

基于 SP-IGDT 的港口岸电混合能源系统氢储能容量配置

王树东^{1,2}, 徐十伟^{1,2}, 唐伟强^{1,2}

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730000;

2. 兰州理工大学 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730000)

摘要:船舶在靠港期间使用柴油辅机会造成大量化石能源消耗和污染物排放,利用岸电供能是很好的替代方案。针对岸电系统能源问题文章引入海上风机、岸电与氢储能能组成的混合能源系统,提出一种基于混合随机规化(SP)-信息间隙决策理论(IGDT)的氢储能能规划模型。针对海上风机出力不确定性,采用随机规划得到时序典型出力场景;针对岸电靠港船舶负荷和岸电价格概率分布难以准确刻画,采用IGDT形成双目标模型处理两者不确定性,以及引入两种不同风险策略规划模型和考虑季节性因素对其进行分析。算例结果表明,混合能源系统可提高能源利用率及互动性,为决策者提供规划依据,验证了所提模型的有效性。

关键词:岸电;混合能源系统;容量配置;多元不确定性;随机规划-信息间隙决策理论

中图分类号:U653;TK91

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.015

Hydrogen storage capacity configuration for port shore hybrid energy system based on SP-IGDT

WANG Shudong^{1,2}, XU Shiwei^{1,2}, TANG Weiqiang^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Key Laboratory of Advanced Control of Industrial Process,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The use of diesel auxiliaries by ships during port calls causes a large amount of fossil energy consumption and pollutant emissions, and the use of shore power for energy supply is a good alternative. For the energy problem of shore power system, the article introduces a hybrid energy system composed of offshore wind turbines, shore power and hydrogen-based energy storage, and proposes a hydrogen-based energy storage planning model based on hybrid stochastic regularization-information gap decision theory. Aiming at the uncertainty of offshore wind turbine output, stochastic planning is used to get the time-sequence typical output scenario; for the difficulty of accurately portraying the probability distribution of shore power port call ship load and shore power price, IGDT is used to form a dual-objective model to deal with the uncertainty of the two as well as to introduce two different risky strategy planning models and analyze them by considering the seasonal factors. The results of the example show that the hybrid energy system can improve energy utilization and interaction, provide a planning basis for decision makers, and verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: shore power; hybrid energy systems; capacity allocation; multivariate uncertainty; stochastic programming-information gap decision theory

收稿日期:2023-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(62063018)

作者简介:王树东(1965—),男,教授,硕士,研究方向为电网运行技术。E-mail: wang8s8d@163.com

通信作者:徐十伟(1995—),男,硕士研究生,研究方向为储能技术。E-mail: xswxsw0415@163.com

引用格式:王树东,徐十伟,唐伟强.基于SP-IGDT的港口岸电混合能源系统氢储能容量配置[J].中国航海,2025,48(1):115-123.

WANG S D, XU S W, TANG W Q. Hydrogen storage capacity configuration for port shore hybrid energy system based on SP-IGDT[J].

Navigation of China, 2025, 48(1): 115-123. (in Chinese)

港口在国际贸易中发挥着关键作用,然而大多数港口依赖传统化石燃料,导致大量污染物排放,现今,港口实行一系列方法来应对此现象。岸上电力系统(On-shore Power System, OPS),也称为“冷熨烫(Cold Ironing, CI)”,通过从岸上给靠港船舶提供电力,可以减少船舶在泊期间污染物的排放。此外,从环境角度出发,可再生能源为良好的清洁能源。如海上风能是港口最大可再生能源之一,港口结合海上风机可带来显著的环境效益^[1]。从电能角度出发,用能量存储系统可以改善能源效率和平抑可再生能源出力波动。氢气具有无污染、高功率且可满足长期储能需求的优势,更符合港口能源需求的特点^[2-3]。因此,在港口形成海上风机、岸电与氢基储能混合能源系统来应对环境和能源问题具有重要意义。

目前已有一些关于 OPS 中环境和能源问题的相关研究。文献[4]从能源混合净排放角度,船舶接入岸电,分别减少了 CO₂ (48% ~ 70%)、SO₂ (30% ~ 60%) 和 NO_x (40% ~ 60%) 的排放;文献[5]分析了风机、光伏与氢储能混合在岸电中不同场景的应用,通过模拟验证了其有效性,同时得出最优成本效益和环境效益;文献[6]研究了港口岸电技术与储氢系统的结合,通过实际区域数据分析,港口运营实现了碳排放零足迹,能源成本平均降低了 51.8% 和 41.2%。以上对 OPS 环境和能源问题的研究,仅在确定性场景下进行可行性分析和引入氢储能系统,并未考虑 OPS 在不确定性因素下氢储能容量配置问题。

在不确定性建立模型中主要采用随机规划(Stochastic Programming, SP)和鲁棒优化,这些方法需要适量的不确定性变量信息,而信息间隙决策理论(Information Gap Decision Theory, IGDT)无需准确知晓变量信息,其从可预测值与实际值“间隙”入手,为处理不确定性建立模型提供了新的解决思路。文献[7]采用 IGDT 处理负荷波动造成的边界不确定,提出一种电-气互联综合能源系统扩展规划模型;文献[8]采用 IGDT 处理电-气市场中不确定性,构建综合负荷聚合商的储能配置模型;文献[9]引入 IGDT 处理碳捕集实时市场中负荷需求的不确定性,构建电厂与碳捕集装置耦合调度模型。以上研究仅利用 IGDT 建立单目标不确定性模型,并未进行多元不确定性模型研究。

综上,本文引入 SP-IGDT 混合规划模型,来处理含多元不确定性的岸电系统中氢储能规划问题。首先依据岸电系统构建风机出力模型、岸电模型和

氢储能规划模型,建立综合收益最大的目标函数。然后采用 SP-IGDT 处理海上风机出力、船舶到港负荷需求和岸电价格不确定性变量,并提出两种不同的策略。最后,基于某集装箱港口进行算例分析,验证所提规划模型的有效性并对影响系统容量的因素进行分析,为决策者提供参考。

