

# 风光气储氢耦合的海上油气平台群低碳优化运行

李茜<sup>1,2</sup>, 许宇锋<sup>2</sup>, 晏小彬<sup>3</sup>, 许桐<sup>3</sup>, 杨威<sup>2</sup>, 张安安<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 丝路清洁能源转化与利用研究中心, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500; 3. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:**为了减少石油平台运行过程中造成的环境污染,提出一种考虑新能源接入的海上油气平台群综合能源系统,在减少系统碳排放量的同时,提高运行经济性。考虑新能源接入后多平台联合运行时能源供应的稳定性,采取新能源选择性消纳策略应对新能源出力的波动性与不确定性,并搭建含陆地能源终端与混合储能系统的海上油气平台群综合能源系统;构建系统内部异质流耦合模型,对系统内的物质能量流动转换及各模块的耦合关系进行分析;建立风光气储氢耦合的海上油气平台群低碳优化调度模型,并通过算例仿真验证所建模型的可行性与有效性。

**关键词:**海上油气平台群;综合能源系统;风光气储氢耦合;氢燃料电池;异质流耦合;能流分析;低碳优化运行

**中图分类号:**TE54;TK01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202511026

## 0 引言

随着海洋油气工程建设的不断发展与进步,海上油气开采规模逐渐加大,海上油气平台正由单个平台独自运行向多平台联合运行的方向发展,多个平台通过电网和天然气管道互相连接,形成了大规模区域性的海上油气平台群,并集成电、气、热、冷多种能源形式,形成海上油气平台群综合能源系统(off-shore oil and gas platform cluster integrated energy system, OCIES),考虑到各能源系统之间的耦合交互程度不断加深<sup>[1]</sup>,安全稳定的能源供应是海上油气平台群持续作业的关键因素。另外,海上油气平台在油气开采过程中大多采用柴油和伴生气协同供能,存在成本高、污染重等问题<sup>[2-3]</sup>,给海上石油行业带来了挑战,减少海上油气工程的CO<sub>2</sub>排放成为海上石油行业面临的难题<sup>[4]</sup>。探索多种能源为海上油气开采过程供能,可避免能源利用的局限性,对提高油气平台的能源利用率与经济性、减小环境污染具有重要的意义。

近年来,海上新能源开始逐步接入海上油气平台进行供能<sup>[5]</sup>,对其有效利用将改善海洋工程能源供应问题,并助力构建绿色环保的干净环境。海上风电作为目前技术最成熟、应用最广泛的供能方式,具有广阔的发展空间。文献[6]探讨了在海上油气

能源系统中引入风电,建立了考虑整体经济性的优化模型;文献[7]为了应对海上风光发电波动与消纳、氢储系统运行灵活性不足的问题,提出了一种面向氢储能双向运行机制的海上风光氢储一体化发电系统的容量协同优化方法;文献[8]建立了一种海上风电-氢能系统的配置优化模型,提出并对比分析了该系统的多种运行模式;文献[9]提出了针对远海油田电力系统特点的风电接入方案,并通过算例证明了所提风电接入远海油气平台的规划方法具有可行性;文献[10-11]针对漂浮式海上风电的风电机组发电关键技术进行了分析,并对漂浮式海上风电的发展进行了展望,为推动深海远洋海上风电大规模应用提出了思路;文献[12]提出了一种适用于超大规模海上风电并网的直流送出系统构建方案及故障处理策略,为千万千瓦级海上风电的送出提供了助力。但是海上风电具有随机性与波动性,会影响其并入电网的稳定性,给电力系统的安全稳定运行带来了严峻的挑战。解决海上新能源出力的不确定性所带来的电能质量等问题,保障电力系统的持续稳定运行,是目前国内外学者研究的重点。文献[13]采用频率下垂控制策略处理接入海上平台的风电机组转子侧变流器,使风电机组响应系统的频率变化,从而具备调频能力;文献[14]提出了以双馈感应电机为单元的风电场与海上油气平台燃气透平机组的协调频率辅助控制方法,提高了含风电的远海油气平台电网的调频能力;文献[15-16]考虑海上风电并网输出功率的强随机性与波动性,对海上风电接入系统的可靠性展开研究,建立了计及可靠性评估指标的风电场多状态模型;文献[17]针对大规模海上风电经柔性直流联网引起的受端电网惯量降低、频率调节能力下降等问题,提出了适用于海上风电经柔性

收稿日期:2024-11-19;修回日期:2025-07-22

在线出版日期:2025-11-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2025YFE0212900);四川省科技计划项目(2023YFQ0073, 2024YFHZ0138)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2025YFE0212900) and the Science and Technology Program of Sichuan Province(2023YFQ0073, 2024YFHZ0138)

直联电网系统的协调控制策略,为系统提供必要的惯量及频率支撑;文献[18]考虑海上风电的波动性,为了保证并网时得到最大输出功率,提出了一种并网风电变流器的故障容错控制方法,提升了电网的可靠性以及功率可信度;文献[19]针对海上多平台互联电力系统,提出了一种适用于孤岛电网发生故障后的供电恢复策略,提高了海上多平台互联电力系统自愈能力;文献[20]对不同海上新能源发电技术及其不确定性进行了分析,并针对海上能源系统的运行特点,考虑可靠性对系统进行了优化。上述文献针对海上新能源出力的波动性与不确定性进行研究,增加了其接入系统后的稳定性与可靠性,但随着新能源装机容量的不断扩大,新能源消纳问题变得更加严峻,如何安全有效地消纳大规模新能源并解决日益严重的弃风弃光问题成为新的难点。

基于上述问题,本文引入海上风电与地上光伏,提出新能源接入的OCIES结构;引入由储电装置、电转气(power to gas, P2G)装置和伴生气储库(associated gas storage, AGS)组成的混合储能系统,并在陆地能源终端增设储氢装置与氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)辅助出力,以系统综合成本最小为优化目标进行OCIES优化运行;最后以渤海某海上油气平台群为算例,基于本文所提风光气储氢耦合的OCIES优化运行模型和方法,实现风光消纳与碳减排,提升系统的经济性。

