

海上油气工程微能系统的能效评估与优化运行

严伟¹, 幸相渝², 陈俊¹, 牛洪海¹, 杨智彬³, 吴军², 姜清辉¹, 韩锐², 邱睿²

(1. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要:目前海上油气工程微能系统的能源利用效率缺乏有效评估手段,无法有效对比各运行方式下的能源利用效率,使得难以合理选择运行方式。为了优化海上油气工程微能系统的运行方式,根据系统的物质能量流结构,运用能源集线器矩阵建模方法,建立了海上油气工程微能系统的标准化模型;提出了海上油气工程微能系统的综合能效评估指标,并利用信息熵计算指标的权重分布情况;提出了综合考虑能效水平与经济性的海上油气工程微能系统优化模型,并对比了优化前后的能效指标值和综合能效评估结果。计算结果表明,优化运行方案能显著提高系统的能源利用效率,使综合能效评估结果最优。

关键词:海上油气工程;海上微能系统;标准化建模;能效评估;优化运行

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204027

0 引言

大力发展海洋油气行业是填补我国能源缺口的重要战略之一。海上油气工程,即海上油气开采平台,其远离陆地,内部具备电、热、气、油、水等多种能量和物质之间的复杂交互关系,属于能源密集型系统,又称海上微能系统 OMIES(Offshore Micro Integrated Energy System)^[1]。目前,虽然海上油气工程正朝着集群开发、多平台互联以及多能综合利用的方向发展^[2-4],但是由于其运行环境特殊,该系统输入侧能源结构单一、能源利用效率低下以及高成本、高排放、高能耗等缺点暂未得到根本改善。

有效的能效评估手段可以促进 OMIES 向高效性方向发展。目前,国内外针对海上油气工程的研究多是将其简单视作离岸型电力系统进而研究其可靠性、稳定性等问题^[5-6],而将海上油气工程视作多能源系统并对其开展能效评估的研究还很匮乏。海上油气开采平台是解决我国能源危机的重要一环,平台所产的石油与天然气是我国当前紧缺的能源,在全球能源逐渐枯竭、“双碳”目标亟待实现的大背景下,海上油气开采平台的作业必须向着一次能源消耗量 PEC(Primary Energy Consumption)少、碳排放量少的方向发展。除此之外,随着“双碳”目标的提出,海上运输设备已逐渐改装为燃烧天然气驱动,海上油气开采平台未来将实现大规模平台互联,多种类能源共济,作为海上运输设备的中枢,为其提供天然气补充等服务。为此,可借鉴一般区域综合能源系统 RIES(Regional Integrated Energy System)在

评估领域内的研究成果。文献[7]分别从动态和静态的角度构筑了涵盖技术性、经济性、可靠性、高效性等方面的 RIES 评估指标体系。文献[8]构建了以能源环节、装置环节、配电网环节和用户环节为上层宏观因素的综合评估指标体系,并考虑了不同微观指标的相互交叉与重复性造成的影响。可见,以往研究多侧重从多层次、多角度开展综合效益评估,而对能效评估指标的设置不全面,无法合理准确地评估系统的能源利用水平。本文提出的评估方法更侧重于评估 OMIES 的能源利用水平,结合其具体运行环境与未来的智能化、多能化需求,有效指引海上平台的能效提升工作,这对于海上平台实现能源高效利用、多能互联平台改造、碳排放量减少具有重要的探索意义。

能效评估的理论基础为热力学第一定律和热力学第二定律。基于热力学第一定律的指标主要包括 PEC、一次能源利用率 PEUR(Primary Energy Utilization Rate)、一次能源节约率 PESR(Primary Energy Saving Rate)、平均综合能源利用率^[9-10]等。文献[11]针对选用单一能效指标进行评估的局限性,对 RIES 的能级进行了细分,在能质系数的基础上分别提出了能源供应、转换、传输、存储和需求 5 个环节的能效表达式,并分析了各级能效之间的相关性以及影响系统能效的核心影响要素。影响能效的关键因素是能效评估方法的选取、能量输入环节的控制与能量运行过程管理的优化,面向未来 OMIES 多能化、节能化的发展趋势,本文建立了一套能效评估方法,并对一个新型 OMIES 进行能量过程管理优化,展示未来新技术不断发展下的 OMIES 能效提升效果。

只有对 OMIES 的能效进行合理的评估,才能进一步针对提高 OMIES 的能量利用效率进行运行方式的优化。文献[12]提出了一种考虑电气联合储能

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2022-02-28

在线出版日期:2022-04-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904800)

Project supported by the National R&D Program of China (2018YFB0904800)

的OMIES规划方法,通过将废弃油井改造为储气库,可以有效应对伴生气产量的波动,提升OMIES的可持续运行能力和环保效益。文献[13]围绕OMIES的燃气透平耗气特性设置优化策略,通过寻找透平机组的最优运行区间以减少天然气的损耗与排空。上述研究成果虽能从一定程度上降低现有OMIES的能量浪费,但均是将其视作电-气耦合能源系统,未充分考虑其内部的复杂物质能量转换关系,因而具有一定的局限性。本文结合提出的能效评估方法对一个包含可再生能源发电、电气联合储能等新技术的海上油气平台进行节能优化,以PEC最少和运行环保成本最低为优化目标,结合各约束,给出优化结果,并与传统的热电联产模式下的运行情况对比分析,这样结合能效紧密评估的新型海上油气平台的优化分析将给未来海上油气开采行业的发展带来一定的启发。

综上所述,为提高OMIES的能源利用效率,探索多能互联对OMIES灵活性提升、节能减排的意义,本文针对一个新型的含电气联合储能技术、CO₂排放控制技术、余热梯级利用技术和可再生能源发电技术的OMIES展开研究。首先,考虑系统内部多种物质和能量转换关系复杂的实际情况,选用标准化矩阵建立了OMIES的广义物质能量流模型;然后,提出了适用于本文提出的新型OMIES的能效评估指标和方法,并基于能效评估指标构建了以减少一次能源消耗为主要目标的优化模型;最后,通过算例分析对所提模型的有效性和正确性进行了验证。

1 海上油气工程微能系统建模

在系统运行与能源利用方面,OMIES的现有特点主要包括以下4个内容。①能源结构单一。目前,OMIES的主要燃料为天然气和轻柴油,对可再生能源的研究和利用大多仍处于发展和工程示范阶段。②“源-网-荷”高度一体化。以电力系统为例,由于OMIES的空间紧张,多台发电机组通常共用一条母线,部分负荷与发电机位于同一平台上,且直供大负荷较多,系统可靠性薄弱。③能源利用效率较低。OMIES的主要能源输入均为不可再生资源,且电、气、热的传输或耦合多为单向,多能互补能力不足。同时,OMIES的余热回收成本较高,致使OMIES的余热利用率低。为保障系统的运行安全,透平发电机的负荷率较低,致使单位出力耗气量大。④能量管理手段匮乏。OMIES与陆地能源系统没有直接的能量联系,伴生气产量的不稳定易导致系统的供需不平衡。在伴生气产量富余时期,冗余伴生气常被燃烧发散,造成大量资源的浪费和环境污染;在匮乏时期,系统过度依赖外界能源输送,经济性较低。

本文所研究的OMIES为渤海某海上油气工程

的改进模型,如附录A图A1所示。

该OMIES由能量供应系统ESS(Energy Supply System)和生产作业系统POS(Production and Operating System)2个部分组成。其中:ESS主要由供热发电系统HPGS(Heating Power Generation System)、蓄电装置PES(Power Energy Storage)、储气装置NGS(Natural Gas Storage)和排污放空管理系统BVMS(Blowdown and Venting Management System)组成;POS的主要用能工艺和工序包括油气开采系统OGMS(Oil and Gas Mining System)、油气处理系统OGPS(Oil and Gas Processing System)、注水系统WIS(Water Injection System)、电伴热系统EHS(Electric Heating System)和生活楼系统LBS(Living Building System)。ESS和POS之间存在电、热、水、油等多种能量与物质的相互联系,且POS既是ESS的负荷,又是ESS的能量来源。