1 岸电混合能源系统结构与模型

岸电混合能源系统包括海上风力发电机、岸电设备与氢储能系统。海上风电为电网和电解槽提供电能。氢储能系统为岸电设备供电并出售多余氢气,结构图如图 1 所示。

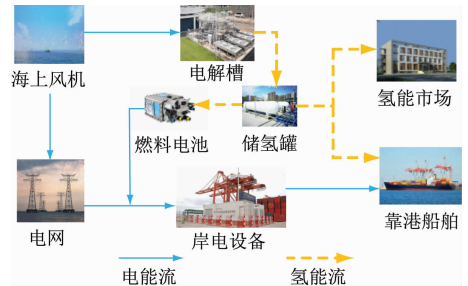


图 1 岸电混合能源结构图

Fig. 1 Cold ironing hybrid energy structure diagram

1.1 海上风机模型

与陆上风电相比,海上风电场的整体产量水平更高,年发电利用小时数更高。其出力和风速密切相关,基于预测风速计算风机输出功率可表示为

$$P_{t,WT,f} = \begin{cases} 0, & v_{t,f} < v_i \\ P_{WT,r} \left(\frac{v_{t,f} - v_i}{v_r - v_i} \right)^3, & v_i \leq v_{t,f} < v_r \\ P_{WT,r}, & v_r \leq v_{t,f} < v_o \\ 0, & v_{t,f} > v_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{t,WT,f}$ 为预测的风机输出功率, $P_{WT,r}$ 为风机的额定输出功率, $v_{t,f}$ 为预测的风速, v_r 、 v_i 、 v_o 分别为风机的额定风速、切入风速、切出风速。

1.2 岸电模型

目前岸电设备存在“重建设,轻使用”的情况,其主要原因是岸电价格机制没有统一的标准。本文对岸电价格进行模型优化,岸电价格包括岸基电价和岸电服务费构成,基本模型如下

$$p_{t,price} = \rho_{t,ele} + \theta c_{t,se} \quad (2)$$

式中: $p_{t,price}$ 为 t 时刻单位功率岸电价格, $\rho_{t,ele}$ 为时刻 t 的单位功率实际电价, $c_{t,se}$ 为 t 时刻的岸电服务费; θ 为岸电服务费参数,为 0 或 1。

此外,港口可以对岸电服务费进行调整,可增加设备使用率,获得更多的利润。对于靠港船舶吨位

以及使用岸电电量的大小,可以建立阶梯式服务费模型,表达式如下

$$c_{t,se} = \begin{cases} q_1(P_{1,rp} - P_{t,1}) & 0 < P_{t,1} \leq P_{1,rp} \\ q_1 P_{2,rp} + q_2(P_{t,1} - P_{2,rp}) & P_{1,rp} < P_{t,1} \leq P_{2,rp} \\ \vdots \\ q_{n-1} P_{n,rp} + q_n(P_{t,1} - P_{n,rp}) & P_{n-1,rp} < P_{t,1} \leq P_{n,rp} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $c_{t,se}$ 为 t 时刻港口向船商收取的单位功率岸电服务费; n 为岸电阈值功率区间个数; $P_{t,1}$ 为时刻 t 靠港船舶的负荷功率; $P_{1,rp}$ 、 $P_{2,rp}$ 、 \dots 、 $P_{n,rp}$ 为岸电功率负荷阶梯阈值; q_1 、 q_2 、 \dots 、 q_n 为各阈值内单位岸电功率服务费。

当靠港船舶使用由岸基提供的电力时,大部分港口采用两种电价收费策略,即平均电价和分时电价。以上两种电价策略不能对靠港船舶负荷波动做出相应的调整,而动态电模型可以依据负荷变化从而调整电价,具体模型^[1]如下。

$$\rho_{t,ele} = (\rho_p - \rho_v)\omega_t + \rho_v \quad (4)$$

式中: ρ_p 为峰时电价,本文取1.45元/(kW·h), ρ_v 为谷时电价0.39元/(kW·h), ω_t 为时刻 t 电价调整系数, $\omega_t \in [0, 1]$ 。当靠港船舶的需求负荷较小时,适当降低电价调整系数,与之相反,可适当增加电价调整系数。

1.3 氢储能系统建模

1.3.1 电解槽模型

目前,质子交换膜(Proton Exchange Membrane)电解槽具有启动快、制氢纯度高等优点。PEM电解槽制氢量可表示为

$$\begin{cases} P_{t,w,ELE} = m_{t,H_2} H_{H_2} \\ Q_{t,w,ELE} = \frac{\eta_{ELE} \eta_{ELE,conv} P_{t,w,ELE}}{H_{H_2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q_{t,w,ELE}$ 为场景 w 和时刻 t 下电解槽产生的氢气量, m_{t,H_2} 为时刻 t 的产氢速率, H_{H_2} 为氢气的较高热值; $\eta_{ELE,conv}$ 为连接到电解槽转换器的效率,本文取75%; η_{ELE} 为电解槽产生氢气的效率,本文取95%^[7]; $P_{t,w,ELE}$ 为电解槽在场景 w 和时刻 t 消耗功率。

1.3.2 燃料电池模型

PEM燃料电池具有电流密度大、寿命长等优异性能。PEM燃料电池输出功率的简化模型可表示为

$$P_{t,w,FC} = Q_{t,w,HTFC} \eta_{FC} \eta_{FC,conv} H_{H_2} \quad (6)$$

式中: $P_{t,w,FC}$ 为燃料电池在场景 w 和时刻 t 的输出功

率; $Q_{t,w,HTFC}$ 为储氢罐在场景 w 和时刻 t 给燃料电池提供的氢气量; η_{FC} 为燃料电池的效率,本文取60%; $\eta_{FC,conv}$ 为连接到燃料电池转换器的效率。本文取95%。

