

基于 CNN-Bi-LSTM 功率预测的海岛综合能源系统优化调度

王润治¹, 王瑞琪², 刘继彦³, 王旭东³, 陈阿莲^{1*}

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东省 济南市 250001;

2. 国网山东综合能源服务有限公司, 山东省 济南市 250001;

3. 国网山东省电力公司, 山东省 济南市 250001)

Optimal Dispatch of the Island Integrated Energy System Including Power Prediction Based on CNN-Bi-LSTM

WANG Runzhi¹, WANG Ruiqi², LIU Jiyan³, WANG Xudong³, CHEN Alian^{1*}

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250001, Shandong Province, China;

2. State Grid Shandong Integrated Energy Service Co., Ltd., Jinan 250001, Shandong Province, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, Shandong Province, China)

Abstract: The rational construction of island integrated energy system is of great significance to the clean transformation of coastal energy, and its optimal dispatch is an effective way to achieve the balance between energy supply and energy demand in islands. Based on this, an optimal dispatch method for island integrated energy system considering wind power prediction is proposed. Firstly, the system model including advanced energy conversion equipment is built, such as hydrogen energy equipment, seawater source heat pump, seawater desalination device, and wave power generation device. Secondly, since marine weather can lead to instability in renewable energy generation, the Convolutional Neural Network-Bi-directional Long Short-Term Memory (CNN-Bi-LSTM) model with an importance rank of environmental variables is applied to predict power generation. Then, to maintain the basic living conditions of islands, taking the electric-cold-fresh water-hydrogen balance as the constraints and taking the improvements of system

operation economy and renewable energy consumption rate as the objective functions, an optimal dispatch model of the integrated energy system is established. The simulation results of two typical days in summer and winter show that the proposed prediction model has high prediction accuracy. The proposed optimization dispatch method can achieve the balance between energy supply and energy demand of the island, effectively reduce the system operating cost, and improve the renewable energy consumption rate.

Keywords: island integrated energy system; wave power generation; wind and photovoltaic power generation prediction; optimal dispatch model; renewable energy consumption rate

摘要: 合理构建海岛综合能源系统对沿海能源清洁化转型意义重大, 其优化调度更是实现海岛能源供需平衡的有效途径。为此, 提出了一种考虑风光功率预测的海岛综合能源系统优化调度方法。首先, 搭建包含氢能设备、海水源热泵、海水淡化装置、波浪能发电装置等新型能源转换设备的系统模型。其次, 海上气候多变会导致新能源发电不稳定, 故采用含环境变量重要性排序的一维卷积神经网络和双向长短时记忆神经网络 (convolutional neural network-bi-directional long short-term memory, CNN-Bi-LSTM) 联合模型对发电功率进行预测。然后, 为维持海岛基本生存条件, 以电-冷-淡水-氢平衡为约束, 以改善系统运行经济性和可再生能源消纳率为目标函数, 建立综合能源系统优化调度模型。对夏冬两个典型日进行仿真分析, 结果表明所提出的预测模型具有较高的预测精度, 所提优化调度方法可以实现海岛能源供需

基金项目: 国家自然科学基金 (海洋可再生能源多能互补智能变换与高效利用基础理论与关键技术, U2006222); 山东省重点研发计划 (基于多能互补的分布式综合能源系统关键控制装备研发及工程示范, 2019JZZY010903); 国家电网有限公司总部管理科技项目 (面向能源转型背景下能源互联网零碳演进关键技术研究, 5100-202116567A-0-5-SF)。

National Natural Science Foundation of China (U2006222); Key Research and Development Program of Shandong Province (2019JZZY010903); Science and Technology Foundation of SGCC (5100-202116567A-0-5-SF).

