

促进海岛可再生能源消纳的混合储能配置优化策略

刘会家, 王磊, 尹成凯, 叶晟, 张灿

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着海岛开发受到日益关注, 海岛综合能源系统中可再生能源的消纳与整合问题显得尤为突出。针对这一挑战, 在现有海岛综合能源系统架构的基础上引入具备热电联供特性的液态空气储能技术, 以促进海岛可再生能源的消纳。建立了包含混合储能配置优化的多目标数学模型, 并采用法向量约束法进行求解。该模型旨在提升海岛综合能源系统对可再生能源的消纳能力, 同时推动系统运行更加经济化和低碳化。算例仿真结果表明: 所提出的基于混合储能技术的海岛综合能源系统模型不仅显著提升了系统运行的经济效益和环保效益, 而且在促进可再生能源消纳方面取得了显著进展, 有效验证了该模型的实用性和有效性。

关键词: 可再生能源; 混合储能; 海岛综合能源系统; 储能配置优化; 液态空气储能

Hybrid Energy Storage Configuration Optimization Strategy for Promoting Renewable Energy Consumption on Islands

LIU Huijia, WANG Lei, YIN Chengkai, YE Sheng, ZHANG Can

(College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: With the increasing attention on island development, the issue of renewable energy consumption and integration in island integrated energy systems has become particularly prominent. To address this challenge, liquid air energy storage technology with combined heat and power characteristics is introduced into the existing island integrated energy system framework to promote the accommodation of renewable energy. A multi-objective mathematical model incorporating hybrid energy storage configuration optimization is established and solved using the normal vector constraint method. The model aims to enhance the renewable energy accommodation capacity of the island integrated energy system while improving its economic and low-carbon operation. Case study simulation results demonstrate that the proposed hybrid energy storage-based island integrated energy system model not only significantly improves economic and environmental benefits but also achieves remarkable progress in promoting renewable energy accommodation, effectively verifying the model's practicality and effectiveness.

Key words: renewable energy; hybrid energy storage; island integrated energy system; energy storage configuration optimization model; liquid air energy storage

0 引言

近年来, 全球各国对海岛及其资源的开发日益重视^[1-2]。在此背景下, 保障海岛的能源供应成为开发海岛的关键议题。从当前科学技术水平来看, 海岛能源供应技术主要依托两种路径: 一是与大陆

电网相连的并网型供能系统, 二是独立运行的离网型供能系统。并网型海岛供能系统通过海底电缆与大陆电网连接供电, 然而, 这种方式易受地理环境和水文气象等条件制约, 成本高昂且故障处理复杂^[3]。因此, 许多海岛供能系统逐渐转向离网型能源系统, 利用岛上丰富的高密度可再生能源(renewable energy, RE)优势实现能源自给自足^[4-5]。

尽管如此, 可再生能源固有的间歇性特性对海

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277108)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52277108).

岛供能系统的稳定性构成了显著挑战^[6-7]。为应对这一难题, 国内外学者纷纷引入储能技术, 旨在提升系统的稳定性并促进可再生能源的有效消纳。文献[8-9]证实了利用抽水蓄能电站抑制可再生能源波动的可行性。文献[10-11]则通过蓄电池与超级电容的组合, 提高了可再生能源的消纳率, 并借助深度Q网络和离散小波变换法求解了混合储能配置的优化模型。文献[12]基于储能船舶技术实现对可再生能源发电的互补, 从而灵活消纳多种形态的海岛可再生能源。上述研究均突显了储能系统合理配置的重要性, 特别是在应对可再生能源波动方面。然而, 大多数研究主要集中于常规电储系统, 其能源转化形式较为单一, 而海岛对热能和电能的需求往往是多维度的^[13]。因此, 探索一种新型储能技术, 以契合海岛综合能源系统的多样化供能特性, 对于提升海岛供能系统的运行效益具有深远意义。

液态空气储能 (liquid air energy storage, LAES) 技术因其低污染、高储能密度和不受地域限制等显著特点在综合能源系统中具有巨大应用潜力^[14-16]。该技术不仅能够有效减少碳排放量, 还能在能源耦合利用方面发挥关键作用。相关研究表明液态空气储能的压缩热能可用于供暖^[17], 从而提升供能系统的经济效益和能源利用率。此外, 利用其热电联供的特性, 液态空气储能能够与可再生能源紧密结合, 在高效消纳可再生能源的同时为系统供能开辟新途径, 进而推动海岛综合能源系统实现更进一步的低碳化和经济化。

综上所述, 本文在包含常规电储能的海岛综合能源系统基础架构上引入具备热电联供特性的液态空气储能技术, 旨在以促进海岛可再生能源消纳为核心目标, 构建混合储能配置优化模型。该模型致力于提升海岛综合能源系统对可再生能源的消纳能力, 并推动系统向低碳经济模式转型, 为我国海岛供能系统的发展提供有力的理论支撑。

1 海岛综合能源系统的组成与架构

1.1 海岛综合能源系统架构

本文构建了一种基于混合储能技术的海岛综合能源系统, 该系统由RE发电调节单元、常规供能单元和综合用能单元共同组成。系统的供能端设备可分为两类: 一类包括热电联产机组 (combined heat and power, CHP)、电制热机组 (electric heat-

ers, EH) 以及储能模块等可调节出力的供能设备; 另一类则是含有不稳定发电因素的可再生能源模块。鉴于海岛生态的能源特性, 本文引入了风力发电模块和海水潮汐发电模块, 共同构成系统的RE发电单元。基于混合储能技术的海岛综合能源系统结构如图1所示。