## 1 新能源接入的OCIES结构与模型

### 1.1 主体结构

本文建立的包含陆地能源终端的OCIES结构如图1所示,该海上油气平台群主要由2个中心平台(中心平台1、中心平台2)以及与其互联的多个井口平台组成,中心平台1、中心平台2作为能源枢纽联合陆地能源终端,利用各自供能系统的余热梯级利用单元(waste heat cascade utilization unit, WSCU),燃烧天然气与伴生气产生电、热能,协同为整个平台群系统供能,其中中心平台1、中心平台2、陆地能源

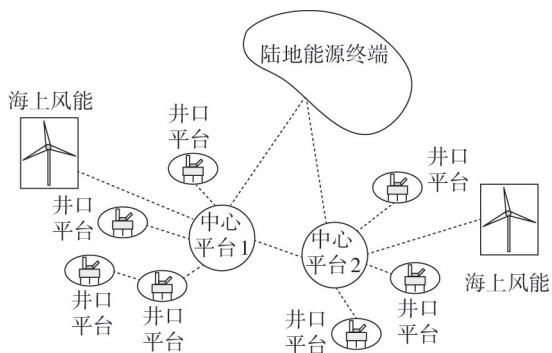


图1 含陆地能源终端的OCIES结构

Fig.1 Structure of OCIES with land energy terminal

终端的WSCU分别记为WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub>。另外,每个中心平台与其互联的井口平台作为油气互联生产单元(oil and gas interconnection production unit, OIPU),消耗能源供应端产生的电、热能以生产石油及伴生气。

2个中心平台均配置了碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)装置和浮式结构的电转气(floating power to gas, FP2G)装置<sup>[21]</sup>, CCS装置用于捕获平台供能过程中产生的CO<sub>2</sub>来降低碳排放<sup>[22]</sup>, FP2G装置利用捕集的CO<sub>2</sub>合成天然气<sup>[23]</sup>,这部分天然气可储存于AGS中,也可通过燃料输送线路供给发电机组或供热机组。陆地能源终端配置的HFC可利用P2G装置生成的H<sub>2</sub>辅助出力,在保证新能源合理消纳的同时,减少燃料的消耗,进一步降低碳排放量。此外,中心平台与陆地能源终端均配置了储电装置,用于平抑新能源出力波动。

### 1.2 WSCU模型

海上油气平台的主要发电设备为燃气轮机,其高温排放气带走了相当一部分的能量,若对该部分能量加以利用,可极大提高能效。因此,在燃气轮机的排烟管道后设置余热锅炉进行能量回收,可将高温烟气加热至700~850℃,并用于有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)做功发电以满足电负荷,或与热交换器换热以提供热能。为了保证热能供应的可靠性,一般选用带有补燃装置的余热锅炉,当余热供应不足时,使用燃料进行补充<sup>[24]</sup>。

1)燃气轮机的能量物质转换关系可表示为:

$$P_{GT} = \sum_j V_j^{GT} q_j \eta_{GT} \quad (1)$$

$$Q_{GT} = \alpha C_p f_{GT}(P_{GT}, V_{air}, T_{GT}) V_j^{GT} \quad (2)$$

$$E_{GT}^{CDE} = \sum_j \lambda_{GT}(V_j^{GT}) V_j^{GT} \quad (3)$$

式中: $P_{GT}$ 为燃气轮机的发电功率; $V_j^{GT}$ 为燃气轮机利用第 $j$ 种燃料的输入量; $q_j$ 为第 $j$ 种燃料的低热值; $\eta_{GT}$ 为燃气轮机的发电效率; $Q_{GT}$ 为燃气轮机可利用的余热量; $f_{GT}(P_{GT}, V_{air}, T_{GT})$ 为燃气轮机排烟流量关于发电功率、空气进量 $V_{air}$ 和内部温度 $T_{GT}$ 的函数关系; $\alpha$ 为燃气轮机尾气余热收集系数; $C_p$ 为燃气轮机排放烟气的定压比热; $E_{GT}^{CDE}$ 为燃气轮机的碳排放量; $\lambda_{GT}(V_j^{GT})$ 为燃气轮机的碳排放量关于燃料输入量的函数。

2)余热锅炉的能量转换关系可表示为:

$$Q_{GB} = \sum_j V_j^{GB} q_j \eta_{GB} \quad (4)$$

$$Q_o = \beta_1 (Q_{GB} + Q_{GT}) \quad (5)$$

$$E_{GB}^{CDE} = \sum_j \lambda_{GB}(V_j^{GB}) V_j^{GB} \quad (6)$$

式中: $Q_{GB}$ 为余热锅炉的补燃热量; $V_j^{GB}$ 为余热锅炉利用第 $j$ 种燃料的输入量; $\eta_{GB}$ 为余热锅炉的热能转换

效率; $Q_0$ 为热介质获得的热量; $\beta_1$ 为余热锅炉产生的总热量与热介质获得热量的比例系数; $E_{GB}^{CDE}$ 为余热锅炉补燃的碳排放量; $\lambda_{GB}(V_j^{GB})$ 为余热锅炉的碳排放量关于燃料输入量的函数。

3)ORC的能量转换关系可表示为:

$$Q_{ORC} = \alpha C_P f_{ORC}(P_{CT}, Q_{GB}, T_{ORC}, A_{heat})(V_j^{GT} + V_j^{GB}) \quad (7)$$

$$P_{ORC} = Q_{ORC} \eta_{ORC} \quad (8)$$

式中: $Q_{ORC}$ 为ORC的燃气利用量; $P_{ORC}$ 为ORC的发电功率; $\eta_{ORC}$ 为ORC的发电效率; $f_{ORC}(P_{CT}, Q_{GB}, T_{ORC}, A_{heat})$ 为ORC烟气利用量关于燃气轮机发电功率、余热锅炉补燃热量、ORC发电过程的入口温度 $T_{ORC}$ 、换热器面积 $A_{heat}$ 的函数关系。