平衡, 同时能够有效降低系统运行成本, 提高可再生能源消纳率。

关键词: 海岛综合能源系统; 波浪能发电; 风光预测; 优化调度模型; 可再生能源消纳率

0 引言

中国拥有长达1.4万km的岛屿海岸线, 1万多个大小不同的岛屿和海礁。这些区域远离内陆, 无法构建同陆地大电网的交互关系, 发展建设受电能制约^[1]。过去海岛多自备柴油发电机, 通过油电转换提供所需电功率, 但发电机工作不稳定且会排放污染性气体, 同时没有充分利用海上丰富的风能、波浪能、太阳能等可再生能源资源^[2-3]。此外, 考虑到海上气象和水文条件复杂多变, 新能源发电受气象、尾流等因素影响较大^[4], 故建立含可再生能源发电预测的海岛综合能源系统对缓解海岛能源供给问题至关重要。

在可再生能源发电预测方面, 神经网络因其具有极强的非线性映射能力和自学习能力, 应用较为广泛。文献[5]将传统后向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)与相似日选择法相结合, 利用历史输出功率和气象信息, 验证了所提模型的有效性。文献[6]提出了一种考虑多时间尺度的长短时记忆神经网络(long short-term memory neural network, LSTM)预测方法, 通过选取不同时间间隔的数据, 验证预测方法的实用性。但该算法搭建的是时间序列模型, 忽略了风速、光照等环境变量对出力的影响。文献[7]提出了一种基于离散小波变换和LSTM的短期风电预测方法, 可将时间序列的数据分解为多个更容易预测的分量, 并验证了该方法的准确性。文献[8]采用Pearson相关系数法对天气变量进行相关性排序, 并使用卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和LSTM法进行预测, 结果证明该方法可以有效降低预测误差。

但以上文献中所搭建的功率预测模型未充分考虑环境更为复杂的海上功率系统, 因此对数据的预处理不够充分, 导致预测精度有限。预测时使用的算法对数据信息的探索不足, 使得训练效率较低, 预测准确性不够高。

在综合能源系统(integrated energy system, IES)设备建模方面, 已有研究取得了一定的成果。文献[9-10]介绍了IES的概念, 针对典型架构和系统模型进行总结, 并对当前IES的收益评价系统和方法进行整

理。文献[11]引入电转气(power-to-gas, P2G)设备用于消纳风电光伏并充分考虑冷热负荷惯性, 仿真结果表明所提方法能有效提高清洁能源消纳能力并降低综合能源系统运行成本。文献[12]在考虑P2G的基础上, 充分发挥供冷/供热系统的“储能”功能, 验证了其系统的灵活调度优化作用。上述文献为IES运行优化研究提供了设备建模参考, 但这些研究多针对陆上IES, 未考虑环境更为复杂的海岛IES, 且未涉及可实现全清洁供能的氢能装置、能够充分利用海水恒温效果的海水源热泵等新型能源转换设备。文献[13-16]将热泵引入综合能源系统, 通过使用少量电能驱动, 将热能从密度较大地区向密度较小地区转移, 为热电联产IES提供了新的思路。结果表明, 含热泵的IES能有效吸收风光富余出力, 拥有更好的经济性。文献[17-20]引入氢能概念, 在系统中加入电制氢、氢储能和氢氧燃料电池等设备, 进一步改善系统经济性和环保性。文献[21]建立了含燃料电池、电解槽、热能储存装置和新能源汽车的海岛综合能源系统, 算例表明, 含氢能的系统工作效率高, 可满足居民各类需求。文献[22]建立了含海水淡化负荷的多源系统日前优化调度模型, 算例表明, 该系统可降低整体费用, 提高可再生能源就地消纳率。文献[23]提出了一种基于综合需求响应的海岛式多能微网优化调度模型。该模型增加氢储能装置、热储能装置和燃料电池, 进一步提高了综合能源利用效率。然而, 以上文献均未考虑波浪能发电装置等海岛IES特有的发电设备以及居民淡水供给稳定等海岛必需的生存条件。