1.3.3 储氢罐模型

储氢罐可向燃料电池提供氢气或外界售卖。此外,认为储氢罐每小时会发生一次氢气损失。氢罐的储氢水平可表示为

$$Q_{t,w,HT} = (1 - \tau) Q_{t-1,w,HT} + Q_{t,w,ELE} - Q_{t,w,HTFC} - Q_{t,w,Load} \quad (7)$$

式中: $Q_{t,w,HT}$ 、 $Q_{t-1,w,HT}$ 分别为储氢罐在场景 w 和时刻 t 及 $t-1$ 时的储氢水平; $Q_{t,w,Load}$ 为在场景 w 和时刻 t 的氢气负荷,即向氢燃料船舶和氢能市场提供的氢气量; τ 为损失系数,本文取0.01。

港口岸电混合能源系统由海上风力发电机、岸电设备与氢储能系统三部分组成。海上风电并网可以间接减少火电厂污染物的排放。氢储能系统可提高风电消纳,氢储罐向氢燃料船舶提供氢气或参与氢能市场,可提高港口经济效益,增加能源互动性。

2 岸电氢储能系统规划模型

2.1 目标函数

港口决策者在规划氢储能系统容量时,需在满足港口需求前提下,使港口的经济性最优时兼顾规划储能系统容量。因此,建立以混合能源系统综合收益最大为目标函数,包括等值年化投资与维护成本 F_b ,弃风惩罚成本 F_p ,系统购电成本 F_g ,岸电价格收益 F_{se} ,售氢收益 F_{sh} 。

$$F = \max(F_b + F_p + F_g - F_{se} - F_{sh}) \quad (8)$$

1) 氢储能系统等年化投资与维护成本。

$$F_b = \left[\frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} + \zeta \right] (c_{ele} P_{ELE} + c_{fc} P_{FC} + c_{ht} Q_{HT}) \quad (9)$$

式中: c_{ele} 、 c_{fc} 分别为电解槽和燃料电池单位功率投资系数; c_{ht} 为储氢罐的单位容量投资系数^[9]; Q_{HT} 为储氢罐的容量; ζ 为设备的维护成本系数; y 为各设备预期寿命,本文取20a; r 为设备折现率。本文取0.1。

2) 弃风惩罚成本。

当海上风机超发电能无法被完全消纳时,则会产生弃风惩罚成本,其表达式如下

$$F_p = 365 \sum_{w=1}^{\Omega_w} \pi_w \sum_{t=1}^{24} c_p P_{t,w,WT,p} \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中: $P_{t,w,WT,p}$ 为在场景 w 下时刻 t 的弃风功率; Ω_w 为全部典型场景数; π_w 为场景 w 的概率; c_p 为弃风

单位惩罚成本。

3) 购电成本。

$$F_g = 365 \sum_{w=1}^{\Omega_w} \pi_w \sum_{t=1}^{24} c_g P_{t,w,Net}^t \Delta t \quad (11)$$

式中: $P_{t,w,Net}$ 为在场景 w 下时刻 t 的电网输出功率; c_g 为单位功率购电价格。

4) 岸电价格收益。

在靠港船舶停靠并使用岸基电源为船舶设备供电时,港口会产生一定的收益,其表达式如下

$$F_{se} = 365 \sum_{w=1}^{\Omega_w} \pi_w \sum_{t=1}^{24} (\rho_{t,w,ele} + \theta c_{t,w,se}) P_{t,w,Load} \Delta t \quad (12)$$

式中: $\rho_{t,w,ele}$ 为在场景 w 下时刻 t 的动态电价, $c_{t,w,se}$ 为在场景 w 下时刻 t 的服务费。

5) 售氢收益。

储氢罐可向船舶和氢能市场出售氢气。其表达式如下

$$F_{sh} = 365 \sum_{w=1}^{\Omega_w} \pi_w \sum_{t=1}^{24} c_{Load} Q_{t,w,Load} \Delta t \quad (13)$$

式中: $Q_{t,w,Load}$ 在场景 w 下时刻 t 向氢燃料船舶和氢能市场提供的氢气体积; c_{Load} 为单位体积氢气的出售价格。

2.2 约束条件

1) 能量平衡约束。

为保持系统的稳定运行,含混合能源系统需要满足电能平衡约束,其可表示为

$$P_{t,w,Net} + P_{t,w,WT} + P_{t,w,FC} = P_{t,w,Load} + P_{t,w,ELE} + P_{t,w,WT,p} \quad (14)$$

式中: $P_{t,w,Load}$ 为在场景 w 下时刻 t 的靠港船舶所需的负载功率。

2) 氢储能系统功率容量约束。

氢储能系统制氢和耗氢的功率不能大于其额定功率且电解槽和燃料电池不能同时处于运行状态。

$$\begin{cases} P_{ELE,min} I_{t,w,EF} \leq P_{t,w,ELE} \leq P_{ELE,max} I_{t,w,EF} \\ P_{FC,min} (1 - I_{t,w,EF}) \leq P_{t,w,FC} \leq P_{FC,max} (1 - I_{t,w,EF}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{ELE,min}$ 、 $P_{ELE,max}$ 分别为电解槽的最小功率和最大功率; $P_{FC,min}$ 、 $P_{FC,max}$ 分别为燃料电池的最小功率和最大功率; $I_{t,w,EF}$ 为避免在场景 w 下时刻 t 电解槽和燃料电池同时运行的二元变量, $I_{t,w,EF} \in \{0, 1\}$ 。

3) 储氢罐容量约束。

储氢罐所储存的氢气储量应在其额定容量之内,并且,为保证第二天在初始运行状态,储氢罐中需有初始储量,本文假设一天中第一个和最后 1 h

储氢罐中的氢气体积是储氢罐最大容量的一半。

$$\begin{cases} Q_{HT,min} \leq Q_{t,w,HT} \leq Q_{HT,max} \\ Q_{0,w,HT} = Q_{T,w,HT} = \frac{1}{2} Q_{HT,max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Q_{HT,min}$ 、 $Q_{HT,max}$ 分别为储氢罐的最小容量和最大容量; $Q_{0,w,HT}$ 、 $Q_{T,w,HT}$ 分别为在每个场景 w 下一天中第 1 h 和最后 1 h 的储氢罐储氢水平。