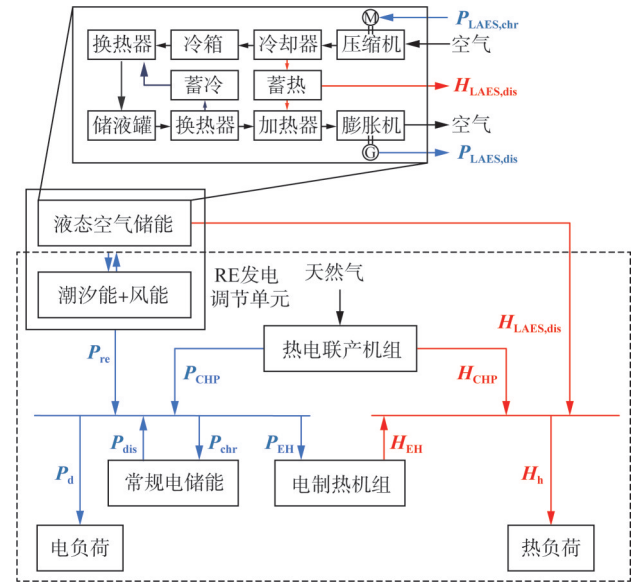


图1 海岛综合能源系统

Fig. 1 Integrated island energy system

1.2 海岛综合能源系统的组成

1.2.1 风力发电

$$P'_{WT} = \begin{cases} 0, & v' < v_i, v' > v_o \\ \hat{P}_{WT} \frac{v' - v_i}{v_{WT} - v_i}, & v_i \leq v' \leq v_{WT} \\ \hat{P}_{WT}, & v_{WT} < v' < v_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: P'_{WT} 为 t 时刻风力发电功率; $\hat{P}_{WT}$ 为风力发电机组额定发电功率; v' 为 t 时刻风速; v_i 、 v_o 和 v_{WT} 分别为切入风速、切出风速和额定风速。

1.2.2 潮汐能发电模型

$$P'_{CV} = \begin{cases} 0, & 0 \leq V' < V_i \\ \frac{\xi_{cv} \rho_{sea} S_{CV} (V')^3}{2000}, & V_i \leq V' < V_{CV} \\ \hat{P}_{CV}, & V_{CV} \leq V' \end{cases} \quad (2)$$

式中: P'_{CV} 为 t 时刻潮汐能发电功率; $\hat{P}_{CV}$ 为潮汐能额定发电功率; V' 为 t 时刻潮流速; V_i 和 V_{CV} 分别为机组切入速度和额定速度; ξ_{cv} 为潮汐能捕获系数; ρ_{sea} 为海水密度; S_{CV} 为机组叶片横截面积。

1.2.3 热电联产机组

热电联产机组是一种高效的能源供应设备，在综合能源系统框架下，CHP主要由燃气轮机和余热回收装置组成，其工作方式可表示为：

$$P'_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP,e}} H_g Q'_{\text{CHP}} / \Delta t \quad (3)$$

$$H'_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP,h}} H_g Q'_{\text{CHP}} / \Delta t \quad (4)$$

$$m'_{\text{CHP}} = \sigma_{\text{gas}} Q'_{\text{CHP}} \quad (5)$$

式中： P'_{CHP} 和 H'_{CHP} 分别为 t 时刻CHP机组的发电功率和供热功率； $\eta_{\text{CHP,e}}$ 和 $\eta_{\text{CHP,h}}$ 分别为CHP机组的发电效率和供热效率； Q'_{CHP} 为 t 时刻CHP机组所消耗的天然气量； m'_{CHP} 为 t 时刻CHP机组所产生的 CO_2 量； H_g 为天然气热值； σ_{gas} 为天然气碳化系数； Δt 为时间间隔。

1.2.4 电制热机组

$$H'_{\text{EH}} = \eta_{\text{EH}} P'_{\text{EH}} \quad (6)$$

式中： P'_{EH} 和 H'_{EH} 分别为 t 时刻电制热机组的耗电功率和供热功率； η_{EH} 为电制热机组的供热效率。

1.2.5 常规电储能

$$E'_{\text{ESS}} = E'_{\text{ESS}}^{-1} + (\eta_{\text{chr}} P'_{\text{chr}} - P'_{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}}) \Delta t \quad (7)$$

$$\sum_i^T (\eta_{\text{chr}} P'_{\text{chr}} - P'_{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}}) = 0 \quad (8)$$

式中： E'_{ESS} 为 t 时刻电储能容量； P'_{chr} 和 P'_{dis} 分别为 t 时刻电储能的充、放电功率； η_{chr} 和 η_{dis} 分别为电储能的充、放电效率； T 为系统运行周期。

1.2.6 液态空气储能

LAES是一种利用空气作为介质的清洁低碳储能技术，其工作原理如图2所示，分为两个过程：储能过程和释能过程，具体如下。

1) 储能过程：空气首先通过多级压缩机和冷却器的组合进行级间冷却，随后进入冷箱。在此过程中，用于冷却高温空气的低温循环水经过换热后升温，并储存于蓄热水罐中。在冷箱内，通过专用冷媒剂的间接换热方式，空气持续降温。接着，高压低温的空气流在蓄冷换热器中由来自蓄冷填充床的换热流体进一步冷却，再经液力透平的热膨胀作用转化为液态空气，最终储存于液态空气储液罐中。

2) 释能过程：首先，液态空气经低温泵加压，送至蓄热换热器中加热升温。在此过程中，空气中的冷能被蓄冷填充床中的换热流体带走。随后，蓄热水罐中的热水送至级间加热器，对低温空气进行加热，加热后的高温高压空气进入膨胀机组。最