### 1.3 P2G装置模型

P2G技术可分为电制氢和甲烷化2个过程,具体模型见附录A式(A1)和式(A2)。

### 1.4 HFC模型

标准状态下 $H_2$ 的质量能量密度 $W_{M,LHV}$ 为:

$$W_{M,LHV} = H_{H_2}^{LHV} / M_{H_2} \quad (9)$$

式中: $H_{H_2}^{LHV}$ 为 $H_2$ 的低位热值; $M_{H_2}$ 为 $H_2$ 的摩尔质量。

HFC的实际输出效率 $\eta_{el}$ 为输出的电功率与单位时间内输入能量的比值,如式(10)所示。

$$\eta_{el} = \frac{U}{H_{H_2}^{LHV} / (zF)} \quad (10)$$

式中: $U$ 为HFC的工作电压; $z$ 为还原1 mol  $H_2$ 转移的电子数量,取值为2; $F$ 为法拉第常数。

HFC输出的电能并不能全部用于对外做功,有一部分电能将被系统自身消耗,称为寄生功耗或辅机功耗。系统的功率越大,寄生功耗的占比就越大,则系统的有效输出效率 $\eta_{sys}$ 为:

$$\eta_{sys} = (P_{out} - P_{self}) / P_{out} \quad (11)$$

式中: $P_{out}$ 为HFC输出的电功率; $P_{self}$ 为HFC自身消耗的功率。

HFC整体的发电效率 $\eta_{HFC}$ 为:

$$\eta_{HFC} = \eta_{el} \eta_{sys} \quad (12)$$

HFC中单位质量 $H_2$ 的发电功率 $P_{HFC}$ 为:

$$P_{HFC} = W_{M,LHV} \eta_{HFC} \quad (13)$$

### 1.5 储电装置模型

本文的储电装置主要由蓄电池构成,其在某一时刻的容量可表示为:

$$E(t+1) = E(t)(1-\zeta) + P_{ch}(t)\Delta t - P_{dch}(t)\Delta t \quad (14)$$

式中: $E(t)$ 为 $t$ 时刻蓄电池的容量; $\zeta$ 为蓄电池的自放电率; $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dch}(t)$ 分别为 $t$ 时刻蓄电池的充、放电功率; $\Delta t$ 为单位时间。

$t$ 时刻蓄电池的荷电状态 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = \begin{cases} (1-\zeta)S(t-1) + \frac{P_{ch}(t)\eta_{sb}\Delta t}{E_{sb}} \times 100\% & \text{充电} \\ (1-\zeta)S(t-1) - \frac{P_{dch}(t)\Delta t}{E_{sb}\eta_{sb}} \times 100\% & \text{放电} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{sb}$ 为蓄电池的额定容量; $\eta_{sb}$ 为蓄电池的充放电效率。

## 2 OCIES的异质流耦合建模

包含陆地能源终端的OCIES物质流动情况为:中心平台为井口平台提供电能以采集原油,并利用自身供能系统生产石油与伴生气,海上风电与陆地能源终端则为中心平台提供电能,在保障生产质量的同时,提升能源安全性。另外,2个中心平台之间实现电气互联<sup>[25]</sup>,并供应伴生气给陆地能源终端,陆地能源终端生产的天然气则输送至中心平台进行储存。

系统内的整体物质流动情况分析忽略了中心平台与陆地能源终端的内部情况,因此本文将中心平台1、中心平台2及其互联井口平台合并为海上能源系统,建立包含陆地能源终端的OCIES内部异质流耦合模型,如图2所示,对系统内部物质与能量的流

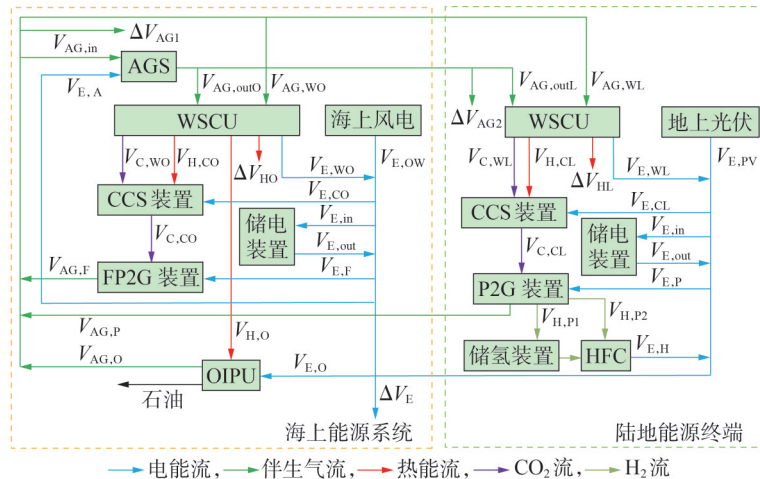


图2 含陆地能源终端的OCIES内部异质流耦合模型

Fig.2 Internal heterogeneous flow coupling model of OCIES with land energy terminal

动转换关系及不同单元间的耦合关系进行分析。图中变量的含义说明见后文及附录B中。

### 2.1 CCS-FP2G-AGS耦合能流分析

中心平台的CCS装置与FP2G装置通过消耗电能、热能捕获CO<sub>2</sub>并合成天然气,一部分供给WSCU进行生产,一部分存储于AGS中,其耦合数学模型可表示为:

$$V_{C,CO} = \eta_C^C V_{C,WO}, \quad V_{E,CO} = \eta_C^E V_{C,CO}, \quad V_{H,CO} = \eta_C^H V_{C,CO} \quad (16)$$

$$V_{AG,F} = \eta_P^C V_{C,CO}, \quad V_{E,F} = \eta_P^E V_{AG,F} \quad (17)$$

$$V_{AG,in} = (V_{AG,F} + V_{AG,P} + V_{AG,O}) - V_{AG,WO} - V_{AG,WL} - \Delta V_{AG1} \quad (18)$$

$$V_{E,A1} = \eta_A^E V_{AG,in}, \quad V_{E,A2} = \eta_A^E V_{AG,outO} + \eta_A^E V_{AG,outL} \quad (19)$$