4) 风电利用率约束。

为减少弃风惩罚成本,同时提高风电利用率,对风电的有效利用进行限制。

$$\sum_{t=1}^T (P_{t,w,WtNet} + P_{t,w,ELE}) - \delta \sum_{t=1}^T P_{t,w,WT} \geq 0 \quad (17)$$

式中: δ 为风电利用率。

3 SP-IGDT 岸电氢储能规划模型

3.1 IGDT 模型

IGDT 是一种处理不确定性的非概率且非模糊方法,该方法在保证目标值处于可接受范围内的同时,最大化不确定变量的波动区间,从而使得达到目标值的可能性最大^[7]。

在本文,岸电氢储能系统规划中含有 3 个不确定变量,分别是海上风机出力、靠港船舶负荷需求和岸电价格。其中海上风机出力模型已在前文中利用 SP 描述。对于靠港船舶需求负荷和岸电价格不确定变量,采用 IGDT 方法对其进行建模。鉴于船舶需求负荷和岸电价格的特点,本文采用边界包络模型构建两者的不确定集模型,表示如下

$$U(\alpha, \bar{\lambda}_{t,LO}) = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{t,LO} : \frac{|\lambda_{t,LO} - \bar{\lambda}_{t,LO}|}{\bar{\lambda}_{t,LO}} \leq \alpha \\ \lambda_{t,LO} \in [1 - \alpha \bar{\lambda}_{t,LO}, 1 + \alpha \bar{\lambda}_{t,LO}] \\ \alpha \geq 0 \end{array} \right\}, \quad (18)$$

$$U(\beta, \bar{\lambda}_{t,EP}) = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{t,EP} : \frac{|\lambda_{t,EP} - \bar{\lambda}_{t,EP}|}{\bar{\lambda}_{t,EP}} \leq \beta \\ \lambda_{t,EP} \in [1 - \beta \bar{\lambda}_{t,EP}, 1 + \beta \bar{\lambda}_{t,EP}] \\ \beta \geq 0 \end{array} \right\}, \quad (19)$$

式中: $\lambda_{t,LO}$ 、 $\bar{\lambda}_{t,LO}$ 分别为实际船舶负荷和预测船舶负荷; $\lambda_{t,EP}$ 、 $\bar{\lambda}_{t,EP}$ 分别为港口实际岸电价格和预测动态岸电价格; α 、 β 分别表示靠港船舶需求负荷和岸电价格的不确定幅度,即不确定变量的偏差半径。

由于 IGDT 模型在处理多个不确定性变量时,会导致计算难度增加。因此,本文采用半径线性加权归一法将两者的偏差半径转换为综合偏差半径,表达式如下

$$\begin{cases} \gamma = k_1 \alpha + k_2 \beta \\ k_1 + k_2 = 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: γ 为综合偏差半径,其值越大则表示规划决策者能承受的不确定变量波动区间越大; k_1 、 k_2 分别为靠港船舶负荷需求和岸电价格的偏差半径权重系数, $k_1, k_2 \in [0, 1]$ 。

考虑到港口决策者对风险的接受程度不同,故针对风险的偏好程度引入风险规避策略和机会寻求策略,即鲁棒模型 (Robust Model, RM) 和机会模型 (Opportunity Model, OM),前者注重保守,后者偏向投机。

3.2 基于风险规避的鲁棒 IGDT 模型

鲁棒 IGDT 模型在保证规划综合收益不低于预期收益前提下,最大化不确定变量的波动区间,满足规划者需求,体现 IGDT 的鲁棒性,其表达式如下

$$\gamma_{RM}(X, F_{RM}) = \max \{ \gamma_{RM} : [\min F(X, \lambda_{t,LO}, \lambda_{t,EP}) \geq F_{RM}] \} \quad (21)$$

式中: X 为决策变量,包括电解槽、储氢罐以及燃料电池的容量, F_{RM} 为鲁棒收益阈值。

在考虑靠港船舶需求负荷和岸电价格不确定性情况下,RM 需保证波动区间最大化,同时来规避不确定性带来的风险。故建立的鲁棒 IGDT 模型为

$$\begin{aligned} \max \gamma_{RM} &= k_1 \alpha_{RM} + k_2 \beta_{RM} \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} \min F \geq F_{RM} = F_0(1 - \sigma_{RM}) \\ \lambda_{t,LO} \in U(\alpha, \tilde{\lambda}_{t,LO}) \\ \lambda_{t,EP} \in U(\beta, \tilde{\lambda}_{t,EP}) \end{cases} \quad (22) \\ &\text{式(1) ~ 式(17)} \end{aligned}$$

可以明显看出式(22)为双层规划模型。上层模型表示靠港船舶需求负荷和实际岸电价格的最大综合偏差半径,下层模型表示在不确定集下,规划的综合收益不低于预期收益。其中: F_0 为确定性模型或称为风险中性模型 (Neutral Mode, NM),该模型作为系统规划的基准值。 σ_{RM} 为鲁棒偏差因子, $\sigma_{RM} \in [0, 1]$ 。根据鲁棒模型的原理可知,如果不确定变量的实际值在预测误差的信息间隙区域内,则决策者的综合收益将不低于 F_{RM} 。具体来说,如果负荷需求实际值大于预测值,较高的负荷需求会导致系统成本增加,即靠港船舶实际需求负荷为最大值 $\lambda_{t,LO} = (1 + \alpha_{RM}) \tilde{\lambda}_{t,LO}$ 。当岸电价格的预测值小于实际值,较低的岸电价格会造成港口收益减少,即实际岸电价格为最小值 $\lambda_{t,EP} = (1 - \beta_{RM}) \tilde{\lambda}_{t,EP}$ 。此时,下层模型取得最小值。因此,可将上式双层规划模型简化为单层规划模型

$$\begin{aligned} \max \gamma_{RM} &= k_1 \alpha_{RM} + k_2 \beta_{RM} \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} F \geq F_{RM} = F_0(1 - \sigma_{RM}) \\ \lambda_{t,LO} = (1 + \alpha_{RM}) \tilde{\lambda}_{t,LO} \\ \lambda_{t,EP} = (1 - \beta_{RM}) \tilde{\lambda}_{t,EP} \end{cases} \quad (23) \\ &\text{式(1) ~ 式(17)} \end{aligned}$$