本研究旨在搭建一种能源利用率高、可满足正常运行条件的多能孤岛IES模型。为因地制宜地利用海岛丰富的波浪能资源, 将波浪能发电装置引入海岛IES中, 使供能方式更多元化。同时, 为进一步节约能源, 系统还充分考虑了氢氧燃料电池的产热、产水特性。此外, 还引入海水淡化装置解决居民用淡水难的问题, 保障了海岛居民的基本生存条件。为了更好地实现日前优化调度, 首先对风光发电进行预测。考虑到海上环境因素对风光出力影响较大, 利用随机森林方法对历史气象数据和新能源出力数据进行处理, 将处理后的数据用于CNN-Bi-LSTM预测模型的构建。其次, 在提升系统运行经济性的基础上, 增加改善系统可再生能源消纳率的目标, 并在系统约束条件中加入淡水约束, 建立完备的电-热-氢-淡水约束体系。最后, 通过CPLEX求解器对建立的海岛综合能源系统优化调度模型进行求解。结果表明, 所提方法能够在

保障系统稳定运行的基础上,充分消纳可再生能源,降低系统运行成本。

1 海岛综合能源系统结构及设备建模

1.1 海岛综合能源系统结构

为保障海岛IES的高效运行,本文搭建了包含波浪能发电装置、氢能装置、海水源热泵、海水淡化装置等设备的海岛源-荷-储系统结构。实现源侧全清洁能源供电,满足荷侧基本能源需求。所搭建的系统结构如图1所示,图中展示了各设备之间的能源转换关系。该系统可满足用户的电、冷、热、淡水负荷需求,同时利用蓄电池、氢能装置制氢并储氢以消纳可再生能源发电。海岛的电力负荷由光伏设备、风力发电机及波浪能发电机优先满足,冷、热负荷主要由海水源热泵设备满足,淡水负荷主要由海水淡化设备满足,氢氧燃料电池作为补充装置,可同时满足电、冷、热、淡水负荷。

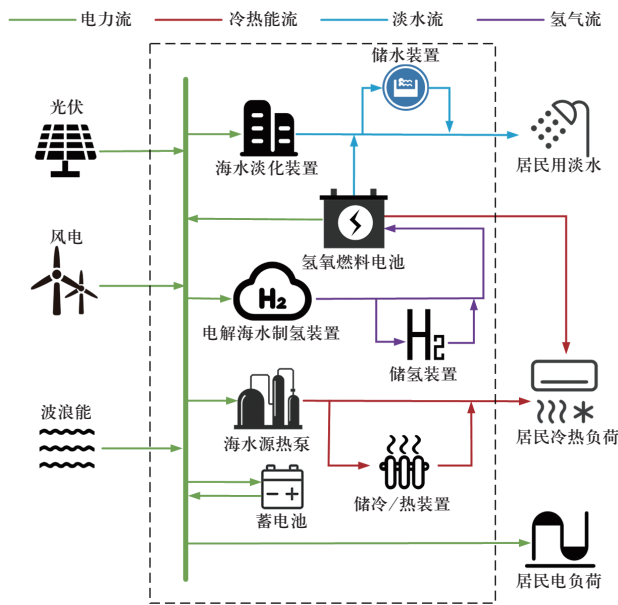


图1 海岛IES系统结构图

Fig. 1 Island IES structure diagram

1.2 能量生产装置模型

1.2.1 波浪能发电装置模型

波浪能发电技术是一种有望解决海岛供能问题的有效方法,在海洋领域的应用场景日渐广泛^[24-26]。本文采用文献[27]提出的一种结合越浪式和震荡浮子式的新型波浪能发电装置。该装置有较高的能量转换效率,可以捕获更多的波浪能,结构如图2所示。该装

