energy system considering liquid air energy storage and integrated demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (12):1-8.

- [8] SONG Xiaolong, WANG Yudong, ZHANG Zhe, et al. Economicenvironmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems [J]. Applied Energy, 2021, 281:116142.
- [9] 林森,文书礼,朱森,等.考虑碳交易机制的海港综合能源系统 电-热混合储能优化配置[J/OL].上海交通大学学报.(2023-03-23)[2023-09-17].https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu. 2022.428.
- [10] ZHANG Yue, LIANG Chengji, SHI Jian, et al. Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty [J]. Applied Energy, 2022, 313:118856.
- [11] 黄逸文,黄文焘,卫卫,等.大型海港综合能源系统物流-能量 协同优化调度方法[J].中国电机工程学报,2022,42(17): 6184-6196.
   HUANG Yiwen,HUANG Wentao, WEI Wei, et al. Logisticsmergy all-barrier antimiziting acheboling method for large

energy collaborative optimization scheduling method for large seaport integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(17):6184-6196.

- [12] KIM J, PARK K, YANG D R, et al. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113652.
- [13] 陈志颖,温步瀛,朱振山. 计及风电相关性的区域综合能源系
   统多时间尺度优化调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(8):
   25-32.

CHEN Zhiying, WEN Buying, ZHU Zhenshan. Multi-time scale optimal scheduling of regional integrated energy system considering wind power correlation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8):25-32.

 [14] 楚帅,葛维春,滕云,等.海水淡化与电制热负荷联合消纳风电的多时间尺度调度策略[J].电力系统自动化,2023,47(8): 120-131.

CHU Shuai, GE Weichun, TENG Yun, et al. Multi-time-scale scheduling strategy for combined accommodation of wind po-

wer by seawater desalination and electric heating loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 120-131.

- [15] WANG Xiaobo, HUANG Wentao, WEI Wei, et al. Day-ahead optimal economic dispatching of integrated port energy systems considering hydrogen[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2):2619-2629.
- [16] SUN Weijia, WANG Qi, YE Yujian, et al. Unified modelling of gas and thermal inertia for integrated energy system and its application to multitype reserve procurement [J]. Applied Energy, 2022, 305:117963.
- [17] 马一鸣,周夕然,董鹤楠,等.考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J].电网与清洁能源,2021,37(8):118-127,138.
   MA Yiming, ZHOU Xiran, DONG Henan, et al. Optimal dis-

patch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37 (8):118-127, 138.

[18] 江岳春,曾诚玉,郇嘉嘉,等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):
 254-260.
 JIANG Yuechun,ZENG Chengyu,HUAN Jiajia, et al. Integrated

energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):254-260.

[19] 张笑演,熊厚博,王楚通,等. 基于最优出力区间和碳交易的园 区综合能源系统灵活经济调度[J]. 电力系统自动化,2022,46 (16):72-83.

ZHANG Xiaoyan, XIONG Houbo, WANG Chutong, et al. Flexible economic dispatching of park-level integrated energy system based on optimal power output interval and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 72-83.

- [20] 林顺富,曾旭文,沈运帷,等.考虑灵活性需求的园区综合能源系统协同优化配置[J].电力自动化设备,2022,42(9):9-17.
   LIN Shunfu,ZENG Xuwen,SHEN Yunwei, et al. Collaborative optimal configuration of park-level integrated energy system considering flexibility requirement[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(9):9-17.
- [21] 孙维佳,王琦,汤奕,等.考虑气热惯性的综合能源系统备用配置方案[J].电力系统自动化,2021,45(15):11-20.
  SUN Weijia, WANG Qi, TANG Yi, et al. Reserve allocation scheme of integrated energy system considering gas and thermal inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15):11-20.
- [22] 董彧彤,王艳松,倪承波,等. 计及用热舒适度弹性的热电联合 优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(23):26-34.
  DONG Yutong, WANG Yansong, NI Chengbo, et al. Dispatch of a combined heat-power system considering elasticity with thermal comfort [J]. Power System Protection and Control, 2021,49(23):26-34.