终，经膨胀机发电做功后，空气排放至大气，完成释能过程。

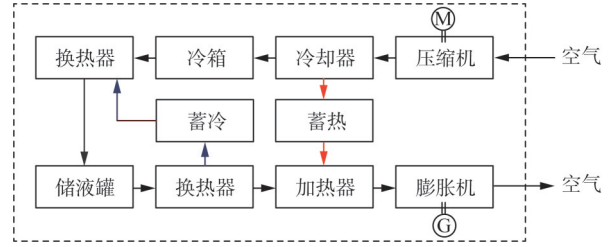


图2 液态空气储能的工作原理

Fig. 2 Principles of operation for LAES

本文忽略了LAES在变工况运行下各个设备温度、压力等参数变化产生的影响，则LAES的工作方式为：

$$P'_{\text{tur,dis}} = 1000 \sum_1^{n_{\text{tur}}} \frac{\gamma \left(1 - \beta_{\text{tur}}^{\frac{1}{\gamma}-1} \right) R_{\text{kg}} T_{\text{tur,in}} \eta_{\text{tur}} Q'_{\text{tur,in}}}{\gamma - 1} \quad (9)$$

$$P'_{\text{com,chr}} = 1000 \sum_1^{n_{\text{com}}} \frac{\gamma \left(\beta_{\text{com}}^{\frac{1}{\gamma}-1} - 1 \right) R_{\text{kg}} T_{\text{com,in}} Q'_{\text{com,in}}}{(\gamma - 1) \eta_{\text{com}}} \quad (10)$$

$$Q'_{\text{LAES}} = Q'^{-1}_{\text{LAES}} + 3.6 (Q'_{\text{com,in}} - Q'_{\text{tur,in}}) \Delta t \quad (11)$$

$$Q'^0_{\text{LAES}} = Q'^T_{\text{LAES}} \quad (12)$$

$$H'_{\text{LAES,dis}} = \lambda_0 \eta_{\text{he}} P'_{\text{com,chr}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{tur/com}} = \eta_{\text{tur/com,ise}} \eta_{\text{tur/com,mec}} \quad (14)$$

式中： $P'_{\text{tur,dis}}$ 和 $P'_{\text{tur,dis}}$ 分别为 t 时刻膨胀机和压缩机的发电功率； Q'_{LAES} 为 t 时刻LAES储液罐储液量； $Q'_{\text{tur,in}}$ 和 $Q'_{\text{com,in}}$ 分别为 t 时刻膨胀机和压缩机的空气质量指数； $H'_{\text{LAES,dis}}$ 为 t 时刻LAES对外输出热功率； n_{tur} 和 n_{com} 分别为膨胀机和压缩机的级数； β_{tur} 和 β_{com} 分别为膨胀比和压缩比； $T_{\text{tur,in}}$ 和 $T_{\text{com,in}}$ 分别为膨胀机和压缩机的入口空气温度； $\eta_{\text{tur,ise}}$ 和 $\eta_{\text{com,ise}}$ 分别为膨胀机和压缩机的等熵效率； $\eta_{\text{tur,mec}}$ 和 $\eta_{\text{com,mec}}$ 分别为膨胀机和压缩机的机械效率； γ 为空气绝热常数； R_{kg} 为普适气体常量； λ_0 为LAES对外输出热比例系数； η_{he} 为蓄热换热器换热效率。

1.2.7 可再生能源发电调节单元

由于海岛能源分布的独特性，海岛综合能源系统中可再生能源的出力占比必然较高。因此，针对可再生能源出力的随机性对能源系统造成的影响，本文引入液态空气储能技术，并构建RE发电调节单元。该单元与系统原有的常规电储能共同组成混合储能模块，旨在实现各储能系统的协同运作，以

稳定可再生能源出力,并促进系统的低碳经济生产。RE发电调节单元的工作方式为:

$$P_{re}^t = P_{WT}^t + P_{CV}^t + P_{tur,dis}^t - P_{com,chr}^t \quad (15)$$

$$P_{re}^t \leq \max(P_{WT}) + \max(P_{CV}) \quad (16)$$

式中 P_{re}^t 为 t 时刻 RE 发电调节单元发电功率。

2 混合储能配置优化

本文的主要目标是构建以 LAES 为核心的混合储能模块,旨在提高可再生能源的消纳与整合能力,并促进海岛综合能源系统向低碳经济模式转型。为此,本文将构建混合储能配置优化模型,通过科学合理的储能配置以优化海岛综合能源系统的运行效益。

2.1 目标函数

在确保满足系统能源需求的基础上,本文以经济效益、环保效益和消纳效益为优化目标,进行混合储能配置的优化。该模型的目标函数^[19]为:

$$Z_1 = C_{inv} + C_{om} + C_{gas} \quad (17)$$

$$Z_2 = \sum_t \frac{|P_{re}^t - P_{re}^{t-1}|}{\max(P_{CV} + P_{WT})} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} C_{inv} &= C_{LAES,inv} + C_{ESS,inv} \\ &= 35\,746.20R_y(P_{com,chr}^{\max})^{0.6} + \\ &\quad 10\,223.78R_y(P_{tur,dis}^{\max})^{0.6} + \\ &\quad 844.23R_y(Q_{LAES}^{\max})^{0.6} + R_{ESS,inv}R_yE_{ESS}^{\max} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} C_{om} &= C_{LAES,om} + C_{ESS,om} + C_{CHP,om} + C_{EH,om} \\ &= \partial C_{LAES,inv} + \sum_t R_{ESS,om}(P_{dis}^t + P_{chr}^t) + \\ &\quad \sum_t R_{CHP,om}P_{CHP}^t + \sum_t R_{EH,om}H_{EH}^t \end{aligned} \quad (20)$$

$$C_{gas} = (R_{co_2} + R_{gas}) \sum_t Q_{CHP}^t \quad (21)$$

$$R_y = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (22)$$

式中: Z_1 和 Z_2 均为目标函数; C_{inv} 、 $C_{LAES,inv}$ 和 $C_{ESS,inv}$ 分别为混合储能、LAES 和常规电储能的投资成本; C_{om} 、 $C_{LAES,om}$ 、 $C_{ESS,om}$ 、 $C_{CHP,om}$ 和 $C_{EH,om}$ 分别为系统设备、LAES、电储能、CHP 机组、EH 机组维护成本; C_{gas} 为天然气成本; $P_{tur,dis}^{\max}$ 和 $P_{com,chr}^{\max}$ 分别为膨胀机和压缩机的配置功率; $Q_{LAES}^{\max}$ 和 $E_{ESS}^{\max}$ 分别为 LAES 储液罐和常规电储能的配置容量; R_y 为设备等值投资成本回收系数; r 为贴现率; y 为储能设