式中: $\eta_C^C$ 、 $\eta_C^E$ 、 $\eta_C^H$ 分别为CCS装置捕获CO<sub>2</sub>的效率、耗电系数、耗热系数; $V_{C,CO}$ 、 $V_{E,CO}$ 、 $V_{H,CO}$ 分别为海上能源系统中的CCS装置捕获的CO<sub>2</sub>量、消耗的电能、消耗的热能; $V_{C,WO}$ 为海上能源系统的WSCU的碳排放量; $\eta_P^C$ 、 $\eta_P^E$ 分别为FP2G装置利用CO<sub>2</sub>合成伴生气的效率、耗电系数; $V_{AG,F}$ 、 $V_{E,F}$ 分别为FP2G装置合成的天然气量、消耗的电能; $V_{AG,in}$ 为AGS存储的伴生气量; $V_{AG,outO}$ 、 $V_{AG,outL}$ 分别为AGS释放到海上能源系统、陆地能源终端WSCU的伴生气量; $V_{AG,P}$ 为P2G装置合成的天然气量; $V_{AG,O}$ 为OIPU生产的伴生气预测量; $V_{AG,WO}$ 、 $V_{AG,WL}$ 分别为海上能源系统、陆地能源终端的WSCU消耗的伴生气量; $\eta_A^E$ 为AGS的耗电系数; $\Delta V_{AG1}$ 为伴生气输入AGS前的损耗量; $V_{E,A1}$ 、 $V_{E,A2}$ 分别为AGS存储、释放伴生气消耗的电能。

### 2.2 CCS-P2G-HFC耦合能流分析

陆地能源终端的P2G装置通过消耗电能生成H<sub>2</sub>,并提供给HFC辅助出力,当CCS装置捕获到CO<sub>2</sub>后,进一步合成天然气,其耦合数学模型与2.1节相似,具体见附录B式(B1)~(B3)。

### 2.3 WSCU能流分析

WSCU利用伴生气生产电能与热能,维持整个油气平台群正常运行,以海上能源系统的WSCU为例,其耦合数学模型可表示为:

$$\begin{cases} V_{E,WO} = \eta_W^E (V_{AG,outO} + V_{AG,WO}) \\ V_{H,WO} = \eta_W^H (V_{AG,outO} + V_{AG,WO}) \\ V_{C,WO} = \eta_W^C (V_{AG,outO} + V_{AG,WO}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\eta_W^E$ 、 $\eta_W^H$ 、 $\eta_W^C$ 分别为WSCU消耗伴生气的产电系数、产热系数、CO<sub>2</sub>排放系数; $V_{E,WO}$ 、 $V_{H,WO}$ 分别为海上能源系统的WSCU产生的电能、热能。另外,WSCU<sub>3</sub>产生的热能只提供给CCS装置捕获CO<sub>2</sub>,而WSCU<sub>1</sub>、WSCU<sub>2</sub>产生的热能一部分提供给CCS装置,一部分提供给OIPU进行油气生产,其耦合数学模型可表示为:

$$(\rho_C^H + \rho_0^H) V_{H,W}^{1,2} = V_{H,C}^1 + V_{H,O} \quad (21)$$

$$V_{H,C}^3 = \rho_C^H V_{H,W}^3 \quad (22)$$

式中: $\rho_C^H$ 、 $\rho_0^H$ 分别为CCS装置、OIPU消耗WSCU产热

量的比例; $V_{H,W}^{1,2}$ 、 $V_{H,W}^3$ 分别为中心平台1和中心平台2的WSCU(WSCU<sub>1</sub>、WSCU<sub>2</sub>)、陆地能源终端的WSCU(WSCU<sub>3</sub>)的产热量; $V_{H,C}^1$ 、 $V_{H,C}^3$ 分别为中心平台1和中心平台2的CCS装置、陆地能源终端的CCS装置的耗热量; $V_{H,O}$ 为OIPU的耗热量。

### 2.4 储电装置的能流分析

储电装置既可用于平抑风光出力波动,又可储存WSCU、风电、光伏生产的多余电能,并在油气生产负荷高峰时段释放电能,其耦合数学模型可表示为:

$$\begin{cases} V_{E,in} = (V_{E,W} + V_{E,PV} + V_{E,OW} + V_{E,H}) - \\ \quad (V_{E,O} + V_{E,C} + V_{E,F} + V_{E,P} + V_{E,A}) \\ V_{E,out} = (V_{E,O} + V_{E,C} + V_{E,F} + V_{E,P} + V_{E,A}) - \\ \quad (V_{E,W} + V_{E,PV} + V_{E,OW} + V_{E,H}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $V_{E,in}$ 、 $V_{E,out}$ 分别为储电装置储存、释放的电能; $V_{E,W}$ 为WSCU生产的电能; $V_{E,C}$ 为CCS消耗的电能; $V_{E,OW}$ 、 $V_{E,PV}$ 分别为风电、光伏产生的电能; $V_{E,H}$ 为HFC产生的电能; $V_{E,O}$ 为OIPU生产消耗的电能; $V_{E,P}$ 为P2G装置消耗的电能; $V_{E,A}$ 为AGS消耗的电能。

### 2.5 电-气-热异质流平衡模型

考虑电-气-热能在传输过程中的损耗,引入 $\Delta V$ 表示损耗量,忽略储电装置在电能存储和释放过程中的损耗,电-气-热异质流平衡模型可表示为:

$$\begin{cases} V_{E,WO} + V_{E,WL} + V_{E,OW} + V_{E,PV} + V_{E,H} = \\ \quad V_{E,CO} + V_{E,CL} + V_{E,P} + V_{E,O} + V_{E,F} + V_{E,A} + \Delta V_E \\ V_{H,WO} + V_{H,WL} = V_{H,CO} + V_{H,CL} + V_{H,O} + \Delta V_{HO} + \Delta V_{HL} \\ V_{AG,O} + V_{AG,P} + V_{AG,F} = V_{AG,in} + V_{AG,WO} + V_{AG,WL} + \Delta V_{AG1} \\ V_{AG,in} = V_{AG,outO} + V_{AG,outL} + \Delta V_{AG2} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\Delta V_E$ 为电能输送损耗量; $V_{E,WL}$ 、 $V_{H,WL}$ 分别为陆地能源终端的WSCU产生的电能、热能; $V_{E,CL}$ 、 $V_{H,CL}$ 分别为陆地能源终端的CCS装置消耗的电能、热能; $\Delta V_{HO}$ 、 $\Delta V_{HL}$ 分别为海上能源系统、陆地能源终端的WSCU传输损耗的热能; $\Delta V_{AG2}$ 为AGS输出伴生气至陆地能源终端时的损耗量。