置通过新型浮子上下摆动,带动抽水系统将水抽到蓄水池,利用重力势能带动水轮机发电。

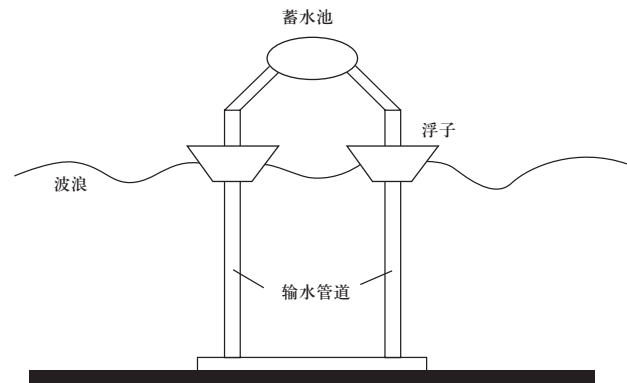


图2 波浪能发电装置

Fig. 2 Wave power generation device

在波浪能发电装置中,来波能量为

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \quad (1)$$

式中: P_{wave} 为来波能量; ρ 为海水密度; g 为重力加速度; H 为波浪高度; T 为波浪周期。

新型波浪能发电效率为

$$\eta_{\text{wave}} = \frac{P_{\text{WEC}}(t)}{P_{\text{wave}}(t)} \quad (2)$$

式中: η_{wave} 为波浪能装置的发电效率; $P_{\text{WEC}}(t)$ 为 t 时段内波浪能装置的发电量; $P_{\text{wave}}(t)$ 为 t 时段内的来波能量。

1.2.2 氢氧燃料电池模型

$$P_{\text{H}}(t) = \eta_{\text{PH}} V_{\text{H}}(t) \quad (3)$$

$$Q_{\text{H}}(t) = \eta_{\text{QH}} V_{\text{H}}(t) \quad (4)$$

$$V_{\text{WH}}(t) = \eta_{\text{WH}} V_{\text{H}}(t) \quad (5)$$

式中: $V_{\text{H}}(t)$ 为 t 时段氢氧燃料电池消耗的氢气体积; $P_{\text{H}}(t)$ 为 t 时段氢氧燃料电池的输出电功率; η_{PH} 为氢氧燃料电池氢转电系数,即消耗单位体积氢气所发出的电功率; $Q_{\text{H}}(t)$ 为 t 时段氢氧燃料电池输出的热功率; η_{QH} 为氢氧燃料电池氢转热系数,即消耗单位体积氢气所发出的热功率; $V_{\text{WH}}(t)$ 为 t 时段氢氧燃料电池产生的淡水体积; η_{WH} 为氢氧燃料电池氢转水系数,即消耗单位体积氢气所产生的淡水体积。

1.3 能量转化装置模型

1.3.1 海水源热泵装置模型

$$Q_{\text{HP}}(t) = \eta_{\text{HP}} P_{\text{HP}}(t) \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{HP}}(t)$ 为 t 时段海水源热泵输出的热功率; η_{HP}

为海水源热泵电转热功率系数, 即消耗单位电功率所发出的热功率; $P_{HP}(t)$ 为 t 时段海水源热泵消耗的电功率。

1.3.2 电解海水制氢装置模型

$$V_{CL}(t) = \eta_{CL} P_{CL}(t) \quad (7)$$

式中: $V_{CL}(t)$ 为 t 时段电解海水制氢装置产生的氢气体积; η_{CL} 为电解海水制氢装置电转氢系数, 即消耗单位电功率所产生的氢气体积; $P_{CL}(t)$ 为 t 时段电解海水制氢装置消耗的电功率。

1.3.3 海水淡化装置模型

$$V_W(t) = \eta_W P_W(t) \quad (8)$$

式中: $V_W(t)$ 为 t 时段海水淡化装置产生的淡水体积; η_W 为海水淡化装置电转水系数, 即消耗单位电功率所产生的淡水体积; $P_W(t)$ 为 t 时段内海水淡化装置消耗的电功率。