备寿命; ∂ 为 LAES 维护费率; $R_{EES,inv}$ 和 $R_{EES,om}$ 分别为常规电储能的单位投资成本和单位维护成本; $R_{CHP,om}$ 和 $R_{EH,om}$ 分别为 CHP、EH 机组的单位维护成本; R_{co_2} 为处理单位 CO_2 所需的费用; R_{gas} 为单位天然气的购买成本。

显然,本文提出的混合储能配置优化模型属于多目标优化范畴。该模型涵盖两个核心目标函数:其一,以系统经济成本和环境成本最小化为导向,引领模型朝着低碳经济方向进行优化;其二,旨在抑制可再生能源功率波动,从而提升能源系统的稳定性及可再生能源的消纳能力。

2.2 约束条件

2.2.1 能源供需平衡约束

$$P_{re}^t + P_{CHP}^t - P_{EH}^t = P_d^t \quad (23)$$

$$H_{LAES,dis}^t + H_{CHP}^t + H_{EH}^t = H_h^t \quad (24)$$

式中 P_d^t 和 H_h^t 分别为 t 时刻系统电、热负荷。

2.2.2 供能设备出力约束

$$P_{CHP}^{\min} \leq P_{CHP}^t \leq P_{CHP}^{\max} \quad (25)$$

$$H_{EH}^{\min} \leq H_{EH}^t \leq H_{EH}^{\max} \quad (26)$$

$$E_{ESS}^{\min} \leq E_{ESS}^t \leq E_{ESS}^{\max} \quad (27)$$

$$U_{chr}^t P_{chr}^{\min} \leq P_{chr}^t \leq U_{chr}^t P_{chr}^{\max} \quad (28)$$

$$U_{dis}^t P_{dis}^{\min} \leq P_{dis}^t \leq U_{dis}^t P_{dis}^{\max} \quad (29)$$

$$U_{chr}^t + U_{dis}^t \leq 1 \quad (30)$$

$$Q_{LAES}^{\min} \leq Q_{LAES}^t \leq Q_{LAES}^{\max} \quad (31)$$

$$U_{tur,dis}^t P_{tur,dis}^{\min} \leq P_{tur,dis}^t \leq U_{tur,dis}^t P_{tur,dis}^{\max} \quad (32)$$

$$U_{com,chr}^t P_{com,chr}^{\min} \leq P_{com,chr}^t \leq U_{com,chr}^t P_{com,chr}^{\max} \quad (33)$$

$$U_{com,chr}^t + U_{tur,dis}^t \leq 1 \quad (34)$$

式中: $P_{CHP}^{\max}$ 、 $P_{CHP}^{\min}$ 、 $H_{EH}^{\max}$ 和 $H_{EH}^{\min}$ 分别为 CHP 机组、EH 机组的供能功率上下限; $P_{chr}^{\min}$ 、 $P_{chr}^{\max}$ 、 $P_{dis}^{\min}$ 和 $P_{dis}^{\max}$ 分别为常规电储能的充放电功率上下限; $P_{com,chr}^{\max}$ 、 $P_{com,chr}^{\min}$ 、 $P_{tur,dis}^{\max}$ 和 $P_{tur,dis}^{\min}$ 分别为压缩机、膨胀机的充电、放电功率上下限; $E_{ESS}^{\min}$ 和 $Q_{LAES}^{\min}$ 分别为常规电储能、LAES 储液罐的最小配置容量; U_{chr}^t 和 U_{dis}^t 分别为 t 时刻常规电储能的充放电状态变量; $U_{com,chr}^t$ 和 $U_{tur,dis}^t$ 分别为 t 时刻压缩机和膨胀机的状态变量。

2.3 模型求解与结果评价

本文采用法向量约束法来求解该多目标优化模型。传统的启发式算法在求解过程中常面临易陷入局部最优解以及难以确保复杂模型求解效率的困境。法向量约束法通过将除主目标函数之外的其他目标函数转化为约束条件来进行求解,这一方法不

仅操作更为简便, 还具有较高的求解效率^[20]。

针对所求配置方案, 本文确定了 4 个评价指标: 投资成本、运行成本、碳排放量以及可再生能源功率波动抑制率。其中, 运行成本涵盖了燃料成本和机组维护成本。

3 案例分析

3.1 基础数据与案例设置

本文选取南海某岛屿作为研究对象, 基于该岛内某旅游园区电热负荷数据, 对提出的基于混合储能配置优化模型的海岛综合能源系统进行仿真实验。为简化计算过程, 参考该岛的历史风速特征研究^[21]、园区历史负荷数据, 以及国家海洋科学数据中心官方资料等相关研究数据^[22], 并通过聚类分析方法筛选出不同季节的典型日场景及其数据, 从而获取海岛风速、潮汐流速、园区电热负荷等数据, 如图 3—4 所示。该海岛综合能源系统的相关运行参数^[23-26]详见表 1。

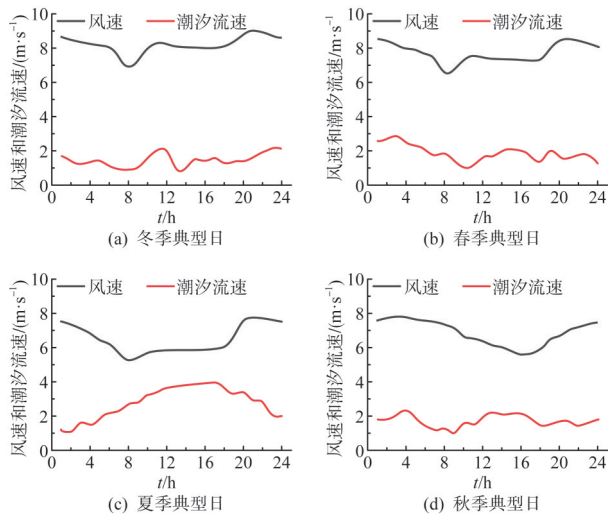


图 3 海岛风速和潮汐流速

Fig. 3 Wind speeds and tidal currents in the islands

案例仿真测试环境基于 MATLAB 调用 YALMIP 工具箱构建优化模型, 以典型日 24 h 为运行周期, 时间尺度设定为 1 h。该模型在同时满足 4 种典型日条件的情况下进行仿真, 并采用 Gurobi 求解器进行求解, 数据处理则由 SPSS AU 进行统计分析。最终, 得到同时满足 4 种典型日要求的储能配置结果, 并在此基础上评估系统运行效益。