## 3 风光气储氢耦合的OCIES低碳优化调度模型

### 3.1 弃风弃光惩罚

风光出力的随机性、波动性会对整个海上油气平台群系统造成影响<sup>[26]</sup>,一般认为弃风弃电量为理论发电量与实际发电量的差值。以1d内不同时刻的风电及光伏发电量进行计算,某时段的弃风弃光总电量 $W_q$ 可表示为:

$$W_q = \int_{t_1}^{t_2} (P_{fl}(t) - P_{fs}(t) + P_{gl}(t) - P_{gs}(t)) dt \quad (25)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$ 分别为计算时段的起始、终止时刻; $P_{fl}(t)$ 、 $P_{gl}(t)$ 分别为 $t$ 时刻风电场、光伏电站的理论发电功

率;  $P_{fs}(t)$ 、 $P_{gs}(t)$  分别为  $t$  时刻风电场、光伏电站的实际发电功率。针对大范围的弃风弃光现象,引入如图3所示的弃风弃光分段惩罚因子  $c_p$  (单位为元/kW)<sup>[27]</sup>。图中:  $P_{RES}^{Ab}(t)$  为  $t$  时刻的弃风弃光总电量;  $c_{p1}$ 、 $c_{p2}$ 、 $c_{p3}$  为分段弃风弃光惩罚因子取值;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  为分段弃风弃光总电量取值。随着弃风弃光总电量的增大,惩罚因子增大。

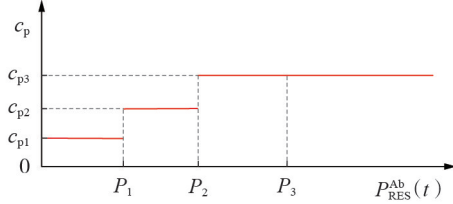


图3 弃风弃光分段惩罚因子

Fig.3 Segmented penalty factor for wind and photovoltaic curtailment

$t$  时刻的弃风弃光惩罚成本  $C_{RES}(t)$  可表示为:

$$C_{RES}(t) = \begin{cases} c_{p1} P_{RES}^{Ab}(t) & 0 \leq P_{RES}^{Ab}(t) \leq P_1 \\ c_{p1} P_1 + c_{p2} (P_{RES}^{Ab}(t) - P_1) & P_1 < P_{RES}^{Ab}(t) \leq P_2 \\ c_{p1} P_1 + c_{p2} P_2 + c_{p3} (P_{RES}^{Ab}(t) - P_2) & P_{RES}^{Ab}(t) > P_2 \end{cases} \quad (26)$$

### 3.2 目标函数

以综合成本  $F$  最小为优化目标,如式(27)所示。

$$\min F = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \omega_3 F_3 \quad (27)$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别为燃料消耗成本、碳排放惩罚成本、弃风弃光惩罚成本;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为燃料消耗成本、碳排放惩罚成本、弃风弃光惩罚成本的权重系数。

### 3.3 约束条件

需要满足的约束条件包括燃气机组出力约束<sup>[28]</sup>、机组出力及爬坡约束、蓄电池充放电功率及容量约束、AGS存储与释放速率约束、系统功率平衡约束等。

1) 电功率平衡约束。

$$P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} + P_{NEW} + P_{ESout} + P_{SOFC} = P_{load1} + P_{load2} + P_{CCS} + P_{AGS} + P_{P2G} + \Delta P \quad (28)$$

式中:  $P_{W1}$ 、 $P_{W2}$ 、 $P_{W3}$  分别为 WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub> 的发电功率;  $P_{NEW}$  为新能源出力;  $P_{ESout}$  为蓄电池的放电功率;  $P_{SOFC}$  为 HFC 利用 H<sub>2</sub> 的发电功率;  $P_{load1}$ 、 $P_{load2}$  分别为中心平台 1、中心平台 2 的 OIPU 所需电负荷;  $P_{CCS}$  为 CCS 装置捕获 CO<sub>2</sub> 的耗电功率;  $P_{AGS}$  为存储或释放伴生气的耗电功率;  $P_{P2G}$  为 P2G 装置产生 H<sub>2</sub> 及合成伴生气的耗电功率;  $\Delta P$  为传输损耗的功率。

2) 热功率平衡约束。

$$\begin{cases} H_{O1} = H_{load1} + H_{CCS} + \Delta H \\ H_{O2} = H_{load2} + H_{CCS} + \Delta H \\ H_{O3} = H_{CCS} + \Delta H \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $H_{O1}$ — $H_{O3}$  分别为 WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub> 的产热功率;  $H_{load1}$ 、 $H_{load2}$  分别为中心平台 1、中心平台 2 的 OIPU 所需热负荷;  $H_{CCS}$  为 CCS 装置捕获 CO<sub>2</sub> 所需热负荷;  $\Delta H$  为传输损耗的热功率。

3) 机组出力约束。

$$P_{min,k} \leq P_k(t) \leq P_{max,k} \quad (30)$$

式中:  $P_k(t)$  为  $t$  时刻出力单元  $k$  (包括新能源以及 WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub>) 的出力,  $P_{max,k}$ 、 $P_{min,k}$  分别为  $P_k(t)$  的上、下限值。

4) 机组爬坡约束。

$$P_k(t) - P_k(t-1) \leq P_{kup} \quad (31)$$

$$P_k(t-1) - P_k(t) \geq P_{kdown} \quad (32)$$

式中:  $P_{kup}$ 、 $P_{kdown}$  分别为出力单元  $k$  (包括 WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub> 以及新能源) 向上、向下爬坡功率的上限。

5) 蓄电池充放电功率及容量约束。

$$P_{ES}^{min} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ES}^{max} \quad (33)$$

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (34)$$

式中:  $P_{ES}(t)$  为  $t$  时刻蓄电池的充放电功率,  $P_{ES}^{max}$ 、 $P_{ES}^{min}$  分别为其上、下限;  $E_{max}$ 、 $E_{min}$  分别为蓄电池容量的最大值、最小值。

6) AGS 约束。

$$v_{AGS}^{min} \leq v_{AGS}(t) \leq v_{AGS}^{max} \quad (35)$$

$$V_{AGS,min} \leq V_{AGS}(t) \leq V_{AGS,max} \quad (36)$$

式中:  $v_{AGS}(t)$  为  $t$  时刻 AGS 储存或释放伴生气的速率,  $v_{AGS}^{max}$ 、 $v_{AGS}^{min}$  分别为其上、下限;  $V_{AGS}(t)$  为  $t$  时刻 AGS 储存的气体体积;  $V_{AGS,max}$ 、 $V_{AGS,min}$  分别为 AGS 的最大、最小容量。