1.4 能量储存装置模型

1.4.1 储冷装置模型

$$Q_{QS}(t) = Q_{QS}(t-1) \cdot (1 - \sigma_{QS}) + \left(Q_{cha}(t) \cdot \eta_{Qcha} - \frac{Q_{dis}(t)}{\eta_{Qdis}} \right) \quad (9)$$

式中: $Q_{QS}(t)$ 和 $Q_{QS}(t-1)$ 分别为储冷装置在 t 时段和 $t-1$ 时段储存的冷功率; σ_{QS} 为储冷装置自损失率; $Q_{cha}(t)$ 和 $Q_{dis}(t)$ 分别为储冷装置在 t 时段储存和释放的冷功率; η_{Qcha} 和 η_{Qdis} 分别为储冷装置的储冷、放冷效率。

1.4.2 储氢装置模型

$$V_{HS}(t) = V_{HS}(t-1) \cdot (1 - \sigma_{HS}) + \left(V_{Hcha}(t) \cdot \eta_{Hcha} - \frac{V_{Hdis}(t)}{\eta_{Hdis}} \right) \quad (10)$$

式中: $V_{HS}(t)$ 和 $V_{HS}(t-1)$ 分别为储氢装置在 t 时段和 $t-1$ 时段储存的氢气体积; σ_{HS} 为储氢装置自损失率; $V_{Hcha}(t)$ 和 $V_{Hdis}(t)$ 分别为储氢装置在 t 时段储存和释放的氢气体积; η_{Hcha} 和 η_{Hdis} 分别为储氢装置的储氢、放氢效率。

1.4.3 储淡水装置模型

$$V_{WS}(t) = V_{WS}(t-1) \cdot (1 - \sigma_{WS}) + \left(V_{Wcha}(t) \cdot \eta_{Wcha} - \frac{V_{Wdis}(t)}{\eta_{Wdis}} \right) \quad (11)$$

式中: $V_{WS}(t)$ 和 $V_{WS}(t-1)$ 分别为储淡水装置在 t 时段和 $t-1$ 时段储存的淡水体积; σ_{WS} 为储淡水装置自损失率; $V_{Wcha}(t)$ 和 $V_{Wdis}(t)$ 分别为储淡水装置在 t 时段储存和释放的淡水体积; η_{Wcha} 和 η_{Wdis} 分别为储淡水装置的储水、放水效率。

2 含环境变量重要性排序的风光发电预测模型

海上气象变化多样, 环境较为恶劣, 可再生能源出力受其影响存在很大的不确定性, 因此, 合理预测可再生能源出力有利于实现系统优化调度。已有的海岛历史数据维度多、数量大, 为合理降低数据维度, 充分探索数据关系, 本文提出了一种考虑环境变量影响的 CNN-Bi-LSTM 预测模型。该模型可以更好地对复杂的海上气象数据及工作环境变量数据进行挖掘, 筛选得到与海上新能源发电相关性强的变量数据, 将其进行特征提取后作为训练数据, 构建训练时间更短、预测精度更高的模型。

该预测模型包括数据预处理模块、环境变量重要性排序及交叉验证模块、特征提取及功率预测模块; 所用数据包括历史环境数据及可再生能源出力数据。完整的模型实现步骤可归纳如下。

1) 选取预测地点时间间隔为 15 min 的历史功率数据和环境变量数据, 为超短期风电功率预测做准备。

2) 在数据预处理模块, 考虑到发电机运行过程中的停机修理及数据记录错误等情况, 对历史数据中数值异常的数据点进行筛选并剔除。

3) 对数据进行 Z-score 标准化处理, 避免因数据量纲不同引起的预测误差。Z-score 标准化处理公式为

$$x' = \frac{x - \mu}{\delta} \quad (12)$$

式中: x 为个体观测值, 即被处理的数据; μ 为总体数据的均值; δ 为总体数据的标准差; x' 为处理后的值。

4) 在变量重要性排序及交叉验证模块, 将数据分为训练集和测试集, 构建随机森林回归模型, 通过比较均方误差 (mean square error, MSE) 评估环境变量的重要性。对每一个环境变量随机赋值, 如果该环境变量更为重要, 那么其值被随机替换后, 随机森林回归模型预测的 MSE 会增大。