另一方面, 本文设计了 4 种海岛能源系统案例进行仿真对比分析, 旨在验证所提模型的有效性。

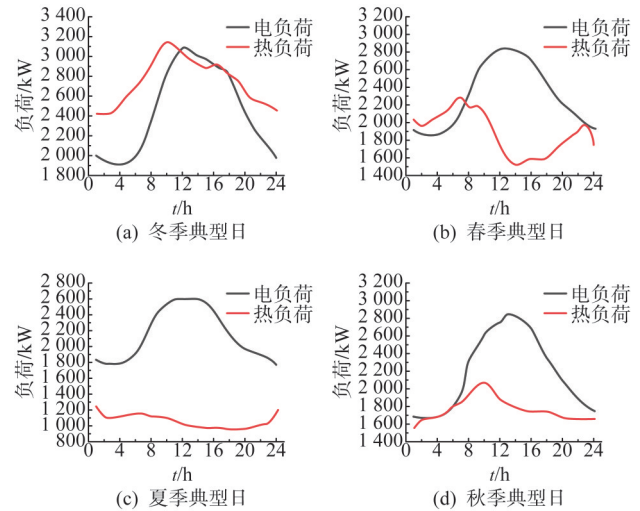


图 4 系统电热负荷

Fig. 4 Electrical and thermal loads of the system

表 1 系统相关运行参数

Tab. 1 Relevant operational parameters of the system

参数	数值
空气绝热常数 γ	1.4
普适气体常量 $R_{kg}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	287.05
膨胀机/压缩机级数 n_{tur}/n_{com}	3/3
第 1/2/3 级膨胀机入口空气温度 $T_{tur, in}/K$	458.1/458.1/458.1
第 1/2/3 级压缩机入口空气温度 $T_{com, in}/K$	293/309/309
膨胀机等熵/机械效率 $\eta_{tur, isc}/\eta_{tur, mec}$	0.87/0.9
压缩机等熵/机械效率 $\eta_{com, isc}/\eta_{com, mec}$	0.87/0.9
膨胀比/压缩比 β_{tur}/β_{com}	4.93/4.48
常规电储能充/放电效率 η_{ch}/η_{dis}	0.95/0.95
CHP 机组供电/供热效率 $\eta_{CHP, e}/\eta_{CHP, h}$	0.3/0.45
EH 机组供热效率 η_{EH}	0.75
天然气热值 $H_g/(Wh \cdot m^{-3})$	9.87
天然气碳化系数 $\sigma_{gas}/(t \cdot m^{-3})$	0.00196
潮汐能发电机组切入/额定速度 $V_c/V_{CV}/(m \cdot s^{-1})$	0.7/2
潮汐能捕获系数 ξ_{CV}	0.45
海水密度 $\rho_{sea}/(kg \cdot m^{-3})$	1025
潮汐能发电机组额定发电功率 $\hat{P}_{CV}/MW$	1.5
切入/切出/额定风速 $v_c/v_o/v_{WT}/(m \cdot s^{-1})$	3/25/11
风力发电机组额定发电功率 $\hat{P}_{CV}/MW$	3
贴现率 r	0.067
储能设备寿命 y/a	30
LAES 维护费率 θ	0.01

具体而言, Case 1 作为基本参照组, 在传统的海岛综合能源系统框架内进行储能优化配置, 其结构如图 1 中虚线框所示; Case 2 在 Case 1 的基础上增设了由常规电储能单元及潮汐能、风能发电单元共同

构成的RE发电调节单元; Case 3则将Case 2中的常规电储能单元替换为液态空气储能单元,并采用向量约束法对所提海岛能源系统框架进行求解; Case 4与Case 3的唯一区别在于采用传统的启发式NSGA-II算法进行求解。这3种案例的储能配置优化模型及其参数均保持一致。

3.2 模型求解与解的筛选

Case 3与Case 4所获得的非支配解分布情况如图5所示。从图5可以看出,Case 3所得到的帕累托解集在模型的实际可行域边界上的分布较为均匀且覆盖范围广泛,这充分体现了含混合储能的海岛综合能源系统中各项运行效益之间的竞争关系,凸显了合理的多目标储能配置优化模型的重要性。相比之下,NSGA-II算法在Case 4中的求解结果显示,Case 4的帕累托解集在目标空间的分布均匀性较差,且包括最优解在内,其整体分布被Case 3所支配。此外,解集内部呈现出高密度聚集现象,存在多个解在目标空间具有高度相似性。这种高密度聚集现象会导致在方案筛选时面临有效候选解不足的问题,尽管这些近似解在目标函数值上的差异较小,但其计算过程却需消耗同量级的计算资源。这种解的质量提升与计算成本投入之间的非线性关系,直接影响了模型的整体求解效率。