为描述OMIES内部这种多能源与物质间错综复杂的转换关系,可将其适当简化并选用标准化矩阵模型进行建模,即OMIES所有的输入与输出物质流和能量流间应满足如下平衡关系^[14]:

$$\mathbf{W}_{\text{ESS}} \mathbf{E}_{\text{ESS}} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{POS}} \\ \mathbf{S}_{\text{POS}} \end{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{POS}} = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{W}_{\text{ESS}}$ 为ESS的物质能量转换矩阵; $\mathbf{E}_{\text{ESS}}$ 为ESS的“输入-输出”物质能量流矩阵; $\mathbf{W}_{\text{POS}}$ 为POS的能量转换矩阵; $\mathbf{S}_{\text{POS}}$ 为POS的物质转换矩阵; $\mathbf{E}_{\text{POS}}$ 为POS的“输入-输出”物质能量流矩阵。矩阵内部的具体形式和相关参数介绍见附录B。

2 能效评估模型

对不同能源进行统一度量的常用方法包括标准煤折算法、热当量法以及基于焓分析理论的能质系数折算法。以能质系数表述某种能量与其对应的焓之间的关系为:

$$E_{\text{ex}} = \lambda_t E_t \quad (3)$$

式中:下标 t 表示各种类型的能源,如电、气、热、冷等; E_t 为能源 t 具备的能量, E_{ex} 为其对应的焓; λ_t 为能源 t 的能质系数,其计算方法可参考文献[15]。

2.1 能效评估指标

为了从多方面反映OMIES的综合用能水平,为OMIES的节能减排提供指导,本文结合热力学第一定律和热力学第二定律,建立了适用于OMIES的5项能效评估指标。

1) PEC。

PEC定义为OMIES消耗的一次能源总量,其中一次能源包括天然气、柴油和可再生能源,不同类型的能源选用标准煤折算法进行统一折算。PEC值 f_{PEC} 的大小可以表征OMIES的总能源消耗情况,计算

公式如下:

$$f_{\text{PEC}} = (\alpha_g q_g(t) + \alpha_d m_d(t) + \alpha_r P_r(t)) \Delta t \quad (4)$$

式中: Δt 为评估时长; α_g 、 α_d 、 α_r 分别为天然气、柴油和可再生能源的标准煤折算系数; q_g 为天然气消耗的体积流量; m_d 为柴油消耗的质量流量; P_r 为太阳辐照的发电功率。

2) PEUR。

PEUR 定义为 OMIES 输出能量的总和与 PEC 的比值, 其中输出能量包括电能和热能, PEC 需用低位热值折算为对应的热量。PEUR 值 f_{PEUR} 的大小可表征 OMIES 对一次能源的利用水平, 计算公式为:

$$f_{\text{PEUR}} = \frac{(P_e(t) + P_h(t)) \Delta t}{L_{\text{HVC}} f_{\text{PEC}}} \quad (5)$$

式中: P_e 和 P_h 分别为 OMIES 输出电功率和热功率; L_{HVC} 为标准煤的低位热值。

3) PESR。

PESR 定义为 OMIES 实际供能方式相比传统运行模式节约的一次能源占传统运行模式消耗的一次能源的比例, 其值 f_{PESR} 的大小可以表征 OMIES 的节能水平和能量梯级利用水平, 计算公式如下:

$$f_{\text{PESR}} = 1 - \frac{L_{\text{HVC}} f_{\text{PEC}}}{\left(\frac{P_e(t)}{\eta_e} + \frac{P_h(t)}{\eta_h} \right) \Delta t} \quad (6)$$

式中: η_e 为传统供能模式下电厂发电的一般效率; η_h 为传统供能模式下燃气/电锅炉/煤锅炉制热的一般效率。

4) 烟效率 EXE (EXergy Efficiency)。

EXE 定义为 OMIES 输出总烟与输入总烟的比值, 其中输入总烟包括天然气、柴油和可再生能源的烟, 输出总烟包括电能和热能的烟, EXE 值 f_{EXE} 的大小可表征 OMIES 的供用能匹配程度, 计算公式为:

$$f_{\text{EXE}} = \frac{E_{\text{xe}}(t) + E_{\text{sh}}(t)}{E_{\text{xg}}(t) + E_{\text{xd}}(t) + E_{\text{xr}}(t)} \quad (7)$$

式中: E_{xg} 、 E_{xd} 、 E_{xr} 分别为天然气、柴油和太阳辐照的烟; E_{xe} 和 E_{sh} 分别为电能和热能的烟。

5) 烟经济成本 EXEC (EXergy Econimic Cost)。

EXEC 定义为 OMIES 的 CO_2 排放成本和能源消耗成本的总和与输出总烟的比值, 即用 OMIES 的输出总烟代表其产出的工业产品(如石油等), 其值 f_{EXEC} 的大小可以表征 OMIES 的石油产品每单位烟所需的成本投入以及造成的环境污染, 体现了 OMIES 的环保性、经济性与能效水平的关系, 计算公式为:

$$f_{\text{EXEC}} = \frac{c_c (V_c^{\text{trans}}(t) + V_c^{\text{waste}}(t)) + c_g E_{\text{xg}}(t) + c_d E_{\text{xd}}(t) + c_r E_{\text{xr}}(t)}{E_{\text{xe}}(t) + E_{\text{sh}}(t)} \quad (8)$$

式中: c_c 为 CO_2 的排放成本; c_g 、 c_d 、 c_r 分别为天然气、柴油和可再生能源的单位烟成本; V_c^{trans} 、 V_c^{waste} 分别为

OMIES 在能源转换过程中燃料燃烧造成的 CO_2 排放量和伴生气过剩时燃烧额外天然气造成的 CO_2 排放量。

2.2 多场景能效评估方法

OMIES 的负荷水平会因季节因素的影响而表现出明显的差异。为此, 多场景能效评估的基本思路是: 首先将全年按季节特性进行划分, 选取各季节内典型日的负荷条件作为基本评估对象并设置相应的运行方案, 将不同负荷特性与运行策略的组合确定为能效评估的实际场景; 然后, 针对特定场景计算 OMIES 的输入与输出能量流(或烟流), 并计算得到该场景下的能效评估指标值; 最后, 选用熵权法求得该场景下的综合能效评估结果, 并根据不同场景对应的天数进行加权求和, 最终得到全年的综合能效评估结果。

熵权法是一种能够根据指标样本数据的离散程度确定指标权重的评估方法, 具有较强的客观性和实用性, 适用于 OMIES 的能效评估^[16]。设共有 n 个评估场景、 m 项评估指标, 由熵权法计算得到第 j 项指标的权重为 ω_j , 则场景 i 下的综合能效值 s_i 为:

$$s_i = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^m X_{ij}(t) \omega_j \quad (9)$$

式中: X_{ij} 为场景 i 下第 j 项能效评估指标值。

本文将 OMIES 的季节划分为夏季、冬季和过渡季(春季、秋季), 在求得典型日下各场景的能效评估结果后, 通过式(10)进行加权求和即可近似求得全年的综合能效评估结果 K 为:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_s s_{i,s} + D_w s_{i,w} + D_t s_{i,t})}{D_s + D_w + D_t} \quad (10)$$

式中: $s_{i,s}$ 、 $s_{i,w}$ 、 $s_{i,t}$ 分别为场景 i 下在夏季、冬季和过渡季典型日的能效评估结果; D_s 、 D_w 、 D_t 分别为一年内夏季、冬季和过渡季的天数。