7) 伴生气产量约束。

$$G_1 + G_2 + G_{P2G} + G_{in} \geq G_{out} + G_{w1} + G_{w2} + G_{w3} + \Delta G \quad (37)$$

式中:  $G_1$ 、 $G_2$  分别为中心平台 1、中心平台 2 的 OIPU 的伴生气产量;  $G_{P2G}$  为 P2G 装置合成的伴生气量;  $G_{in}$  为 AGS 储存的伴生气量;  $G_{out}$  为 AGS 释放的伴生气量;  $G_{w1}$ — $G_{w3}$  分别为 WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub> 消耗的伴生气量;  $\Delta G$  为传输损耗的伴生气量。

8) 储氢装置约束。

$$v_{HS}^{min} \leq v_{HS}(t) \leq v_{HS}^{max} \quad (38)$$

$$V_{HS,min} \leq V_{HS}(t) \leq V_{HS,max} \quad (39)$$

式中:  $v_{HS}(t)$  为  $t$  时刻储氢装置储存或释放 H<sub>2</sub> 的速率,  $v_{HS}^{max}$ 、 $v_{HS}^{min}$  分别为其上、下限;  $V_{HS}(t)$  为  $t$  时刻储氢装置的储氢量;  $V_{HS,max}$ 、 $V_{HS,min}$  分别为储氢装置的最大、最小容量。

## 4 算例分析

为了结合实际情况,本文选取渤海某海上油气平台群数据作为依托,对所提考虑风光气储氢耦合的 OCIES 优化运行模型和方法进行仿真验证。在优化过程中,首先根据负荷需求和可再生能源的实际发电情况,选择性地接纳一定比例的新能源发电,将

剩余弃风弃光电力转化为  $H_2$  进行储存,并利用更加安全可控的HFC进行剩余电能补充,最后由蓄电池进行放电补充,当蓄电池电量达到最低容量阈值时,由WSCU燃烧天然气以系统运行成本最小为优化目标开始产电,若后续生产过程中WSCU出力在满足OCIES负荷需求后仍没有达到功率上限,则多余的电量为蓄电池充电。这一策略旨在有效解决风光发电的波动性问题,也保证孤岛微电网电力系统的调度灵活性与安全性。

OCIES中OIPU<sub>1</sub>和OIPU<sub>2</sub>所需电、热负荷以及伴生气产量预测结果分别如附录C图C1和图C2所示,新能源发电功率预测结果如附录C图C3所示。基于此,为了验证引入新能源并考虑HFC接入后OCIES优化运行模型的有效性与可行性,以日运行成本经济性最优为目标,设置如下3种场景对系统的运行数据进行对比分析:①场景1,系统接入HFC,OCIES引入新能源;②场景2,系统不接入HFC,OCIES引入新能源;③场景3,系统不接入HFC,OCIES不引入新能源。

3种场景的运行成本与碳排放量对比如表1所示。由表可知,场景1中引入了新能源发电,同时将弃风弃光用于电解水制氢,并利用HFC辅助出力,这样能在满足负荷需求的同时减少污染气体排放,因此场景1的碳排放量与运行成本均低于场景2、3的结果;场景2中虽然没有接入HFC用于消纳弃风弃光,但其接入新能源满足了部分负荷,因此OCIES中燃气轮机的燃料消耗量与碳排放量同时减少,用于处理污染物的相关成本也降低。

表1 3种场景的运行成本与碳排放量对比

Table 1 Comparison of operation cost and carbon emissions among three scenarios

场景	碳排放量 / t	运行成本 / 元
1	484.131 1566	1347 208.242
2	496.214 0612	1393 576.380
3	515.718 0974	1525 812.739

3种场景的电功率平衡结果如图4所示。OCIES中的负荷主要包括OIPU<sub>1</sub>与OIPU<sub>2</sub>的总电负荷、CCS捕获CO<sub>2</sub>消耗的电能、P2G消耗的电能以及AGS释放与储存伴生气消耗的电能,系统出力部分包括WSCU总出力、HFC出力和新能源出力,三部分出力协同作用于整个平台群系统。

由图4(a)可知,当系统接入HFC后,HFC可以利用H<sub>2</sub>发电,补偿了部分本应由蓄电池放电而提供的电能,因此储电装置的供能被弱化,其放电次数变少且放电电量较小,工作时间也缩短。另外,HFC利用的H<sub>2</sub>由P2G装置利用弃风弃光合成而来,这在促进新能源消纳的同时,进一步减少了碳排放量。