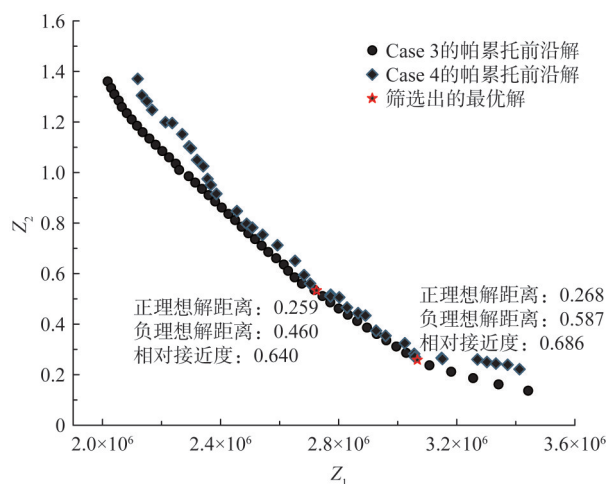


图5 帕累托前沿解集

Fig. 5 Pareto frontier solutions set

随后,基于所求帕累托前沿解集,利用带熵权分析的优劣解距离法^[27]可筛选出Case 3的混合储能最佳配置方案。

3.3 储能配置结果分析

各仿真案例的储能配置结果详见表2。Case 1所代表的常规海岛综合能源系统,采用常规电储能进行供能功率调节,导致其储能模块需承受来自CHP、EH和RE的多重调节压力。以冬季典型日中Case 1和Case 3的系统电平衡状况为例,如图6所示,可以看出Case 3中系统供电设备的出力分布与电负荷趋势高度一致,有效降低了系统电储能的供能调节压力。相比之下,Case 1中系统供电设备的出力分布较为杂乱,系统电储能需实时补充供电设备的供电情况,因而其供能调节幅度显著增大。

表2 各案例的储能配置优化结果

Tab. 2 Results of energy storage configuration optimization for each case

配置对象	Case 1	Case 2	Case 3
压缩机/kW			783.663
膨胀机/kW			880.792
液态空气储罐/t			28.976
RE调节电储能/kW		2 484.584	
系统电储能/kW	2 947.747	309.060	554.123

系统电储能的供能调节幅度越大,其在应对如海岛等高比例可再生能源应用场景时,所需的配置容量也随之增加。因此,如表2所示,在系统电储能配置中,Case 1的容量显著高于Case 2和Case 3的容量总和,甚至超出了Case 2混合储能容量配置的5.52%。

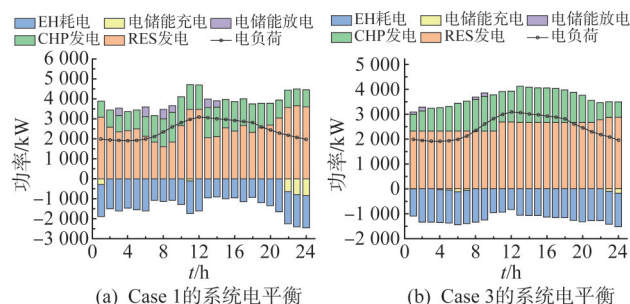


图6 Case 1和Case 3在冬季典型日中的系统电平衡状况

Fig. 6 Electrical balance conditions for Case 1 and Case 3 on a typical winter day

然而,表2中的储能模块配置尚不足以显著区分各案例之间的优劣性,因此,有必要进一步对比各案例的评价指标。从表3的数据可以看出,在经济性方面,大容量配置导致Case 1的投资成本超过了Case 2和Case 3。尽管在日均运行成本上由于

Case 2 的混合储能模块增加了系统维护成本,使得 Case 1 暂时未处于劣势,但相较于 Case 3, Case 1 的单储能模块无法满足整个海岛能源系统的多维度供能需求。而 Case 3 中的 LAES 具备电热联供特性,导致 Case 1 的燃料成本上升,因此在日均运行成本上 Case 1 比 Case 3 高出约 4.60%。这一现象从侧面揭示了仅依赖常规电储能的海岛综合能源系统的局限性,并凸显了构建 RE 发电调节单元及混合储能模块的必要性。

表 3 各案例的系统运行效益结果

Tab. 3 Results of system operational benefits in each case

运行效益	Case 1	Case 2	Case 3
投资成本/元	345 645. 276	327 575. 537	264 544. 813
日均运行成本/元	16 867. 639	17 100. 543	16 125. 376
日均碳排放量/t	11. 388	11. 434	10. 646
RE 最大波动功率/kW	1 399. 325	353. 82	374. 779

3.4 验证 LAES 应用的有效性

从表 3 可以看出, Case 3 在经济成本和减少碳排放两方面均展现出优异的运行表现。相较于 Case 2, Case 3 引入了高储能密度的 LAES 技术,

这不仅有效替代了常规电储能方式,还显著提升了系统投资的经济效益。此外,得益于 LAES 的电热联供特性,该技术能够在消纳可再生能源的同时为系统提供稳定的热能供应,进而降低了燃气轮机的燃料成本。因此,与 Case 2 相比, Case 3 的日均运行成本和日均碳排放量分别下降了 5.70% 和 6.89%,这一数据充分验证了本研究引入 LAES 对促进系统低碳经济运行的积极影响。

3.5 验证 RE 波动功率抑制效果

由表 3 可见, Case 2 和 Case 3 的 RE 最大制动功率分别降至 Case 1 的 25.2% 和 26.7%,均显示出显著的波动功率抑制效果。这一现象源于 Case 2 与 Case 3 均依托储能设备构建了 RE 发电调节单元,从而使得输入系统的 RE 发电功率能够维持较为平稳的输出,如图 7 中两个案例的 RE 发电功率分布情况所示。这不仅有助于提升系统的可再生能源消纳能力,也进一步凸显了构建 RE 发电调节单元的重要性。