#### 作者简介:

杜天硕(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能 源并网优化控制技术(E-mail:tjudts@126.com);

葛磊蛟(1984—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能配电网态势感知、云计算和大数据(E-mail: legendglj99@tju.edu.cn)。

#### 第 43 卷

# Optimal operation model of seaport integrated energy system with seawater desalination for hydrogen production and thermal inertia

DU Tianshuo<sup>1,2</sup>, LI Junhui<sup>1</sup>, GE Leijiao<sup>2</sup>, ZHANG Bohan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Hubei Collaborative Innovation Center of High-efficiency Utilization of Solar Energy,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is challenging to balance the demand of multiple types of energy in large-scale seaport integrated energy systems, an optimal operation model of seaport integrated energy system considering seawater desalination for hydrogen production and thermal inertia is proposed. The geographical advantages of the seaport are fully exploited, and the seawater desalination equipment and electrolytic water hydrogen production system are introduced as the controllable loads of integrated energy to achieve the nearby consumption of wind and solar power and provide water loads for the seaport. Considering the inertia of thermal load and human constraints on temperature comfort, the output of heating load is flexibly adjusted, and then an optimal operation model of the seaport integrated energy system is constructed with the objective of daily integrated minimum energy cost. Simulation analysis shows that the proposed model is able to reduce the operation and maintenance cost, energy purchase cost, carbon emission cost, and wind and light abandonment cost of the system on the basis of meeting the load demand in the seaport.

Key words: seaport integrated energy system; thermal inertia; seawater desalination; electrolytic water to hydrogen; power to gas

(上接第83页 continued from page 83)

# Multi-stage dynamic programming method for hydrogen-electric coupled microgrid considering multiple uncertainties

WANG Xiaoxue<sup>1</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, LIU Yixin<sup>2</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>, HOU Shichang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract**: Traditional single-stage planning methods face with shortcomings such as high initial investment cost, weak matching degree between sources and loads, and insufficient economy. To this end, a multi-stage dynamic planning model for hydrogen-electric coupled microgrid is proposed. Both the optimal capacity and investment time of each device can be obtained by the proposed model, and the adaptability to multiple uncertainties is enhanced based on hybrid optimization architecture. The fluctuation uncertainty feature of equipment investment cost in the planning cycle is described by stochastic probability scenarios, and the uncertainty of renewable distributed generation output and load demand is addressed by uncertainty sets. Moreover, considering the dynamic factors such as load growth rate and device performance degradation in the planning cycle of microgrid to further improve the applicability of the planning scheme to the variation of future dynamic information, and the stochastic-robust mixed integer linear programming model is constructed to describe the multi-stage dynamic programming problem in the end. Simulative results show that compared with the traditional single-stage planning model, the total cost of the proposed method is reduced by nearly 5.0%, the initial investment cost is reduced by nearly 13.9%, and the payback period is shortened by nearly 32.9%, which is conducive to improving the economy of planning scheme for microgrid. **Key words**: hydrogen-electric coupled microgrid; multiple uncertainties; stochastic-robust optimization; multi-

stage programming

# 附录 A



Fig.A3 7 levels of PMV indicators

附录 B

本文所提出模型的具体约束如下。 不等式约束如下。

1) 电源出力约束。

$$\begin{cases} P_{WT}(t) \le P_{WT}^{max} \\ P_{VT}(t) \le P_{VT}^{max} \\ P_{GT}(t) \le P_{GT}^{max} \end{cases}$$
(B1)

式中:  $P_{WT}(t)$ 、  $P_{VT}(t)$ 、  $P_{GT}(t)$ 分别为 t 时刻风电出力、光伏出力和燃气轮机出力;  $P_{WT}^{max}$ 、  $P_{VT}^{max}$ 、  $P_{GT}^{max}$  分别为风电出力最大值、光伏出力最大值和燃气轮机出力最大值。

2) 蓄电池约束。

$$\begin{cases} 0 \le P_{\rm dis}(t) \le P_{\rm dis}^{\rm max} \\ 0 \le P_{\rm c}(t) \le P_{\rm c}^{\rm max} \end{cases}$$
(B2)

式中:  $P_{c}(t)$ 、  $P_{dis}(t)$ 分别为 t 时刻充、放电功率;  $P_{c}^{max}$ 、  $P_{dis}^{max}$ 分别为充、放电功率的最大值。

3) P2G 功率约束。

$$\begin{cases} P_{el}^{\min} \le P_{el}(t) \le P_{el}^{\max} \\ 0 \le P_{MR,H_2}(t) \le P_{MR,H_2}^{\max} \end{cases}$$
(B3)

式中:  $P_{el}^{min}$ 、  $P_{el}^{max}$  分别为电解槽的输入功率的最小值和最大值;  $P_{MR,H_2}^{min}$ 、  $P_{MR,H_2}^{max}$  分别为输入氢气功率的最小值与最大值。

4) 海水淡化装置约束。

$$0 \le P_{\text{des}} \le P_{\text{des}}^{\text{max}} \tag{B4}$$

式中: P<sub>des</sub> 为海水淡化装置的最大功率

5) 蓄水池水量约束。

$$V_{\rm V}^{\rm min} \le V_{\rm V}\left(t\right) \le V_{\rm V}^{\rm max} \tag{B5}$$