3 节能优化模型

3.1 目标函数

在负荷水平一定的前提下, 系统输入能源越少, 能效评估指标数值越优。因此, 本文设置的优化节能策略以 OMIES 一天内的 PEC 最少为目标函数, 具体如下:

$$\min O_{F1} = \sum_{t=1}^{24} (\alpha_g q_g(t) + \alpha_d m_d(t) + \alpha_r P_r(t)) \Delta t \quad (11)$$

式中: O_{F1} 为 OMIES 一天内消耗的一次能源总量(按标准煤折算)。

考虑工程实际, OMIES 的优化节能策略应同时计及系统的经济性与环保性, 其目标函数如下:

$$\min O_{F2} = C_{\text{ec}} + C_{\text{en}} + C_{\text{op}} \quad (12)$$

式中: O_{F2} 为 OMIES 一天内的总成本; C_{ec} 为 OMIES 一

天内消耗输入能源的总焓成本; C_{en} 为 OMIES 一天内 CO_2 的总排放成本; C_{op} 为 OMIES 一天内主要能源设备的总运行成本。上述3项成本具体可表示为:

$$C_{ec} = \sum_{t=1}^{24} (c_g E_{xg}(t) + c_d E_{xd}(t) + c_r E_{xr}(t)) \quad (13)$$

$$C_{en} = \sum_{t=1}^{24} c_c (V_c^{trans}(t) + V_c^{waste}(t)) \quad (14)$$

$$C_{op} = \sum_{t=1}^{24} [c_{ngs} E_1(t) + c_{hpgs} (E_8(t) + E_{10}(t)) + c_{pes} (E_7(t) + E_{14}(t)) + c_{bvms} (E_{11}(t) + E_{13}(t))] \quad (15)$$

式中: c_{ngs} 、 c_{hpgs} 、 c_{pes} 、 c_{bvms} 分别为 NGS、HPGS、PES 和 BVMS 单元的单位出力运行成本; 其他变量含义见附录 B, 式(16)、(17)、(19)中同理, 不再赘述。

3.2 约束条件

OMIES 除了需要满足式(1)、(2)所述的广义物质能量流模型的约束外, 还应满足能源转换设备的出力约束和储能系统的物质能量平衡约束。

NGS 的物质能量平衡约束为:

$$\begin{cases} V_{ngs}(t+1) = V_{ngs}(t) + (\eta_{ngs, in} q_{ngs, in}(t) - q_{ngs, out}(t)/\eta_{ngs, out}) \Delta t \\ 0 \leq q_{ngs, in}(t) \leq I_{in}(t) q_{ngs, max} \\ 0 \leq q_{ngs, out}(t) \leq I_{out}(t) q_{ngs, max} \\ 0 \leq V_{ngs}(t) \leq V_{ngs, max} \\ I_{in}(t), I_{out}(t) \in [0, 1] \in \mathbf{Z} \\ 0 \leq I_{in}(t) + I_{out}(t) \leq 1 \\ V_{ngs}(0) = V_{ngs}(24) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $q_{ngs, max}$ 为 NGS 储存或释放天然气的最大流量; V_{ngs} 为 NGS 的天然气体积; $V_{ngs, max}$ 为 NGS 的天然气的最大容积; $q_{ngs, in}$ 、 $q_{ngs, out}$ 分别为储存、释放天然气的流量; I_{in} 、 I_{out} 为表示 NGS 储放气状态的 0-1 变量, NGS 处于储气状态时有 $I_{in}=1$ 、 $I_{out}=0$, 处于放气状态时有 $I_{in}=0$ 、 $I_{out}=1$ 。

PES 的物质能量平衡约束为:

$$\begin{cases} E_{pes}(t+1) = E_{pes}(t) + (\eta_{pes, ch} P_{pes, ch}(t) - P_{pes, dch}(t)/\eta_{pes, dch}) \Delta t \\ 0 \leq P_{pes, ch}(t) \leq I_{ch}(t) P_{pes, max} \\ 0 \leq P_{pes, dch}(t) \leq I_{dch}(t) P_{pes, max} \\ 0 \leq E_{pes}(t) \leq E_{pes, max} \\ I_{ch}(t), I_{dch}(t) \in [0, 1] \in \mathbf{Z} \\ 0 \leq I_{ch}(t) + I_{dch}(t) \leq 1 \\ E_{pes}(0) = E_{pes}(24) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{pes, max}$ 为 PES 充电或放电的最大功率; E_{pes} 为 PES 的电容量; $E_{pes, max}$ 为 PES 的最大电容量; $P_{pes, ch}$ 、 $P_{pes, dch}$ 分别为 PES 的充、放电功率; I_{ch} 、 I_{dch} 为表

示 PES 充放电状态的 0-1 变量, PES 处于充电状态时有 $I_{ch}=1$ 、 $I_{dch}=0$, 处于放电状态时有 $I_{ch}=0$ 、 $I_{dch}=1$ 。

HPGS 的出力上下限约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{dt}(t) \leq P_{dt, max} \\ 0 \leq H_{ob}(t) \leq H_{ob, max} \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv, max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_{dt} 、 H_{ob} 、 P_{pv} 分别为柴油机组、柴油锅炉和光伏的输出功率; $P_{dt, max}$ 、 $H_{ob, max}$ 、 $P_{pv, max}$ 分别为柴油机组、柴油锅炉和光伏的最大输出功率。

由于 ESS 和 POS 互为源荷, 即 POS 作为 ESS 的电、热负荷, 同时也为 ESS 提供生产二次能源所需的天然气, 故还需在优化模型中计及 ESS 和 POS 的物质与能量相关性约束, 具体如下:

$$\begin{cases} E_8 + E_{14} \geq E_1 + P_1 + P_3 + P_5 + P_6 + P_8 \\ E_{10} \geq P_4 + P_9 \\ E_2 + E_3 \leq P_{13} \end{cases} \quad (19)$$

3.3 模型求解

综上, 节能策略的优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \{O_{F1}, O_{F2}\} \\ \text{s.t. 式(1)、(2)、(16)—(19)和} \\ \text{附录 B 式 (B1)—(B5)} \end{cases} \quad (20)$$

可见, 该模型为多目标混合整数优化模型, 可采用改进的 ε -约束法对所提模型进行求解, 其原理图如图 1 所示。

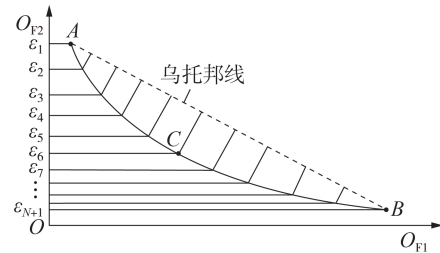


图1 改进 ε -约束法原理图

Fig.1 Principle diagram of improved ε -constraint method

首先, 分别求解单目标优化问题 $\min \{O_{F1}\}$ 、 $\min \{O_{F2}\}$, 得到最优解为 x_1 、 x_2 , 并根据目标函数值 $A(O_{F1}(x_1), O_{F2}(x_1))$ 、 $B(O_{F1}(x_2), O_{F2}(x_2))$ 确定 Pareto 前沿集的边界点; 其次, 求解单目标优化问题 $\min \{O_{F1} + O_{F2}\}$, 得到最优解为 x_3 , 记目标函数值为 $C(O_{F1}(x_3), O_{F2}(x_3))$; 然后, 过 A、B、C 这三点作辅助圆弧, 连接 AB 作乌托邦线并将其 N 等分, 过线段 AB 上的 N 等分点作垂线与弧 ACB 相交, 交点的纵坐标即为 ε_n ($n=1, 2, \dots, N+1$) 的值; 最后, 将 ε_n 作为目标函数 O_{F2} 的最大值约束代入求解单目标优化问题 $\min \{O_{F1}\}$, 通过遍历 ε_n 的值, 即可得到原多目标优化问题的 Pareto 前沿集。