结合图4(a)、(b)可知,虽然场景1、2中都引入

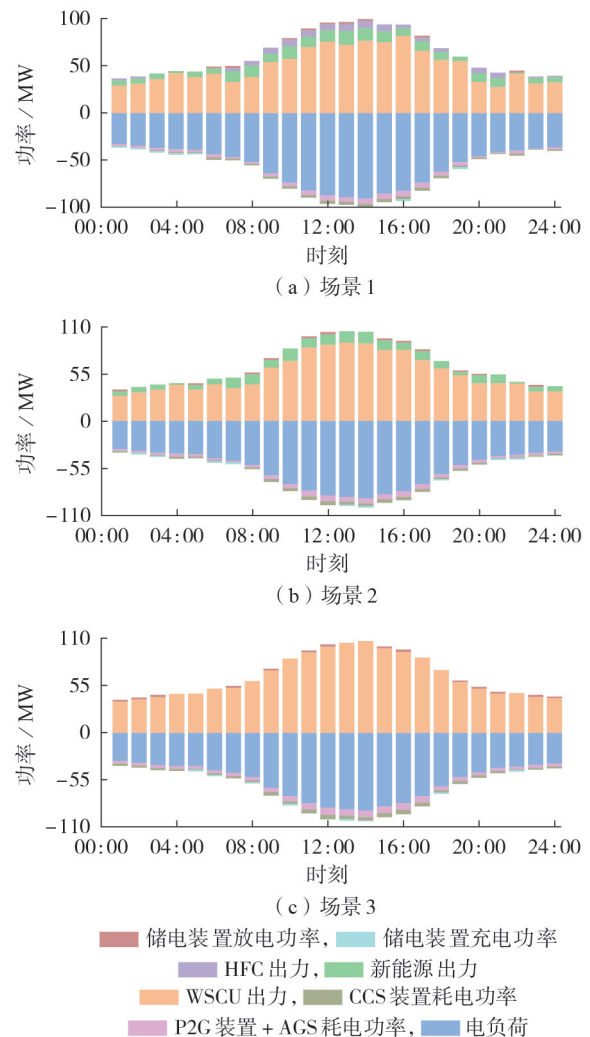


图4 3种场景的电功率平衡结果

Fig.4 Electric power balance results of three scenarios

了新能源,但场景1中由于有HFC出力,其OCIES的WSCU总出力小于场景2中的WSCU总出力,且HFC在01:00、02:00、07:00—18:00、20:00—24:00均有出力,表明这些时刻有弃风弃光现象。由光伏出力预测曲线可知,在00:00—04:00、20:00—24:00时段内光伏不出力,此时的新能源弃电量主要是弃风量。对于临近中午的时段,由于弃风弃光同时发生,这些时段内的H<sub>2</sub>产量与HFC出力更大,对比场景1与场景2的结果可知,场景1中的WSCU出力小于场景2中的WSCU出力,因此场景1消耗的天然气的量与碳排放量远比场景2少,这验证了本文所提模型的优越性与有效性。

从负荷角度对比分析场景1与场景2可知:由于场景2中没有HFC消纳弃风弃光,其WSCU需要燃烧更多的天然气来提高产电量,因此产生了更多的CO<sub>2</sub>,导致场景2中CCS装置捕集CO<sub>2</sub>的耗电量大于场景1中CCS装置的耗电量;而场景1中由于增设HFC辅助出力,提供了部分CCS装置捕集CO<sub>2</sub>所需的电能,更加低碳环保。

3种场景下WSCU的总热出力如图5所示。其中WSCU的总热出力为WSCU<sub>1</sub>—WSCU<sub>3</sub>的热出力之和。

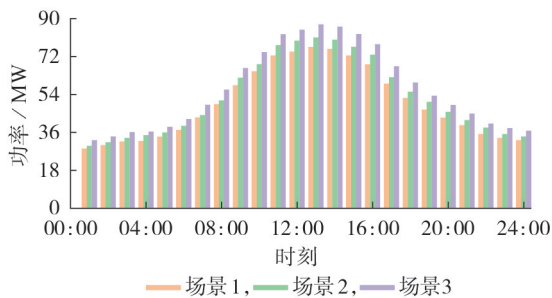


图5 3种场景下WSCU的总热出力

Fig.5 Total thermal output of WSCU under three scenarios

对比分析图4(a)—(c)可知:由于场景3未引入新能源且未接入HFC,其OCIES的WSCU出力最大,且相较于场景1、2,场景3中蓄电池的放电次数多,放电电量大;此外,场景3中的蓄电池只进行辅助出力,而WSCU作为主要出力设备承担大部分电力负荷,因此场景3的碳排放量、CCS装置耗电量均增大。再结合图5所示WSCU总热出力结果进行分析,由于在满足相同的OIPU<sub>1</sub>、OIPU<sub>2</sub>所需热负荷后,剩余的热负荷源于CCS装置,而场景3中WSCU总热出力高于场景1和场景2,同样证明了不含新能源和HFC的场景3的碳排放量、电能消耗量与热能消耗量都将增大。

3种场景的碳排放量对比如图6所示。由于碳排放量取决于燃气轮机出力与CCS装置的捕集效率,场景1中各时刻的碳排放量都比场景3中的少。同时,在03:00—06:00、19:00、22:00时刻并未有弃风弃光现象,所以没有额外的H<sub>2</sub>产生以供给HFC发电,因此场景1与场景2的碳排放量相同,但都低于场景3,而在其他时刻,由于在新能源和HFC的共同作用下,场景1的碳排放量均低于场景2和场景3。

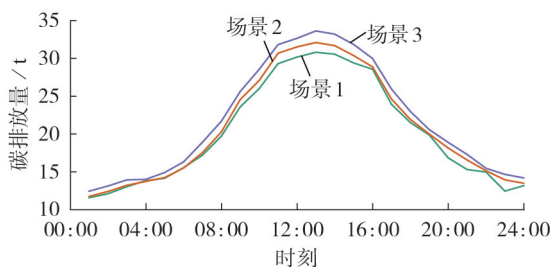


图6 3种场景的碳排放量对比

Fig.6 Comparison of carbon emissions among three scenarios

## 5 结论

本文对由多个平台构成的海上油气平台群进行研究,分析了OCIES整体物质的流动情况,将中心平

台1、中心平台2考虑为海上能源系统,建立OCIES内部耦合数学模型,实现了系统物质-能量的建模与分析。考虑到新能源具有强不确定性而无法完全利用于海上油气平台群,引入HFC与储氢装置,并利用选择性消纳策略安全有效地利用接入的新能源,建立风光气储氢耦合的OCIES优化调度模型。以日运行经济性为优化目标,分别在3种场景下进行算例仿真,对系统的运行数据进行对比分析,验证了选择性消纳策略及引入HFC可有效降低碳排放量与系统运行成本,证明了本文所提模型的有效性与经济性。