式中: V<sub>v</sub><sup>min</sup>、V<sub>v</sub><sup>max</sup>分别为蓄水池的最小水量与最大水量。

6) 海水淡化装置启停次数约束。

$$\sum_{t=2}^{24} \left| u_{i,t} - u_{i,t-1} \right| \leqslant N_{\max} \tag{B6}$$

式中:  $u_{i,t}$ 、 $u_{i,t-1}$ 分别为 t和 t-1 时刻表示海水淡化装置启停的二进制变量;  $N_{max}$ 为最大启停次数,本文中 设置为 3。

7) 储氢罐约束。

$$\begin{cases} 0 \le P_{\text{dis}}^{\text{hst}}(t) \le P_{\text{dis,hst}}^{\text{max}} \\ 0 \le P_{\text{c}}^{\text{hst}}(t) \le P_{\text{c,hst}}^{\text{max}} \end{cases} (B7)$$

式中:  $P_c^{hst}(t)$ 、  $P_{dis}^{hst}(t)$ 分别为 t 时刻充氢、放氢功率;  $P_{c,hst}^{max}$ 、  $P_{dis,hst}^{max}$ 分别为充、放氢功率的最大值。 8) 制热、制冷装置约束。

$$\begin{aligned} 0 &\leq H_{\rm GT}(t) \leq H_{\rm GT}^{\rm max} \\ 0 &\leq H_{\rm GB}(t) \leq H_{\rm GB}^{\rm max} \\ 0 &\leq H_{\rm WHB}(t) \leq H_{\rm WHB}^{\rm max} \\ 0 &\leq L_{\rm vcr}(t) \leq L_{\rm vcr}^{\rm max} \\ 0 &\leq L_{\rm AC}(t) \leq L_{\rm AC}^{\rm max} \end{aligned}$$
(B8)

式中:  $H_{GT}^{max}$  为燃气轮机出力的最大值;  $H_{GB}^{max}$  为燃气锅炉出力的最大值;  $H_{WBB}^{max}$  为余热锅炉的出力最大值;

 $L_{ver}^{max}$ 为电制冷机出力的最大值;  $L_{AC}^{max}$ 为吸收式制冷机出力的最大值。

9)供暖温度与PMV约束。

$$\begin{cases} T_{\rm in}^{\rm min} \leq T_{\rm in}(t) \leq T_{\rm in}^{\rm max} \\ -\sigma \leqslant \lambda_{\rm PMV}(t) \leqslant \sigma \end{cases}$$
(B9)

式中: $T_{in}^{min}$ 、 $T_{in}^{max}$ 分别为供热时室内温度的最小值与最大值; $-\sigma$ 、 $\sigma$ 分别为 PMV 指标的最小值与最大值。

等式约束如下。

1) 电功率平衡。

$$P_{\rm des}(t) + P_{\rm el}(t) + P_{\rm vcr}(t) + P_{\rm load}(t) + P_{\rm cut}(t) + P_{\rm c}(t) = P_{\rm dis}(t) + P_{\rm GT}(t) + P_{\rm WT}(t) + P_{\rm VT}(t) + P_{\rm e,buy}(t)$$
(B10)

式中:  $P_{\text{load}}(t)$ 为t时刻电负荷需求功率。

2) 热功率平衡。

$$\begin{cases} k_{3}T_{in}(t) - T_{in}(t-1) = k_{1}H_{load}(t) + k_{2}T_{out}(t) \\ H_{GB}(t) + H_{WHB}(t) = H_{load}(t) + H_{AC}(t) \end{cases}$$
(B11)

3) 冷功率平衡。

$$L_{\rm vcr}(t) + L_{\rm AC}(t) = L_{\rm load}(t)$$
(B12)

4) 气功率平衡。

$$F_{\rm MR}(t) + F_{\rm g,buy}(t) = F_{\rm GT}(t) + F_{\rm GB}(t)$$
 (B13)

5) 氢功率平衡。

$$P_{\rm EL,H_2}(t) + P_{\rm dis}^{\rm hst}(t) = P_{\rm c}^{\rm hst}(t) + P_{\rm MR,H_2}(t) + P_{\rm H}^{\rm load}(t)$$
(B14)

式中:  $P_{\mathrm{H}}^{\mathrm{load}}(t)$ 为 t 时刻氢负荷。

# 附录 C

麻雀搜索算法的种群位置生成具有随机性大的缺点,会导致初始种群质量差,从而减缓收敛速度。 引入 tent 映射策略使种群初始化更加有序,增强算法的可控性,公式如下:

$$z_{i+1} = \begin{cases} 2z_i + \operatorname{rand}(0,1)\frac{1}{N} & 0 \le z_i \le \frac{1}{2} \\ 2(1-z_i) + \operatorname{rand}(0,1)\frac{1}{N} & \frac{1}{2} < z_i \le 1 \end{cases}$$
(C1)