4 算例分析

4.1 算例简介

本文算例采用的 OMIES 结构如附录 A 图 A1 所示,其能源转换设备主要包括光伏发电单元、燃气透平机组 GT(Gas Turbine)、余热回收装置 WHRD(Waste Heat Recovery Device)、柴油发电机组 DT(Diesel Generator)和燃油锅炉 OB(Oil-fired Boiler)。ESS 中各个单元的运行成本及其内部能源设备的主要参数如表 1 所示。

表 1 ESS 主要参数

Table 1 Main parameters of ESS

单元	设备	容量	能耗系数 / ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$)	运行成本 / ($\text{元} \cdot \text{kW}^{-1}$)
HPGS	GT	40 MW	—	0.1
	WHRD	32 MW		
	DT	30 MW		
	OB	30 MW		
	光伏	12 MW		
NGS		$3 \times 10^3 \text{ m}^3$ (初始值), 10^4 m^3 (最大值)	0.3(电),0(热)	0.2
PES		4 MW(初始值), 10 MW(最大值)	—	0.06
BVMS		$1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$	0.1(电), 0.25(热)	0.12

夏季、冬季和过渡季的典型电、热负荷曲线如附录 C 图 C1 所示,POS 各工艺单元的耗电、耗热比例如附录 C 表 C1 所示。依据实际调查统计,本文算例中 OMIES 的夏季日共有 92 d,冬季日共有 90 d,过渡季日共有 183 d。本文以上述 3 种不同季节典型日下的负荷和辐照条件作为能效评估的基本场景。

OMIES 一天内的伴生气产量曲线如图 2 所示,本文认为全年的伴生气产量水平保持稳定。

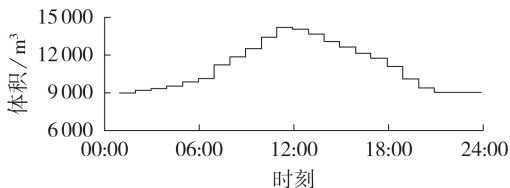


图 2 伴生气产量曲线

Fig.2 Associated gas production curve

为分析节能策略优化模型对综合能效的提升作用,设置以下 3 种运行方案进行对比分析:方案 1,系统优先满足电负荷运行,具体运行方式如附录 C 图 C2(a)所示;方案 2,系统优先满足热负荷运行,具体运行方式如附录 C 图 C2(b)所示;方案 3,系统选用优化运行方式,模型的目标函数综合考虑 PEC 最少和总成本最小。其中,方案 1 和方案 2 均属于传统的热电联产运行模式。上述 3 种运行方案在 3 个季节典型日场景下,共组成 9 个能效评估的实际场景。

4.2 优化运行结果分析

设置 $N=40$,利用商业求解器 GAMS 求解方案 3 在 3 种季节典型日下的优化模型,Pareto 最优解集如附录 C 图 C3 所示。

对 2 个目标函数的遍历优化结果分别用梯形模糊隶属度函数归一化后,确定对于 2 个目标函数都较优的折中解作为最终的优化结果,如表 2 所示。

表 2 不同季节典型日下运行方案 3 的优化结果

Table 2 Optimization results of Operation Scheme 3 on typical days in different seasons

季节	PEC / kg	总成本 / 元
夏季	276027.87	315662.66
冬季	330956.61	335753.22
过渡季	297505.98	323918.07

由表 2 可见,一次能源的需求量总体表现为冬季>过渡季>夏季,与系统的负荷季节特性相一致。进一步地,在确定最终优化结果后,可得到各运行场景下的一次能源消耗情况,以夏季日为例,其输入能量流如附录 C 图 C4 所示。可以看出,系统倾向于优先消纳光伏,原因是太阳辐照为可再生能源,本文设置其标准煤折算系数和能耗成本取 0。同时,因柴油的供热和发电效率更高,柴油的优先级高于天然气。

此外,在 02:00、03:00、05:00 和 24:00,系统出现了天然气消耗为负值的情况。这是由于上述时间内的伴生气产量过剩,而负荷的需求水平较低,NGS 动作将多余伴生气进行储存,有效减少了系统的能源浪费。夏季典型日下储能设备的动作情况如附录 C 图 C5 所示。可见系统能根据负荷需求和伴生气产量的变化对 NGS 和 PES 进行联合优化调度。在光伏出力较大的 12:00—14:00 时段,NGS 动作吸收了冗余伴生气。在夜间用电高峰期 18:00—23:00 时段,由于可再生能源出力为 0 且伴生气产量显著下降,PES 增补出力以降低系统对一次能源的消耗。

冬季和过渡季的输入能量流如附录 D 图 D1 所示。

4.3 能效评估指标结果对比

选用加权有向图法^[17]分别对各季节典型日下方方案 1 和方案 2 的输入能量流(或焓流)进行计算,求得各场景下的输入能量流如附录 D 图 D2 所示。依据附录 D 表 D1 所示的能效评估指标计算参数,可求得各场景的能效评估指标,需要注意的是,部分时间(如附录 C 图 C4 中的 02:00、03:00、05:00 和 24:00)出现了天然气消耗为负值的情况,此时无法按照定义计算能效指标。考虑到这部分天然气实际被传输到 NGS 中进行存储,在后续时段内用于增补出力,故而本文将天然气输入的负功率视为一次能源的节省量,并在 PEC 和输入焓功率中减去该部分,经此处理

后再对各项能效指标进行计算。

各指标的计算结果如表3—5所示,其中指标PEC仅给出一天内系统消耗一次能源的总量,指标PEUR、PESR、EXE和EXEC仅给出一天内的平均值。

表3 夏季不同运行方案的能效指标对比

Table 3 Comparison of energy efficiency indicators of different operation schemes in summer

方案	PEC	PEUR	PESR	EXE	EXEC
1	322010.16	0.4723	0.1583	0.2583	0.1044
2	321499.00	0.4738	0.1612	0.2600	0.1515
3	272397.87	0.6482	0.3278	0.3824	0.1769

表4 冬季不同运行方案的能效指标对比

Table 4 Comparison of energy efficiency indicators of different operation schemes in winter

方案	PEC	PEUR	PESR	EXE	EXEC
1	401038.09	0.4826	0.1425	0.2579	0.1640
2	405149.27	0.4750	0.1293	0.2544	0.1867
3	330956.61	0.6285	0.3128	0.3427	0.1441

表5 过渡季不同运行方案的能效指标对比

Table 5 Comparison of energy efficiency indicators of different operation schemes in transition season

方案	PEC	PEUR	PESR	EXE	EXEC
1	344362.04	0.4637	0.1477	0.2587	0.1196
2	341537.52	0.4675	0.1541	0.2613	0.1794
3	297505.95	0.6193	0.3022	0.3678	0.1698

由表3—5可见,在3种不同的季节条件下,采用方案3均能明显减少系统的一次能源消耗,提高能源利用效率。同时,由于在节能策略方案下系统倾向于优先将柴油作为燃料,因此在夏季日条件下,运用节能策略比传统供能模式所需的经济成本更高。但值得注意的是,在冬季日条件下采用方案3反而使指标EXEC的数值有所下降,这归功于本文建立的优化模型能够充分调动NGS和BVMS的积极性,通过NGS和BVMS的联合调度有效减少了天然气的浪费和CO₂的排放,并使得冬季日条件下环境成本的减少幅度超过了燃料成本的增加幅度,最终表现为指标EXEC的减小。通过具体计算不同场景下的各能效指标值,可以有效展示该方案下能源的利用情况,找出能源利用的薄弱环节,结合未来OMIES的多能化发展需求,本文提出的评估方法可以在未来加入更多能源环节(如海上风电)时发挥更强的引导作用,引导平台向着高效用能的方向发展。