然而,本文建立的某些模型只适用于类似海上油气平台的综合能源系统,后续还需要构建更具有普适性的建模方法,以便分析更多的场景。此外,本文未对新能源发电功率和负荷预测的准确性进行深入探讨,后续研究中需要注重预测精度的提高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 管清爽. 海上多平台气-电互联系统的安全分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2020.  
GUAN Qingshuang. Safety analysis of offshore multi-platform gas-electric interconnection system[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China),2020.
- [2] 杨仁焯,张琛,蔡旭,等. 海上风电-柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13):4823-4835.  
YANG Renxin,ZHANG Chen,CAI Xu,et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(13):4823-4835.
- [3] 谭祖颢. 大规模海上风电陆上并网选址与影响研究[D]. 济南:山东大学,2022.  
TAN Zukuang. Research on access point and influence of large scale offshore wind farm[D]. Jinan:Shandong University,2022.
- [4] NGUYEN T V,TOCK L,BREUHAUS P,et al. CO<sub>2</sub>-mitigation options for the offshore oil and gas sector[J]. Applied Energy,2016,161:673-694.
- [5] QUIRAPAS M A J R,TAEIHAGH A. Ocean renewable energy development in Southeast Asia:opportunities,risks and unintended consequences[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,137:110403.
- [6] ZHANG Q,ZHANG H R,YAN Y M,et al. Sustainable and clean oilfield development:how access to wind power can make offshore platforms more sustainable with production stability [J]. Journal of Cleaner Production,2021,294:126225.
- [7] 刘津涛,冯涵蕴,魏平,等. 面向氢储双向运行机制的海上风光氢储一体化发电系统容量协同优化方法[J]. 电力自动化设备,2025,45(12):49-57.  
LIU Peijin,FENG Hanyun,WEI Ping,et al. Capacity collaborative optimization method of offshore wind-solar-hydrogen energy storage integrated generation system for bidirectional operation mechanism of hydrogen storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(12):49-57.
- [8] 李梓岳,乔颖,鲁宗相. 海上风电-氢能系统运行模式分析及配置优化[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):104-112.

- LI Ziqiu, QIAO Ying, LU Zongxiang. Operation mode analysis and configuration optimization of offshore wind-hydrogen system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 104-112.
- [9] 孟庆伟, 赵睿, 钟振芳, 等. 风电接入远海油气平台的规划方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 48-54.
- MENG Qingwei, ZHAO Rui, ZHONG Zhenfang, et al. Planning method of offshore oil and gas platform integrated with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 48-54.
- [10] 王富强, 郝军刚, 李帅, 等. 漂浮式海上风电关键技术与发展趋势[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 9-12, 117.
- WANG Fuqiang, HAO Jungang, LI Shuai, et al. Key technologies and development trends of floating offshore wind turbine[J]. Water Power, 2022, 48(10): 9-12, 117.
- [11] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.
- YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [12] 章浅诺, 张哲任, 金砚秋, 等. 适用于超大规模海上风电并网的直流送出系统[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(1): 106-114.
- ZHANG Qiannuo, ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, et al. DC transmission system suitable for ultra-large-scale offshore wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 106-114.
- [13] 蔡锐锐, 杨蕾, 黄伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 169-177.
- CAI Baorui, YANG Lei, HUANG Wei. Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 169-177.
- [14] 孟庆伟, 李瑞阳, 刘宽, 等. 基于多智能体的海上油气平台风-燃协调频率辅助控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 105-111, 140.
- MENG Qingwei, LI Ruiyang, LIU Kuan, et al. Coordinated frequency auxiliary control strategy of wind farm and gas turbine on offshore oil and gas platform based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 105-111, 140.
- [15] 徐路. 考虑台风影响的海上风电接入系统可靠性评估及优化措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- XU Lu. Reliability evaluation and optimization measures of offshore wind power integration system considering the influence of typhoon[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [16] 郭毅成. 计及海上风电的“源-网-荷-储”调度优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- GUO Yicheng. Research on “source-network-load-storage” scheduling optimization considering offshore wind power[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [17] 江守其, 徐亚男, 李国庆, 等. 提升海上风电经柔直联网系统频率稳定性的协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 194-201.
- JIANG Shouqi, XU Yanan, LI Guoqing, et al. Coordinated control strategy for improving frequency stability of MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 194-201.
- [18] 吕伟, 王晗, 张健文, 等. 基于负序电流补偿的并联风电变流器故障容错控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 142-148.
- LÜ Wei, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Fault-tolerant control based on negative-sequence current compensation for parallel wind power converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 142-148.
- [19] 方晓伦, 杨强, 刘国锋, 等. 海上多平台互联电力系统故障后的供电恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 53-61.
- FANG Xiaolun, YANG Qiang, LIU Guofeng, et al. Power supply restoration strategy for offshore multi-platform interconnected power system with faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 53-61.
- [20] CLARK C E, DUPONT B. Reliability-based design optimization in offshore renewable energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 97: 390-400.
- [21] 李茜, 黄海涛, 晏小彬, 等. 海上油气微能系统的低碳优化运行研究[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 12-22.
- LI Qian, HUANG Haitao, YAN Xiaobin, et al. Research on low-carbon optimal operation of offshore oil and gas micro integrated energy system[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 12-22.
- [22] 张安安, 张红, 李茜, 等. 电-气联合储能的海上微能系统模糊随机规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5915-5925, 6172.
- ZHANG An'an, ZHANG Hong, LI Qian, et al. Fuzzy stochastic programming of offshore MIES including electricity and associated gas storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5915-5925, 6172.
- [23] MCDONAGH S, O'SHEA R, WALL D M, et al. Modelling of a power-to-gas system to predict the levelised cost of energy of an advanced renewable gaseous transport fuel[J]. Applied Energy, 2018, 215: 444-456.
- [24] 张红. 海上油气平台微能系统优化规划研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- ZHANG Hong. Research on optimized planning of micro-energy system for offshore oil and gas platforms[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [25] 孟庆伟, 管清爽, 张丽霞, 等. 海上多平台气-电互联系统稳态建模与能量流分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 61-70.
- MENG Qingwei, GUAN Qingshuang, ZHANG Lixia, et al. Steady-state modeling and energy flow analysis of offshore multi-platform gas-electricity interconnection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 61-70.
- [26] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133-141.
- BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 133-141.
- [27] 孙凯, 张新燕, 周登钰, 等. 含大规模新能源的现代电力系统动态经济调度研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 771-777.
- SUN Kai, ZHANG Xinyan, ZHOU Dengyu, et al. The research on dynamic economic dispatch of modern power system containing large scale new energy sources[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 771-777.
- [28] 刘静, 徐宪东, 刘龙飞, 等. 计及风电并网的海上油气田综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(18): 136-145.
- LIU Jing, XU Xiandong, LIU Longfei, et al. Optimal day-ahead scheduling for integrated energy system of offshore oil and gas field considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(18): 136-145.

#### 作者简介:

李茜(1988—),女,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统运行与控制、能源系统智能感知(E-mail: swpuliquan@163.com);

许宇锋(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统生产模拟及优化调度(E-mail: 1628532098@qq.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第204页 continued on page 204)