式中: zi为种群生成的初始值; N为混沌序列中粒子数。

引入自适应权重能够提高发现者个体位置的质量,使其他个体更快地收敛到最优位置,并加快收敛 速度,自适应权重的公式为:

$$\omega(t^{d}) = 0.2\cos(\frac{\pi}{2}(1 - \frac{t^{d}}{N_{\text{iter_max}}})) \tag{C2}$$

式中: $\omega$ (·)表示在[0,1]之间非线性变换的性质; $t^{d}$ 为当前迭代次数; $N_{iter_{max}}$ 为最大迭代次数。改进 后发现者位置更新的公式为:

$$x_{i,j}^{t^{d}+1} = \begin{cases} \omega(t^{d}) x_{i,j}^{t^{d}} \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha^{N_{\text{iter_max}}}}\right) & R < V_{\text{st}} \\ \\ \omega(t^{d}) x_{i,j}^{t^{d}} + QL & R \ge V_{\text{st}} \end{cases}$$
(C3)

式中:  $x_{i,j}^{t^d}$ 表示在第 $t^d$ 代中第i只麻雀在第j维的位置。 $x_{i,j}^{t^{d}+1}$ 为更新后的麻雀位置; R为麻雀的预警值;  $V_{st}$ 为麻雀的安全值; Q为服从正态分布的随机数; L为元素为1的矩阵。

引入 Levy 飞行策略,提高所提出算法的性能,则位置更新公式如下:

$$x_i^{t^d+1} = x_i^{t^d} + l \oplus \text{levy}(\lambda) \tag{C4}$$

式中:  $x_i^{i^{d}+1}$ 为第 *i* 只麻雀通过 Levy 飞行策略更新后的位置;  $x_i^{i^d}$ 为第 *i* 只麻雀的位置信息;  $\oplus$  表示点到点 乘法的算术符号; *l* 为步长控制参数; levy( $\lambda$ )表示服从 Levy 分布。

# 附录 D

Table D1	Output parameters	of equipments	
设备	参数	参数值	
WT	$P_{\rm WT}^{\rm max}$ / kW	2000	
PV	$P_{\rm vt}^{\rm max}$ / kW	1000	
	$P_{\rm dis}^{\rm max}$ / kW	200	
BAT	$P_{\rm r}^{\rm max}$ / kW	200	
GT	$P_{\rm crr}^{\rm max} / kW$	500	
GB	$H^{\text{max}}$ / kW	1000	
WHB	$H_{\rm GB}^{\rm max}$ / kW	500	
	$p_{\rm WHB}$ / kW	500	
EL	$F_{el}$ / KW	50 500	
	$P_{\rm el}$ / kw	500	
MR	$P_{\rm MR,H_2}^{\rm max}$ / KW	500	
AC	$L_{\rm AC}^{\rm max}$ / kW	500	
VCR	$L_{\rm vcr}^{\rm max}$ / kW	200	
Des	$P_{\rm des}$ / kW	500	
Pas	$V_{ m v}^{ m min}$ / t	10	
Kes	$V_{ m v}^{ m max}$ / t	100	
	表 D2 设备效率	参数	
Table D2 I	Efficiency paramete	rs of equipments	
参数		参数值	
$\eta_{_{ m EL}}$		0.87	
$\eta_{ m MR}$		0.6	
$\eta^{ m e}_{ m GT}$		0.55	
$\eta^{\scriptscriptstyle  extsf{h}}_{\scriptscriptstyle  extsf{GT}}$		0.3	
$\eta_{ m GB}$		0.85	
$\eta_{_{ m WHB}}$		0.6	
$\eta_{ m vcr}$		0.8	
$\eta_{ m AC}$		0.6	
	表 D3 设备运维	费用	
Table	D3 O&M costs of	equipments	
设备	运维费	用/[元 · (kW h) <sup>-1</sup> ]	
WT PV		0.004 0.006	
BAT		0.01	
GT		0.0063	
GB		0.006	
WHB		0.004	
EL		0.15	
MK		0.001	
AU		0.001	
Des		0.1	
203	表 D4 分时电	 价	
Table	D4 Time-of-use ele	ctricity price	
时段	电价	/[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	
01:00-07:00、23:0	00-24:00	0.38	
08:00-11:00、15:0	00—18:00	0.68	
12:00-14:00, 19:0	00—22:00	1.20	

表 D1 设备出力参数



Fig.D2 Typical daily load and power supply prediction curve in winter





图 D4 模式 2 各设备出力 Fig.D4 Output of each device under Mode 2



图 D5 模式 3 各设备出力 Fig.D5 Output of each device under Mode 3













图 D9 P2G 装置中电解槽耗水量 Fig.D9 Water consumption of electrolyzer in P2G plant