附录D图D3对比了不同季节和不同运行方案下的CO₂排放情况。可见,方案2的环保性最差,主要是由于该算例系统热负荷水平较低,同时,HPGS单元的供热效率较低且BVMS单元的耗热系数较高,在优先供热模式下会造成更多的CO₂排放。以本文提出的评估方法为指导进行优化,方案3的CO₂

排放明显减少。而随着海上资源开发进程的加快与环保发展的冲突不断加强,以及碳交易市场的发展,海上平台引入可再生能源及其优化方向向着低碳化模式倾斜已经成为必然趋势。本文给出的评估方法与优化模型在此趋势下具有重要的现实意义,这是对海上油气平台发展的扩展性研究。

4.4 全年能效评估结果对比

进一步地,为从全局角度对比优化前后的综合能效水平,将5项能效评估指标在9种运行场景下的共24×9=216个数值作为评估样本,求得各指标的信息熵和对应的权重如表6所示。可见,在以能源利用效率为主导的能效评估体系中,EXEC的权重占比很低。

表6 各能效评估指标的信息熵和权重

Table 6 Information entropy and weight of each energy efficiency evaluation index

指标	信息熵	权重	指标	信息熵	权重
PEC	0.9828	0.1714	EXE	0.9730	0.2683
PEUR	0.9705	0.2931	EXEC	0.9949	0.0509
PESR	0.9783	0.2163			

表7对比了各季节典型日下3种运行方案的综合能效数值。可见,因能源利用效率提升,方案3的综合能效评估结果明显优于方案1和方案2。

表7 不同运行方案的综合能效评估结果对比

Table 7 Comparison of comprehensive energy efficiency evaluation results of different operation schemes

方案	综合能效		
	夏季	冬季	过渡季
1	0.3066	0.2756	0.2916
2	0.3053	0.2631	0.2925
3	0.4691	0.4620	0.4388

以全年为时间尺度,在夏季、冬季和过渡季3种季节下,分别将3种运行方案进行组合,共得到3³=27种全年运行方案。根据各季节在全年的天数占比进行加权求和,可以得到不同的全年运行方案的综合能效评估结果。表8对比了最劣运行方案、传统运行方案和最优运行方案的全年综合能效评估结果。其中,传统运行方案是指在传统运行模式方案1和运行方案2中,各季节均选取综合能效评估结果最优的方案。

表8 全年综合能效评估结果对比

Table 8 Comparison of comprehensive energy efficiency assessment results throughout year

全年运行方案	方案说明	全年综合能效
最劣运行方案	夏季、冬季选用方案2,过渡季选用方案1	0.2880
传统运行方案	夏季、冬季选用方案1,过渡季选用方案2	0.2919
最优运行方案	夏季、冬季以及过渡季均选用方案3	0.4522

由表8可见,在各季节均选用方案3,可以使系统全年的综合能效水平最高。最优运行方案相较于传统运行方案的综合能效评估数值提升了约54.92%,相较于最劣运行方案提升了约57.01%,计算结果表明,本文所提的能效评估指标及评估方法具有可行性,并且本文设置的优化运行节能策略能够有效提升系统的综合能效水平。

5 结论

为改善OMIES能效评估体系扁平、能源利用率低下等问题,本文选用标准化矩阵对OMIES进行建模,提出了适用于OMIES的能效评估指标和方法,并以此为基础进一步提出了以综合能效最小为目标的优化模型,该模型为顺应未来海上平台多能化、低碳化发展需求,供能环节加入光伏发电、热电联产设备,考虑电气联合储能,从而能够对这种具备未来发展模式雏形的系统进行评估及优化,得到主要结论如下。

1)采用的多指标多场景的评估体系,合理且全面地从能耗的总量、能源的利用效率、能源的节约水平和梯级利用水平、供用能的匹配程度和投入产出比这几个方面体现了OMIES系统的综合能效水平。

2)影响OMIES综合能效的主要因素是能效评估方法的选取、能量输入环节的控制与能量运行过程管理的优化。本文从PEC、PEUR、PESR、EXE、EXEC等指标出发对OMIES的能效进行评估,对能量运行过程进行优化,所得优化方案有效减少了PEC,降低了环境成本。

3)优化运行模式下,OMIES对一次能源的优先级为太阳辐射>柴油>天然气,方案3在提高能源利用效率的同时也会增大能耗成本,需根据运行实际平衡OMIES经济性和高效性之间的矛盾。

4)通过电-气储能单元与CO₂排放控制单元的联合优化调度,可以有效减少OMIES的能量浪费和排放成本,提高能源利用效率和环保性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ZHANG Anan, ZHANG Hong, QADRDAM M, et al. Energy hub based electricity generation system design for an offshore platform considering CO₂-mitigation[J]. Energy Procedia, 2017, 142:3597-3602.
- [2] SUN Dawei, XIE Xiaorong, WANG Jianfeng, et al. Integrated generation-transmission expansion planning for offshore oilfield power systems based on genetic Tabu hybrid algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1):117-125.
- [3] CRAIG C, ISLAM M. Integrated power system design for offshore energy vessels and deepwater drilling rigs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4):1251-1257.
- [4] 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.
- [5] 张航, 王秀丽, 张启文, 等. 计及生产指标的海上油田群电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(2):649-656. ZHANG Hang, WANG Xiuli, ZHANG Qiwen, et al. Reliability evaluation of offshore oil power system considering production indexes[J]. Power System Technology, 2021, 45(2):649-656.
- [6] 龙高翔, 于庆广, 李雪, 等. 考虑可靠性的海上油田互联电力系统结构优化研究[J]. 电网技术, 2020, 44(12):4677-4684. LONG Gaoxiang, YU Qingguang, LI Xue, et al. Structural optimization of offshore oilfield interconnected power system considering reliability[J]. Power System Technology, 2020, 44(12):4677-4684.
- [7] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8):2230-2237. LI Yang, WU Ming, ZHOU Haiming, et al. Study on some key problems related to regional multi energy system based on universal flow model[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2230-2237.
- [8] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4):174-182. CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):174-182.
- [9] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3706-3713. ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3706-3713.
- [10] 薛屹洵, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 面向多能协同园区的能源综合利用率指标[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):117-123. XUE Yixun, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Comprehensive energy utilization rate for park-level integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):117-123.
- [11] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8):8-18. LIU Xiaou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):8-18.
- [12] 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 Anan, 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.
- [13] WU Jun, LI Baolin, CHEN Jun, et al. Multi-objective optimal scheduling of offshore micro integrated energy system considering natural gas emission[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125:106535.
- [14] 李茜, 毛雅铃, 赵达维, 等. 考虑电-气混合储能的海上微能系统标准化矩阵建模与联合优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(2):522-531. LI Qian, MAO Yaling, ZHAO Dawei, et al. Scheduling optimi-

- zation of offshore micro-energy system via standardized matrix modeling considering hybrid electricity-gas storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 522-531.
- [15] 刘洪, 赵越, 刘晓鸥, 等. 计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2835-2843.
- LIU Hong, ZHAO Yue, LIU Xiaou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2843.
- [16] 石超. 分布式多能源系统能效评估及优化运行策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- SHI Chao. Research on energy efficiency assessment and operation strategy optimization of distributed multi-energy system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [17] 田立亭, 程林, 李荣, 等. 基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6471-6483.
- TIAN Liting, CHENG Lin, LI Rong, et al. A multi-scenario

energy efficiency evaluation method for district multi-energy systems based on weighted directed graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6471-6483.