3.3 基于机会寻求的机会 IGDT 模型

机会 IGDT 模型在保证综合收益不低于期望收益和最小化不确定变量波动区间的同时,充分寻求不确定性机会,体现 IGDT 的机会性,其表达式如下

$$\begin{aligned} \gamma_{OM}(X, F_{OM}) &= \\ \min \{ \gamma_{OM} : (\max F(X, \lambda_{t,LO}, \lambda_{t,EP}) \geq F_{OM}) \} \end{aligned} \quad (24)$$

式中: F_{OM} 为定的机会收益阈值。

在考虑靠港船舶需求负荷和岸电价格不确定性情况下,OM 需寻求不确定性带来的最大收益,故建立的机会 IGDT 模型为

$$\begin{aligned} \min \gamma_{OM} &= k_1 \alpha_{OM} + k_2 \beta_{OM} \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} \max F \geq F_{OM} = F_0(1 + \sigma_{OM}) \\ \lambda_{t,LO} \in U(\alpha, \tilde{\lambda}_{t,LO}) \\ \lambda_{t,EP} \in U(\beta, \tilde{\lambda}_{t,EP}) \end{cases} \quad (25) \\ &\text{式(1) ~ 式(17)} \end{aligned}$$

式中: σ_{OM} 为机会偏差因子, $\sigma_{OM} \in [0, 1]$, σ_{OM} 值越大表示决策者对风险的追求程度越高。如果负荷需求实际值小于预测值和岸电价格的预测值大于实际值,会使综合收益最大化,即靠港船舶需求负荷为最小值 $\lambda_{t,LO} = (1 - \alpha_{OM}) \tilde{\lambda}_{t,LO}$,岸电价格为最大值 $\lambda_{t,EP} = (1 + \beta_{OM}) \tilde{\lambda}_{t,EP}$ 。此时,下层模型能取得最大值,可将上式简化单层模型

$$\begin{aligned} \min \gamma_{OM} &= k_1 \alpha_{OM} + k_2 \beta_{OM} \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} \max F \geq F_{OM} = F_0(1 + \sigma_{OM}) \\ \lambda_{t,LO} = (1 - \alpha_{OM}) \tilde{\lambda}_{t,LO} \\ \lambda_{t,EP} = (1 + \beta_{OM}) \tilde{\lambda}_{t,EP} \end{cases} \quad (26) \\ &\text{式(1) ~ 式(17)} \end{aligned}$$

4 算例分析

4.1 算例数据

本文以中国某集装箱港口和相邻某 10 MW 海上风电场作为规划对象。参考当地历史天气以预测风速,场景缩减后生成的四季典型风机出力场景如图 2 所示。根据港口运行数据得到四季典型日靠港船舶电负荷^[1]和氢负荷,如图 3 所示。岸电氢储能系统各基本经济参数见表 1,设备各参数见表 2,海上风机出力场景概率见表 3。

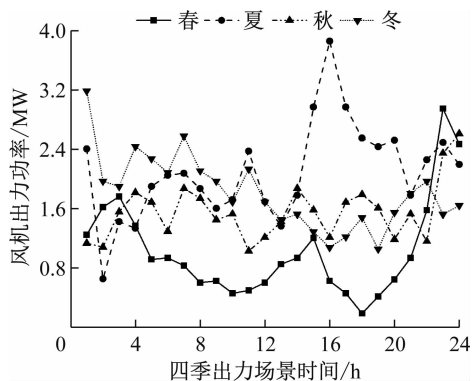


图2 海上风机出力场景

Fig. 2 Offshore wind turbine output scenarios

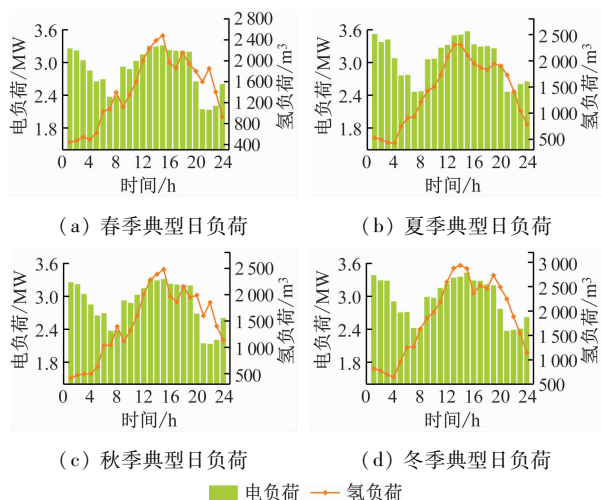


图3 港口典型日电/氢负荷

Fig. 3 Typical daily electricity/hydrogen load in port

表1 岸电混合能源系统经济参数

Tab. 1 Economic parameters of cold ironing hybrid energy system

参数	数值
燃料电池单位投资系数/(元·kW ⁻¹)	2 950
电解槽单位投资系数/(元·kW ⁻¹)	6 200
储氢罐单位投资系数/(元·m ⁻³)	6
氢气出售单位价格/(元·m ⁻³)	2.8
弃风单位惩罚成本/(元·MW ⁻¹)	360
单位功率购电成本/(元·kW·h ⁻¹)	0.6