值得注意的是,尽管 Case 3 的 RE 最大波动功率较 Case 2 高出 20.96 kW,表现略显不足,但如

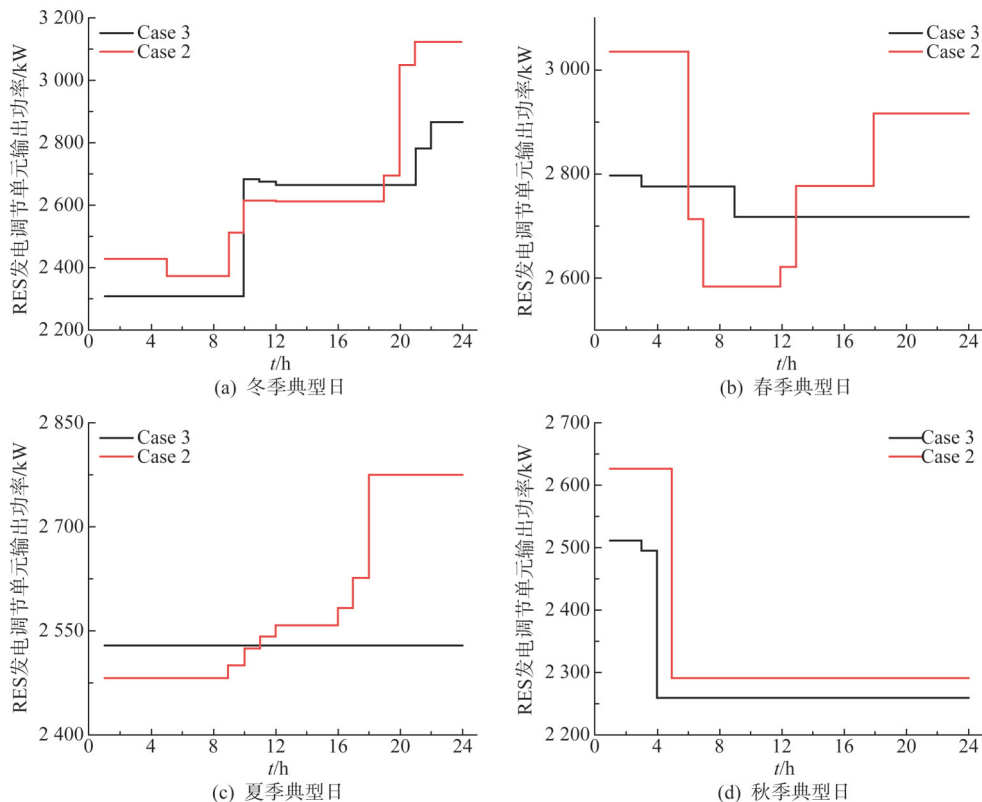


图 7 可再生能源发电调节单元输出功率

Fig. 7 Renewable energy generation regulation unit output

图8所示,通过对比两个案例在RE日均波动次数和制动功率等方面的表现,可以发现Case 3的整体表现仍优于Case 2。这主要归因于Case 3引入了高储能密度的LAES,从而在整体上突显了本研究所提模型在RE制动功率抑制及可再生能源消纳方面的显著能力。

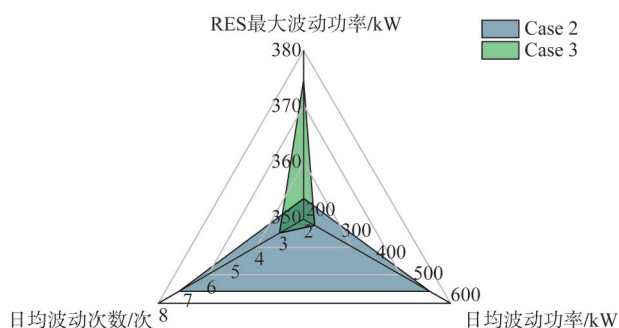


图8 不同案例下的可再生能源波动功率结果

Fig. 8 Fluctuating power results for renewable energy in different cases

4 结论

本研究在常规海岛综合能源系统运行结构的基础上,引入了具备热电联供特性的LAES,实现了直接且高效地消纳可再生能源,同时促进了系统的低碳经济运行。通过算例仿真分析,得出以下结论。

1)引入LAES构建的可再生能源发电调节单元,使海岛综合能源系统能够提供更为稳定的可再生能源输出。与常规海岛综合能源系统相比,该调节单元有效缓解了系统的储能配置压力,降低了投资成本,并显著提升了系统的低碳经济运行效益。

2)LAES的热电联供特性显著提升了系统的低碳经济运行效益。相较于未引入LAES的案例,系统的日均运行成本和碳排放量分别降低了5.70%和6.89%。

3)面对海岛可再生能源发电的不确定性,本研究所提出的海岛能源系统架构显著降低了日均RE波动功率和波动次数,验证了该综合能源系统架构能够合理配置储能,有效提升海岛能源系统对可再生能源的消纳能力。

参考文献

[1] 冬梅,吴涵文,孙锦中,等.计及阶梯式碳交易机制的海岛综合能源优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35

(4): 93-99.

HUANG Dongmei, WU Hanwen, SUN Jinzhong, et al. Optimal scheduling of comprehensive energy in island considering step-by-step carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(4): 93-99.

[2] 邢晓敏,杜钧淇,李贻涛,等.海岛低碳综合能源微网优化方案设计[J].南方电网技术,2023,17(1): 3-13.

XING Xiaomin, DU Junqi, LI Yitao, et al. Optimization scheme design of island low-carbon integrated energy microgrid [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 3-13.

[3] 孙霆锴.海岛综合能源系统韧性评估与提升[D].吉林:东北电力大学,2021.

[4] 吴峰,杨柳燕.孤立运行模式下海岛综合能源系统的能量控制策略[J].电网与清洁能源,2018,34(6): 53-60.

WU Feng, YANG Liuyan. Research on energy control strategy of isolated island integrated energy system [J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 53-60.

[5] 张诚浩.环境友好型海岛多能源系统优化配置[D].沈阳:沈阳工业大学,2022.

[6] 王润治.基于功率预测的电-冷-热-氢-淡水海岛综合能源系统优化调度研究[D].济南:山东大学,2023.

[7] 王润治,王瑞琪,刘继彦,等.基于CNN-Bi-LSTM功率预测的海岛综合能源系统优化调度[J].全球能源互联网,2023,6(1): 88-100.

WANG Runzhi, WANG Ruiqi, LIU Jiyan, et al. Optimal dispatch of the island integrated energy system including power prediction based on CNN-Bi-LSTM [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 88-100.