作者简介:



严 伟

严 伟(1975—),男,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统控制保护、综合能源利用等(E-mail: yanw@nrec.com);

幸相渝(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统评估与优化运行(E-mail: 2015302540146@whu.edu.cn);

陈 俊(1978—),男,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统控制保护、综合能源利用等(E-mail: chenj@nrec.com)。

(编辑 李玮)

Energy efficiency evaluation and optimal operation of micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering

YAN Wei¹, XING Xiangyu², CHEN Jun¹, NIU Honghai¹, YANG Zhibin³, WU Jun²,
LOU Qinghui¹, HAN Rui², QIU Rui²

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: At present, there is no effective evaluation method of energy utilization efficiency for micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering, which cannot effectively compare the energy utilization efficiency under various operation modes, making it difficult to choose the reasonable operation mode. In order to optimize the operation mode of the micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering, according to the material energy flow structure of system, the energy hub matrix modeling method is used to establish the standardized model of the micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering. Then, the comprehensive energy efficiency evaluation index of the micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering is proposed, and the information entropy is used to calculate the weight distribution of each index. Furthermore, the optimization model for micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering that considers energy efficiency level and economy comprehensively is proposed, and the energy efficiency index values and the comprehensive energy efficiency evaluation results before and after optimization are compared. The calculative results show that the optimizing operation scheme can significantly improve the energy utilization efficiency of system, so that achieving the optimum comprehensive energy efficiency evaluation results.

Key words: offshore oil and gas engineering; offshore micro integrated energy system; standardized modeling; energy efficiency evaluation; optimal operation

附录 A

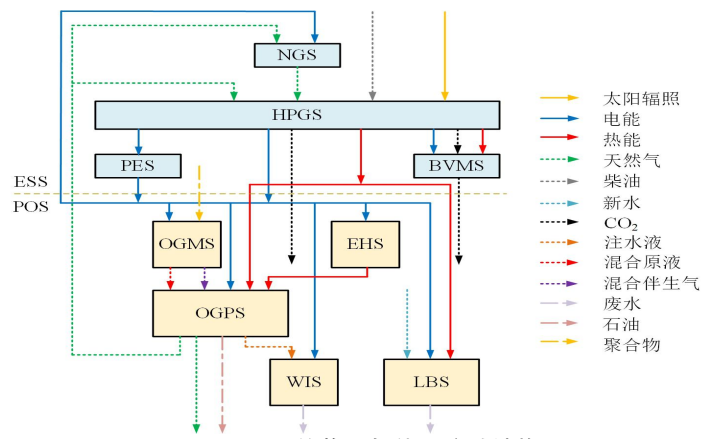


图 A1 OMIES 的物质与能量流动结构
Fig.A1 Material and energy flow structure of OMIES

附录 B

ESS 的物质与能量流动关系如附录 B 图 B1 所示，图中 E_1 — E_{15} 分别为输入 NGS 的电、输入 NGS 的天然气、由 OGPS 直接输入 HPGS 的天然气、输入 HPGS 的柴油、输入 HPGS 的太阳辐射、由 NGS 输入 HPGS 的天然气、输入 PES 的电、由 HPGS 直接向 POS 输出的电、由 HPGS 直接向 POS 输出的热能、输入 BVMS 的电、由 BVMS 捕捉的 CO_2 、输入 BVMS 的热能、由 PES 向 POS 输出的电、由 BVMS 输出的 CO_2 。

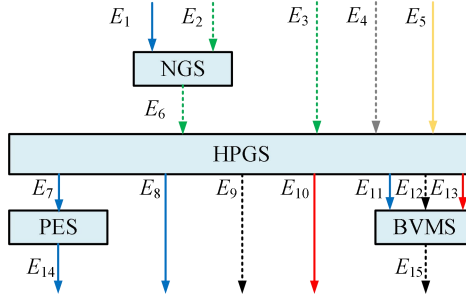


图 B1 ESS 的物质与能量流动关系

Fig.B1 Relationship between matter and energy flow of ESS

$$W_{\text{ESS}} = \begin{bmatrix} 1 & -k_{\text{ngs}}^{\text{E}} & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{ngs}}^{\text{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{\text{ngs},\text{in}} & 0 & 0 & 0 & -1/\eta_{\text{ngs},\text{out}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{gcu}}^{\text{E}} L_{\text{HVg}} & \eta_{\text{dcu}}^{\text{E}} L_{\text{HVd}} & \eta_{\text{pv}} & \eta_{\text{gcu}}^{\text{E}} L_{\text{HVg}} & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{\text{gcu}} & \gamma_{\text{dcu}} & 0 & \gamma_{\text{gcu}} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{gcu}}^{\text{H}} L_{\text{HVg}} & \eta_{\text{dcu}}^{\text{H}} L_{\text{HVg}} & 0 & \eta_{\text{gcu}}^{\text{H}} L_{\text{HVg}} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\text{bvms}}^{\text{E}} & \eta_{\text{bvms}} \alpha_{\text{bvms}} & k_{\text{bvms}}^{\text{H}} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{pes},\text{ch}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\eta_{\text{pes},\text{dch}} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{B1})$$

式中： $k_{\text{ngs}}^{\text{E}}$ 为 NGS 的耗电系数； $\eta_{\text{ngs},\text{in}}$ 、 $\eta_{\text{ngs},\text{out}}$ 分别为 NGS 的储气、释气效率； $\eta_{\text{gcu}}^{\text{E}}$ 、 $\eta_{\text{dcu}}^{\text{E}}$ 分别为由天然气、柴油转换为电能的效率； $\eta_{\text{gcu}}^{\text{H}}$ 、 $\eta_{\text{dcu}}^{\text{H}}$ 分别为由天然气、柴油转换为热能的效率； γ_{gcu} 、 γ_{dcu} 分别为天然气、柴油产生 CO_2 的物质转换系数； η_{pv} 为光伏的发电效率； $\eta_{\text{pes},\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{pes},\text{dch}}$ 分别为 PES 的充电、放电效率； L_{HVg} 、 L_{HVd} 分别为天然气和柴油的低位热值； α_{bvms} 、 η_{bvms} 分别为 BVMS 的 CO_2 捕捉系数和 CO_2 减排系数； $k_{\text{bvms}}^{\text{E}}$ 、 $k_{\text{bvms}}^{\text{H}}$ 分别为 BVMS 的耗电系数和耗热系数。

$$\mathbf{E}_{\text{ESS}} = [E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4 \ E_5 \ E_6 \ E_7 \ E_8 \ E_9 \ E_{10} \ E_{11} \ E_{12} \ E_{13} \ E_{14} \ E_{15} \ \Delta G \ \Delta E]^T \quad (\text{B2})$$

式中： ΔG 为 NGS 的伴生气增量； ΔE 为 PES 的电能量增量。

POS 的能量与物质流动关系如附录 B 图 B2 所示，图中 P_1 — P_{18} 分别为输入 OGMS 的电、输入 OGMS 的线性聚合物、输入 OGPS 的电、输入 OGPS 的热能、输入 EHS 的电、输入 WIS 的电、输入 LBS 的新水、输入 LBS 的电、输入 LBS 的热能、由 OGMS 向 OGPS 输出的混合原液、由 OGMS 向 OGPS 输出的混合伴生气、由 EHS 向 OGPS 输出的电、由 OGPS 供给 ESS 消耗的天然气、由 OGPS 向终端外输的天然气、由 OGPS 向终端外输的石油、由 OGPS 向 WIS 输入的注水液、由 WIS 产生的废水、由 LBS 产生的废水。