表2 氢储能系统设备参数

Tab. 2 Equipment parameters of hydrogen energy storage system

参数	数值
电解槽最大/小功率/kW	2 000/0
燃料电池最大/小功率/kW	400/0
储氢罐最大/小容量/m ³	1 450/0
氢气热值/(MJ·m ⁻³)	12.75

4.2 岸电氢储能系统规划结果

基于经验值,偏差因子取值0.1,各不确定性变量占比均取值0.5,选取夏季典型日为例作数据输入,采用YALMIP/CPLEX12.8商用求解器对SP-IGDT规划模型进行求解,得到岸电氢储能系统规划结果,如表4所示。

由表4可知,在NM即忽略船舶需求负荷和岸电价格不确定性中,年综合收益成本为433.54万元,在RM中,系统年综合收益下降10%、电解槽容量下降4.3%、燃料电池容量增加45.6%, γ_{RM} 为9.2%,可以理解为最大的波动幅度为9.2%,RM倾向于保守,以电能形式提供能源。在OM中,侧重尽可能利用风险使得综合收益最大化,则系统年综合收益增加10%、电解槽容量增加4.7%,燃料电池容量下降86.1%, γ_{OM} 为10.2%。OM更倾向于投机,以氢能形式提供能源。

表3 海上风机出力场景概率

Tab. 3 Probability of offshore wind turbine output scenarios

季节	场景概率				
	1	2	3	4	5
春季	0.048	0.026	0.602	0.246	0.078
夏季	0.052	0.064	0.414	0.396	0.074
秋季	0.232	0.012	0.386	0.194	0.176
冬季	0.368	0.022	0.268	0.142	0.21

表4 岸电氢储能系统规划结果

Tab. 4 Planning results of cold ironing hydrogen energy storage system

模型	电解槽/ kW	燃料电池/ kW	储氢 罐/m ³	年综合收 益/万元
NM	1 451.41	274.71	1 450	433.54
RM	1 388.74	400	1 450	390.19
OM	1 520.13	38.86	1 450	476.91

4.3 SP-IGDT 模型结果分析

σ_{RM} 鲁棒偏差因子和 σ_{OM} 机会偏差因子是影响规划结果的重要参数。不同偏差因子的SP-IGDT规划模型结果分别为图4和图5所示。由图可知,当 σ_{RM} 从0.1到0.2时, γ_{RM} 增加了95.7%,综合收益减少了11.1%。当 σ_{OM} 从0.1到0.2时, γ_{OM} 增加了105.2%,综合收益增加了9.1%。其原因在于OM中,不确定性带来的积极影响会使综合收益增加,而RM认为不确定性会带来消极影响,使综合收益下降。

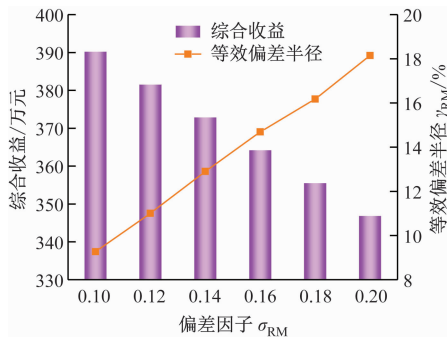


图4 RM不同偏差因子规划结果

Fig. 4 Planning results of RM with different deviation factors

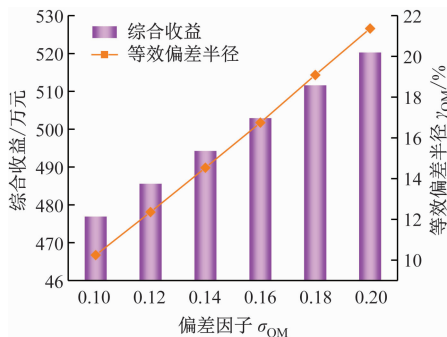


图5 OM不同偏差因子规划结果

Fig. 5 Planning results of OM with different deviation factors

此外, σ 对氢储能系统容量规划会产生影响, 图6展示了 σ 从 0.06 到 0.14 对氢储能容量的规划结果。由图6可知, 随着 σ 增大, OM 中电解槽容量增大 6.8%, RM 中电解槽容量减少 11.2%; OM 燃料电池减少 86.7%, RM 燃料电池保持最大容量。港口决策者可根据港口预期收益和可承受的风险偏好选择不同的策略和对应的偏差因子。