[8] KATSAPRAKAKIS A D, THOMSEN B, DAKANALI I, et al. Faroe islands: towards 100% R.E.S. penetration [J]. Renewable Energy, 2019(135): 473-484.

[9] 赵波,李得民,吴在军,等.基于100%绿色能源供电目标的海岛微电网容量优化配置[J].中国电机工程学报,2021,41(3): 932-946.

ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-946.

[10] 许巍.基于深度Q网络的孤岛微电网储能优化[D].南昌:南昌大学,2024.

[11] 朱明星,齐先军,朱晟,等.基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能系统容量配置及效果评价[J].南方电网技术,2025,19(2): 80-88.

ZHU Mingxing, QI Xianjun, ZHU Sheng, et al. Capacity allocation and effect evaluation of hybrid energy storage system based on two-stage wind power fluctuation smoothing model [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 80-88.

[12] 随权,魏繁荣,武传涛,等.面向生态友好型远洋海岛群的储电概念船舶及其供能路径优化策略研究[J].中国电机工程学报,2019,39(1): 168-181,331.

SUI Quan, WEI Fanrong, WU Chuantao, et al. Research on electric conceptual vessel and energy supply path optimization strategy for ecology-friendly pelagic clustering islands [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 168-181,331.

[13] 赵为光,凌泽昊,杨莹,等.海岛微能源网系统多能互补优化[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(8): 54-61.

ZHAO Weiguang, LING Zehao, YANG Ying, et al. Multi-

- energy complementarity and optimization for island micro-energy network system [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2020, 32(8): 54 – 61.
- [14] WANG Chen, ZHANG Xiaosong, YOU Zhanping, et al. The effect of air purification on liquid air energy storage – an analysis from molecular to systematic modelling [J]. Applied Energy, 2021(300): 117349.1 – 117349.10.
- [15] FARSHAD K, NAHAL I, EKATERINA D, et al. Capabilities of compressed air energy storage in the economic design of renewable off-grid system to supply electricity and heat costumers and smart charging-based electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2024(78): 109888.1 – 109888.8.
- [16] 游广增, 陈宇, 陈孝元, 等. 考虑短时负荷调峰-长时光伏消纳的液化空气储能系统建模及经济性评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 90 – 100, 118.
YOU Guangzeng, CHEN Yu, CHEN Xiaoyuan, et al. Modeling and economic evaluation of liquid air energy storage system considering short-term load peak shaving and long-term photovoltaic accommodation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 90 – 100, 118.
- [17] 杨名. 太阳能与液化空气储能系统的耦合特性与运行策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [18] 卢昕悦, 陈锐莹, 姜夏雪, 等. 耦合 LNG 冷能的液态空气储能系统和液态 CO₂ 储能系统对比分析[J]. 化工学报, 2024, 75(9): 3297 – 3309.
LU Xinyue, CHEN Ruiying, JIANG Xiaoxue, et al. comparative study on liquid air energy storage system and liquid carbon dioxide energy storage system coupled with liquefied natural gas cold energy [J]. CIESC Journal, 2024, 75(9): 3297 – 3309.
- [19] VECCHI A, NAUGHTON J, LI Yongliang, et al. Multi-mode operation of a liquid air energy storage (LAES) plant providing energy arbitrage and reserve services – Analysis of optimal scheduling and sizing through MILP modelling with integrated thermodynamic performance[J]. Energy, 2020(200): 117500.
- [20] 陈苏豪, 吴越, 曾伟, 等. 基于 NNC 法和 DMC 算法的 CCHP 型微电网两阶段调度[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 171 – 182.
CHEN Suhao, WU Yue, ZENG Wei, et al. Two-stage dispatch of CCHP microgrid based on NNC and DMC [J]. Electric Power, 2024, 57(2): 171 – 182.
- [21] 林苗青, 杜勤博, 翁武坤. 近 40 年南澳县大风特征分析[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 48 – 52.
LING Miaqing, DU Qinbo, WENG Wukun. Characteristics of strong wind in the past 40 years in Nan'ao country, Guangdong province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(4): 48 – 52.
- [22] 寇凌峰, 季宇, 曲雪原, 等. 含海洋能发电的海岛微网源荷容量优化配置研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 135 – 145.
KOU Lingfeng, JI Yu, QU Xueyuan, et al. Research on optimal capacity configuration of source, load and storage for island microgrid containing marine energy generation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 135 – 145.
- [23] 黄思远, 王晨, 梁婷, 等. 液态空气储能耦合综合能源系统热电联储联供优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1929 – 1939.
HUANG Siyuan, WANG Chen, LIANG Ting, et al. Research on optimal configuration for integrated energy system with liquid air energy storage combined heat and power supply [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1929 – 1939.
- [24] 周鹏飞. 考虑流速和低电压穿越的潮汐流能发电系统的建模和仿真[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- [25] 张宇森, 赵春溢, 蒋靖, 等. 双馈风电机组变流器的优化设计与仿真[J]. 大电机技术, 2021(2): 75 – 81.
ZHANG Yusen, ZHAO Chunyi, JIANG Jing, et al. Optimal design and simulation of doubly-fed wind turbine converter [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(2): 75 – 81.
- [26] 左雪. 促进风电消纳的沿海地区综合能源系统优化运行策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [27] 连文翰, 崔双喜, 李宇智, 等. 基于改进 TOPSIS 的区域综合能源系统综合能效评估[J]. 可再生能源, 2024, 42(10): 1355 – 1362.
LIAN Wenhan, CUI Shuangxi, LI Yuzhi, et al. Comprehensive energy efficiency evaluation of regional integrated energy system based on improved TOPSIS [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(10): 1355 – 1362.

收稿日期: 2025-04-08; 网络首发日期: 2025-08-11

作者简介:

刘会家(1969), 男, 副教授, 博士, 研究方向为配电网、无功优化, 874884829@qq.com;

王磊(2002), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为混合储能, 2163170238@qq.com;

尹成凯(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网状态估计。