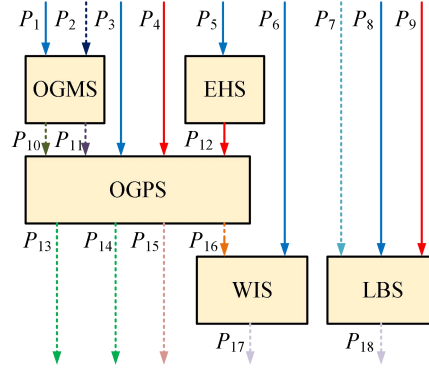


图 B2 POS 的物质与能量流动关系

Fig.B2 Relationship between matter and energy flow of POS

$$W_{\text{POS}} = \begin{bmatrix} 1-\rho_{\text{ogms}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\rho_{\text{ogps}} & 1-\rho_{\text{ogps}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\rho_{\text{chs}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\rho_{\text{wis}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\rho_{\text{lbs}} & 1-\rho_{\text{lbs}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{B3})$$

式中: ρ_{ogms} 、 ρ_{ogps} 、 ρ_{chs} 、 ρ_{wis} 、 ρ_{lbs} 分别为 OGMS、OGPS、EHS、WIS 和 LBS 的能量损失率。

$$S_{\text{POS}} = \begin{bmatrix} 0 & \eta_{\text{ogms}}^{\text{mss}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{\text{ogms}}^{\text{mag}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{ogps}}^{\text{oil}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{ogps}}^{\text{wi}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{ogps}}^{\text{gas}} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{wis}}^{\text{pw}} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{lbs}}^{\text{pw}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B4})$$

式中: $\eta_{\text{ogms}}^{\text{mss}}$ 、 $\eta_{\text{ogms}}^{\text{mag}}$ 、 $\eta_{\text{ogps}}^{\text{gas}}$ 、 $\eta_{\text{ogps}}^{\text{oil}}$ 、 $\eta_{\text{ogps}}^{\text{wi}}$ 、 $\eta_{\text{wis}}^{\text{pw}}$ 、 $\eta_{\text{lbs}}^{\text{pw}}$ 分别为 OGMS、OGPS、WIS 和 LBS 的物质转换系数。

$$E_{\text{POS}} = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10} \ P_{11} \ P_{12} \ P_{13} \ P_{14} \ P_{15} \ P_{16} \ P_{17} \ P_{18} \ \Delta E_1 \ \Delta E_2 \ \Delta E_3 \ \Delta E_4 \ \Delta E_5]^T \quad (\text{B5})$$

式中: ΔE_1 、 ΔE_2 、 ΔE_3 、 ΔE_4 、 ΔE_5 分别为 OGMS、OGPS、EHS、WIS 和 LBS 的能量增量。

附录 C

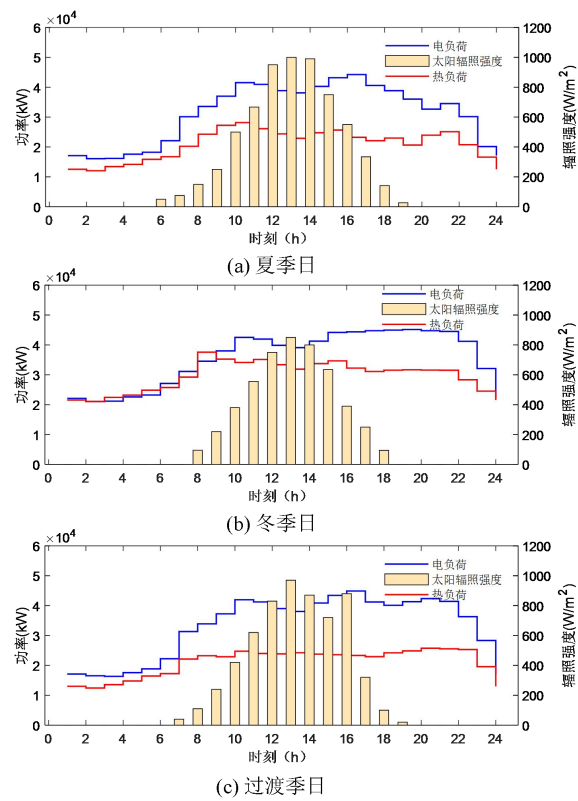


图 C1 各季节典型日负荷曲线

Fig.C1 Typical daily load curve for each season

表 C1 POS 各个单元的耗能特性

Table C1 Energy consumption characteristics of each unit of POS

单元	耗电比例系数			耗热比例系数			物质转换效率
	夏季	冬季	过渡季	夏季	冬季	过渡季	
OGMS	0.2826	0.2276	0.2644	-	-	-	2.65/0.054
EHS	0.0535	0.1408	0.1029	-	-	-	-
OGPS	0.4016	0.4719	0.4171	0.7385	0.8102	0.7663	0.54/0.91/0.4
WIS	0.2088	0.1002	0.1598	-	-	-	0.062
LBS	0.0535	0.0595	0.0558	0.2615	0.1898	0.2337	0.16

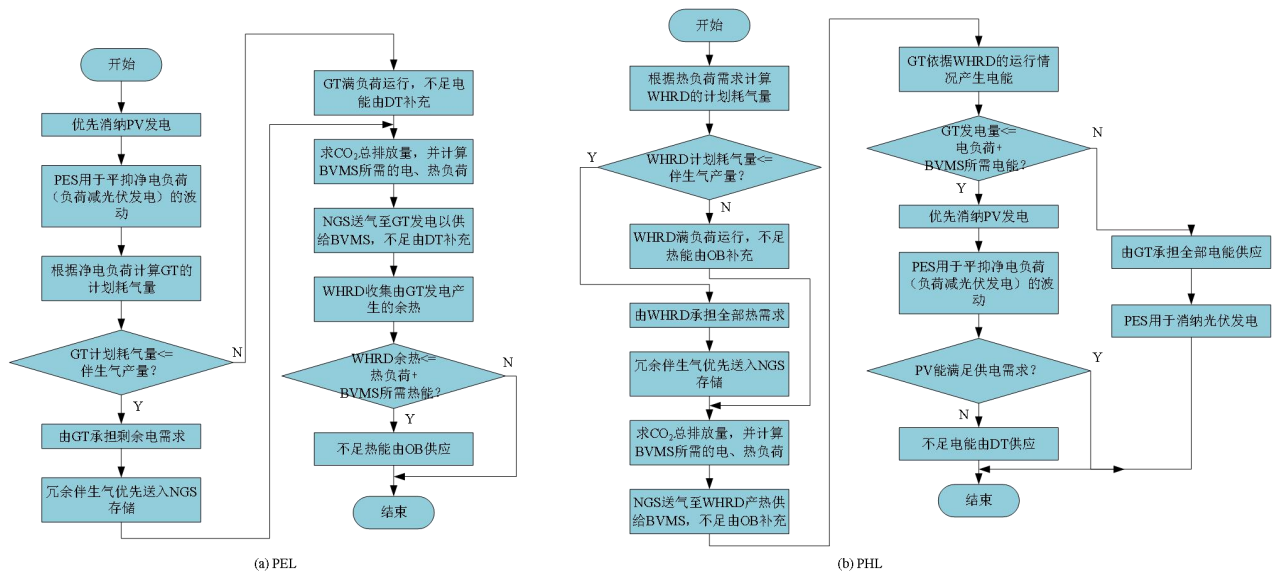


图 C2 方案 1 和方案 2 的运行流程图
Fig.C2 Operation mode flow chart of scheme 1 and 2

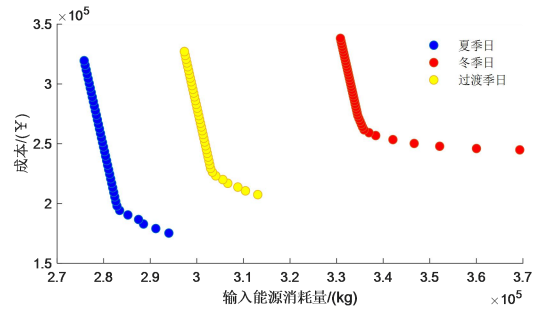


图 C3 不同季节典型日下运行方案 3 的 Pareto 前沿
Fig.C3 Pareto frontier of typical day operation scheme 3 in different seasons