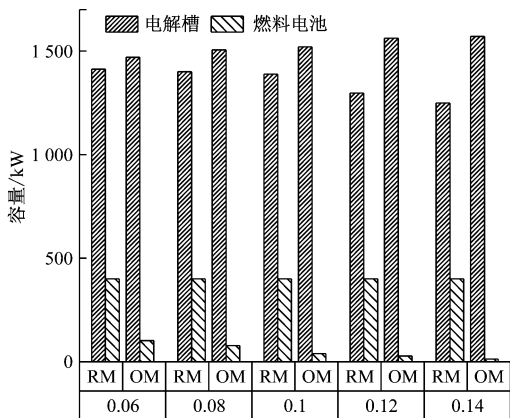


图6 电解槽、燃料电池容量规划结果

Fig. 6 Capacity planning results of electrolyzer and fuel cell

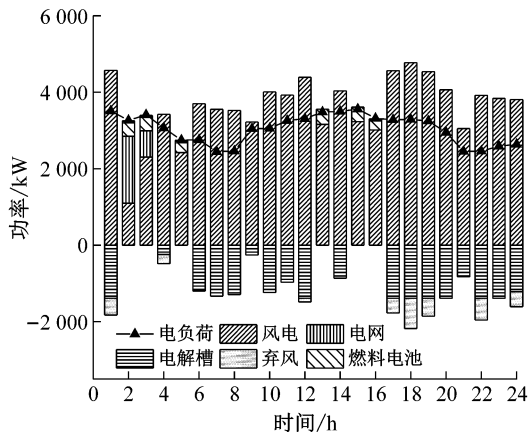
4.4 岸电混合能源系统运行工况分析

选取夏季典型场景为例进行日运行工况分析, 电能运行工况如图7所示。在 RM 中 0100—0200 风电出力匮乏, 为防止出现电负荷削减, 系统燃料电

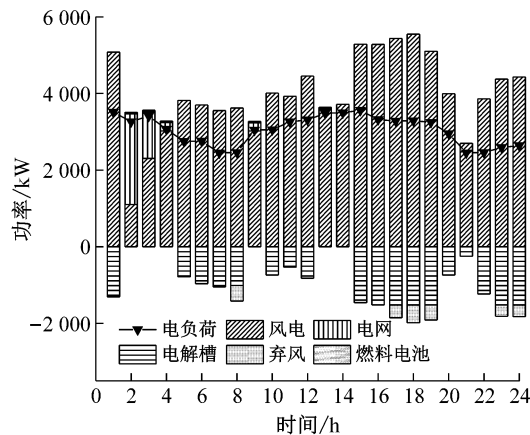
池工作并向电网购电。在 0000, 0500—1100, 1300 和 1600—2400 电解槽均对风电超发电能进行消纳, 但没有被完全消纳产生了一定弃风现象。在 OM 中规划的电解槽容量相对较高, 燃料电池容量相对较低, 电解槽可对超发电能进行充分消纳, 对比 RM 弃风现象减少 35.3%, OM 其余时间运行工况与 RM 大致相同。两种模型规划结果在运行阶段均满足负荷需求, 并未出现电负荷削减的情况。由此表明, 岸电混合能源系统具有较高的能量互动能力, 可提高新能源的利用率。

4.5 岸电混合能源系统环境情况分析

岸电混合能源系统可减少各污染气体排放, 对改善港区环境具有重要作用。对比图8中各模型气体排放量发现, OM 中 CO_2 、 CO 、 NO_x 排放量比 NM 分别增加 23.5%、26.3%、35.1%, 对比 RM 分别增加 48.2%、49.8%、55.5%。这是由于 OM 为增加综合收益会以牺牲环境为代价。NM 使用电网出力相对较多, 火电会造成污染气体排放量相对增加。据此可得, 不同模型可为决策者提供综合收益与环境关系的理论指导, 以进行折中规划。



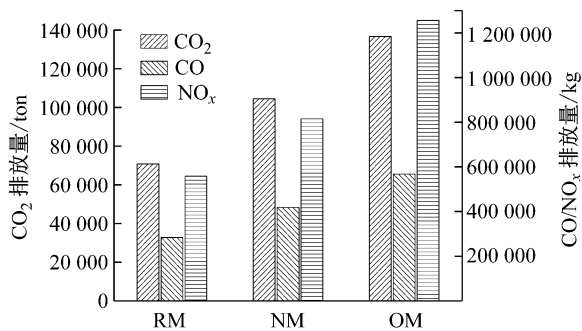
(a) 夏季 RM 运行工况



(b) 夏季 OM 运行工况

图7 夏季运行工况

Fig. 7 Operational conditions in summer

图8 CO₂、CO、NO_x年排放量Fig. 8 Annual emissions of CO₂、CO、NO_x

4.6 四季数据对岸电氢储能系统对比分析

上述规划结果是基于夏季数据进行的,现考虑四季因素,对岸电氢储能系统进行对比分析,如图9和图10所示。图9展示了四季典型日一天中氢气质量的变化,RM、OM和CM具有相同的变化趋势。在晚上,电解槽进行制氢并在储氢罐进行储存,在白天,储氢罐中的氢气开始消耗和售卖,其一天中第一个小时储氢罐中氢气量与一天中最后1h的氢气量相等。

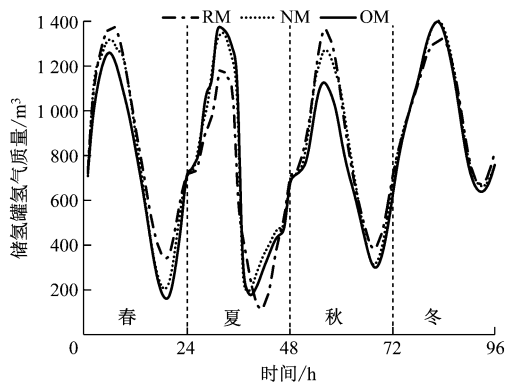
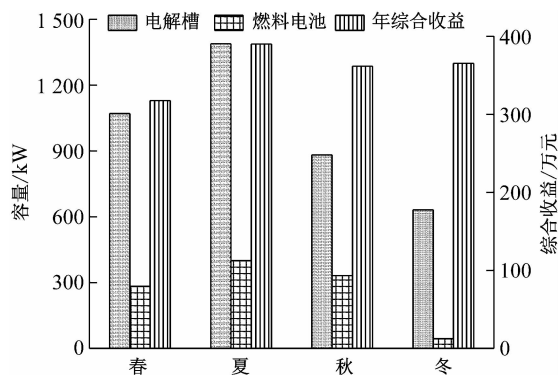


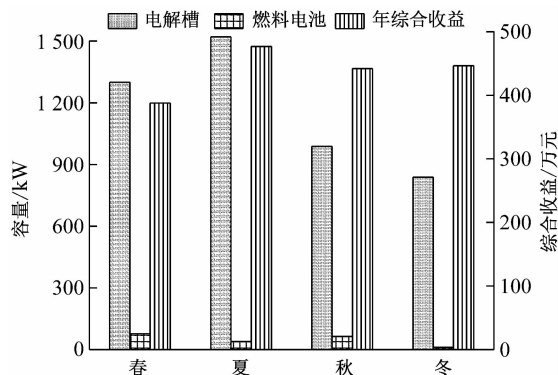
图9 储氢罐中氢气质量变化结果

Fig. 9 Variation results of hydrogen mass in hydrogen storage tank

此外,对比图10中四季的RM和OM发现,无论哪个季节,OM中的综合收益都比RM综合收益高,其中夏季综合收益最高,春季综合收益最低。对于电解槽容量规划,OM电解槽容量比RM电解槽容量配置高,其中夏季电解槽容量最高,冬季电解槽容量配置最低。这是由于受到两种策略的风险偏好程度、海上风速季节特性以及船舶靠港季节特性所影响。由此说明,每个季节性数据对岸电氢储能系统规划结果是不同的,而选取夏季典型日数据的SP-IGDT模型规划结果是相对最优的。