5) 执行十折交叉验证, 根据交叉验证曲线对环境变量进行取舍。将训练集划分为多部分, 分别用其中一组验证其余训练集训练的结果, 可以更全面地探索数据之间的关系。

6) 在特征提取及功率预测模块, 使用一维卷积神经网络对全部数据进行特征提取, 得到一个新序列并将新序列划分为训练集和测试集。

7) 使用新序列的训练集训练 Bi-LSTM 神经网络, 经过多次训练后, 得到预测模型。使用新序列的测试

集验证所搭建预测模型的准确性。

整体流程如图3所示。

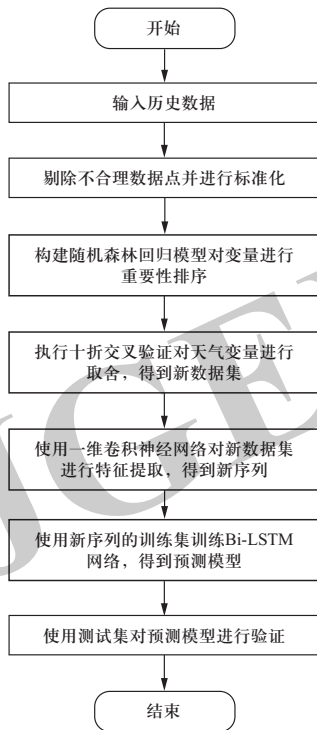


图3 预测模型流程图

Fig. 3 Flow chart of prediction model

在预测模块中, 本方法使用Bi-LSTM模型, 该模型是传统LSTM神经网络的变体, 可有效避免训练过程中的梯度消失或梯度爆炸等问题。在每一个 t 时刻, 训练数据会同时对两个方向相反的LSTM进行训练, 结合二者结果得到训练结果。通过双向训练数据, Bi-LSTM能够捕获到被单向LSTM忽略的数据关系。Bi-LSTM网络结构如图4所示。

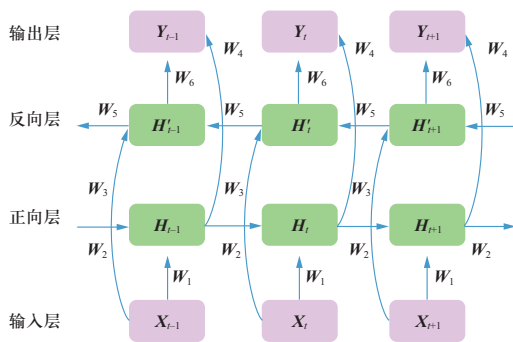


图4 Bi-LSTM网络结构图

Fig. 4 Bi-LSTM network structure diagram

序列的处理公式表示如下:

$$\begin{cases} H_t = f(W_1 X_t + W_2 H_{t-1}) \\ H'_t = f(W_3 X_t + W_3 H'_{t-1}) \\ Y_t = g(W_4 H_t + W_6 H'_t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: H_t 和 H'_{t-1} 分别为 t 时段向前值和向后值; X 为输入变量; f 和 g 均为激活函数, 分别为sigmoid函数和tanh函数; Y 为输出值; W_1 到 W_6 为网络之间的权重矩阵。

CNN-Bi-LSTM模型在预知气象数据的情况下, 用于预测未来某一天的风光发电功率。将该功率作为状态变量输入优化调度模型, 可用于实现系统日前优化调度。将结合了功率预测的调度模型优化日前调度计划及备用容量, 可以更合理地安排能量分配关系, 降低系统运行成本, 提高能量利用率。