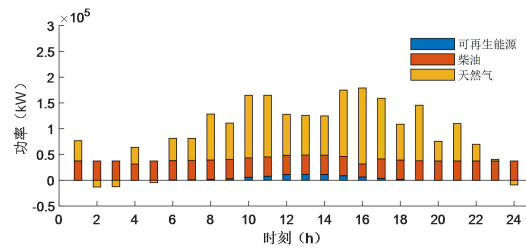


图 C4 夏季典型日下运行方案 3 的输入能源情况
Fig.C4 Input energy situation of operation scheme 3 in typical summer day

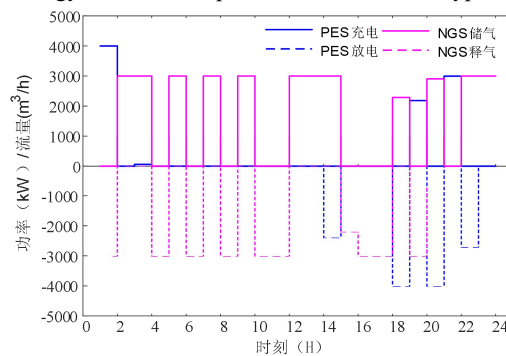
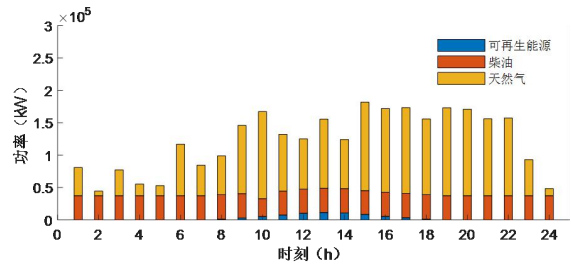
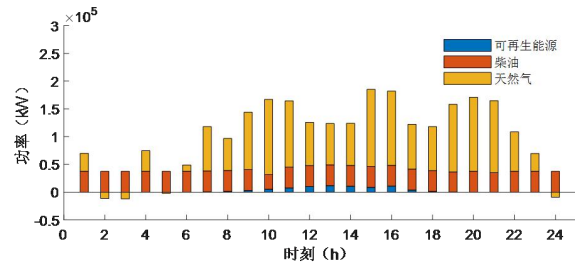


图 C5 夏季典型日下运行方案 3 的储能设备动作情况
Fig.C5 Actions of energy storage equipment of operation scheme 3 in summer typical day

附录 D



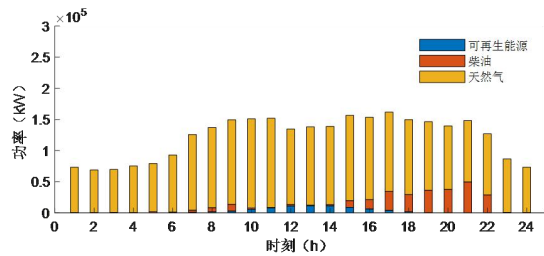
(a) 冬季日方案3



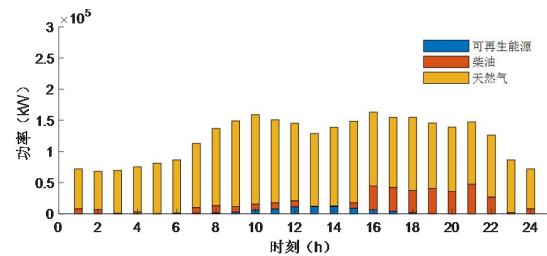
(b) 过渡季日方案3

图 D1 冬季和过渡季典型日下方案 3 的输入能源情况

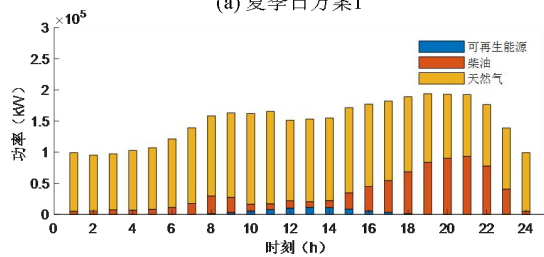
Fig.D1 Input energy situation of operation scheme 3 in typical winter and transition season day



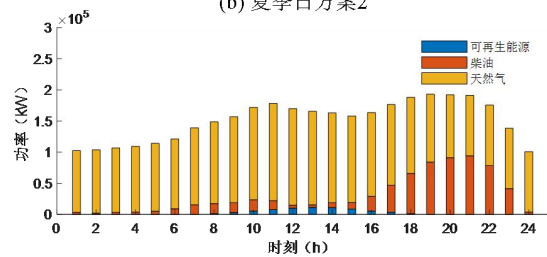
(a) 夏季日方案1



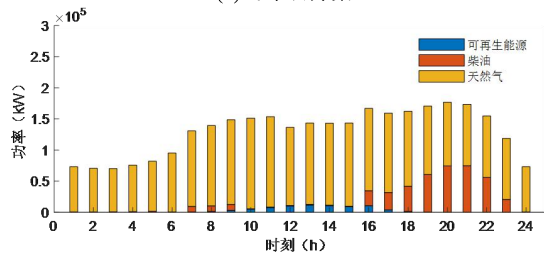
(b) 夏季日方案2



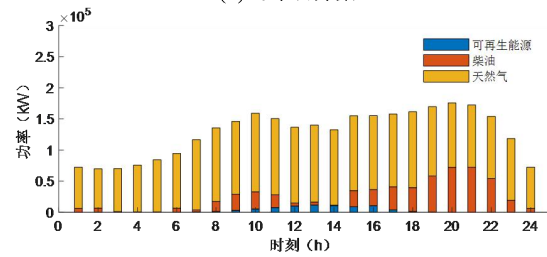
(c) 冬季日方案1



(d) 冬季日方案2



(e) 过渡季日方案1



(f) 过渡季日方案2

图 D2 各季节典型日传统运行模式下的输入能源情况

Fig.D2 Input energy situation of the typical day in each season under traditional operation mode

表 D1 能效指标计算参数

Table D1 Calculation parameters of energy efficiency index

能效指标	参数	数值
PEC	$\alpha_g / (\text{kgce} \cdot \text{m}^{-3})$	1.21
	$\alpha_d / (\text{kgce} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.45
	$\alpha_r / (\text{kgce} \cdot \text{W}^{-1})$	0
PEUR	$L_{\text{HVC}} / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	29308
PESR	η_e	0.3
	η_h	0.7
EXEC	$C_c / (\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.3
	$C_g / (\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0
	$C_d / (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.15
	$C_r / (\text{元} \cdot \text{W}^{-1})$	0

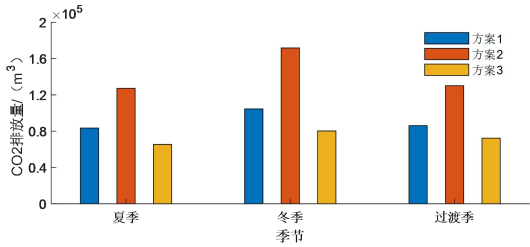


图 D3 不同运行方案的 CO₂ 排放量对比

Fig.D3 Comparison of CO₂ emissions of different operation schemes