(a) RM规划结果



(b) OM规划结果

图10 四季因素下岸电混合能源系统规划结果

Fig. 10 Planning results of shore power hybrid energy system under four-season factors

5 结束语

本文针对岸电混合能源系统的氢储能系统容量规划问题开展研究,考虑多元不确定性,提出一种基于SP-IGDT规划模型,主要结论如下:

1) SP-IGDT规划模型中,两种策略下不同的偏差因子规划结果不同,量化不确定幅度,可为港口决策者提供更多的决策依据。

2) 岸电氢储能系统可以有效地解决海上风机发电的弃风问题,提高港口岸电设备和能源的利用率,验证了模型有效性。

3) SP-IGDT规划模型中季节性因素会影响岸电氢储能规划结果。另外文中未对售氢价格及弃风成本价格因素进行分析,将在后续研究中完善。

参考文献

- [1] 王玮, 张晓晴, 苏粟, 等. 基于模型预测控制的含岸电混合能源系统优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 17-24.
WANG W, ZHANG X Q, SU S, et al. Optimal operation of hybrid energy system with shore power based on model predictive control [J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2021, 41 (1): 17-24. (in Chinese)
- [2] 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): 83-94.
ZHANG H, YUAN T J, TAN J, et al. Hydrogen energy planning framework for unified energy system [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(1): 83-94. (in Chinese)
- [3] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.
JIANG H Y, DU E S, ZHU G P, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for high proportion of renewable energy power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (19): 194-207. (in Chinese)
- [4] ZIS T, NORTH R J, ANGELOUDIS P, et al. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports[J]. Maritime Economics & Logistics, 2014, 16:371-398.
- [5] SIFAKIS N, VICHOS E, SMARAGDAKIS A, et al. Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46 (14): 20303-20323.
- [6] VICHOS E, SIFAKIS N, TSOUTSOS T. Challenges of integrating hydrogen energy storage systems into nearly zero-energy ports[J]. Energy, 2022, 241:122878.
- [7] 魏震波, 郭毅, 魏平桢 等. 基于 IGDT 的电-气互联综合能源系统多目标扩展规划模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 526-537.
WEI Z B, GUO Y, WEI P A, et al. A multi-objective extended planning model for the integrated energy system of electricity gas interconnection based on IGDT [J]. High Voltage Technology, 2022, 48 (2): 526-537. (in Chinese)
- [8] 孙波, 吴旭东, 谢敬东, 等. 基于信息间隙决策理论的综合负荷聚合商储能优化配置模型[J]. 现代电力, 2021, 38(2): 193-207.
SUN B, WU X D, XIE J D, et al. Energy storage optimal allocation model of comprehensive load aggregator based on information gap decision theory [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(2): 193-207. (in Chinese)
- [9] 于雪菲, 张帅, 刘琳琳, 等. 基于信息间隙决策理论的碳捕集电厂调度[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2022, 62(9): 1467-1473.
YU X F, ZHANG S, LIU L L, et al. Carbon capture power plant scheduling based on information gap decision-making theory [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2022, 62 (9): 1467-1473. (in Chinese)

(上接第 83 页)

- REN Y X, ZHAO J S, LIU W, et al. Ship navigation behavior prediction based on AIS data and LSTM network [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40 (3): 32-37. (in Chinese)
- [13] GAO D, ZHU Y, ZHANG J, ET AL. A novel MP-LSTM method for ship trajectory prediction based on AIS data [J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108956.
- [14] 高大为, 朱永生, 张金奋, 等. 基于 AIS 数据的船舶航迹多维预测方法[J]. 中国航海, 2021, 44(3): 56-63.
GAO D W, ZHU Y S, ZHANG J F, et al. Multi-dimensional prediction of ship track with AIS data augmentation [J]. Navigation of China, 2021, 44(3): 56-63. (in Chinese)
- [15] ZHANG C K, BIN J C, WANG W, et al. AIS data driven general vessel destination prediction: a random forest based approach [J]. Transportation Research Part C, 2020, 118: 102729.
- [16] WEI Y, CHEN Z, ZHAO C, et al. Big multi-step ship motion forecasting using a novel hybrid model based on real-time decomposition, boosting algorithm and error correction framework [J]. Ocean Engineering, 2022, 256: 111471.
- [17] 吴建华, 吴琛, 刘文, 等. 船舶 AIS 轨迹异常的自动检测与修复算法[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 8-12.
WU J H, WU C, LIU W, et al. Automatic detection and restoration algorithm for trajectory anomalies of ship AIS [J]. Navigation of China, 2017, 40(1): 8-12. (in Chinese)
- [18] 杨家轩, 刘元. 基于 DBTCAN 算法的船舶轨迹聚类与航路识别[J]. 上海海事大学学报, 2022, 43(3): 7-12.
YANG J X, LIU Y. Ship trajectory clustering and route recognition based on DBTCAN algorithm [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022, 43(3): 7-12. (in Chinese)
- [19] 权波, 杨博辰, 胡可奇, 等. 基于 LSTM 的船舶航迹预测模型[J]. 计算机科学, 2018, 45(S2): 126-131.
QUAN B, YANG B C, HU K Q, et al. Prediction model of ship trajectory based on LSTM [J]. Computer Science, 2018, 45(S2): 126-131. (in Chinese)