3 海岛综合能源系统优化调度模型

3.1 目标函数

目前少有文献致力于海岛综合能源系统研究, 且现有研究中多以经济性为单一目标^[28-30], 忽视了对可再生能源消纳率的关注。可再生能源消纳率反映了综合能源系统对风、光、波浪能等新能源发电的消纳能力, 提升消纳率能够提高能源利用率, 避免能源浪费。因此, 本文将系统运行经济性和可再生能源消纳率相结合, 得到新的目标函数如下:

$$\min F = \sum_{i \in \partial} \sum_{t=1}^T |P_i(t)| C_i(t) \Delta t + \sum_{t=1}^T |P_X(t)| C_X(t) \Delta t \quad (14)$$

式中: ∂ 为各设备集合, $\partial = \{\text{风机, 光伏装置, 波浪能装置, 电解海水装置, 氢氧燃料电池, 海水淡化装置, 海水源热泵, 储冷装置, 储氢装置, 储淡水装置}\}$; T 为调度周期; $C_i(t)$ 为 t 时段设备 i 的单位功率维护成本; $P_i(t)$ 为 t 时段设备 i 的电功率; $C_X(t)$ 为 t 时段弃可再生能源的单位惩罚价格; $P_X(t)$ 为 t 时段系统弃可再生能源功率。

3.2 平衡约束条件

电平衡约束如下:

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{WEC}(t) + P_H(t) = P_{load}(t) + P_{CL}(t) + P_W(t) + P_X(t) \quad (15)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为 t 时段风机发电功率; $P_{PV}(t)$ 为 t 时段光伏发电功率; $P_{load}(t)$ 为 t 时段居民用电负荷。

冷平衡约束如下:

$$Q_{HP}(t) + Q_H(t) + Q_{dis}(t) = Q_{load}(t) + Q_{cha}(t) \quad (16)$$

式中: $Q_{load}(t)$ 为 t 时段居民冷负荷。

淡水平衡约束如下:

$$V_W(t) + V_{WH}(t) + V_{Wdis}(t) = V_{Wload}(t) + V_{Wcha}(t) \quad (17)$$

式中: $V_{Wload}(t)$ 为 t 时段居民所需淡水体积。

氢气平衡约束如下:

$$V_{CL}(t) + V_{Hdis}(t) = V_H(t) + V_{Hcha}(t) \quad (18)$$

设备平衡约束如下:

$$P_i^{\min}(t) \leq P_i(t) \leq P_i^{\max}(t) \quad (19)$$

式中: $P_i(t)$ 为 t 时段内设备 i 输入或输出的能量; $P_i^{\max}(t)$ 和 $P_i^{\min}(t)$ 分别为设备输入或输出能量的上下限。

3.3 储能装置约束

储冷装置约束如下:

$$\begin{cases} Q_{QS}^{\min} \leq Q_{QS}(t) \leq Q_{QS}^{\max} \\ Q_{cha}^{\min} \leq Q_{cha}(t) \leq Q_{cha}^{\max} \\ Q_{dis}^{\min} \leq Q_{dis}(t) \leq Q_{dis}^{\max} \\ Q_{QS}(0) = Q_{QS}(E) \end{cases} \quad (20)$$

式中: Q_{QS}^{\max} 和 Q_{QS}^{\min} 分别为储冷装置功率容量的上下限; Q_{cha}^{\max} 和 Q_{cha}^{\min} 分别为储冷装置储冷功率的上下限; Q_{dis}^{\max} 和 Q_{dis}^{\min} 分别为储冷装置放冷功率的上下限; $Q_{QS}(0)$ 和 $Q_{QS}(E)$ 分别为调度周期初始时刻和结束时刻 ($E=24$) 储冷装置的现存冷功率。

储淡水装置约束如下:

$$\begin{cases} V_{WS}^{\min} \leq V_{WS}(t) \leq V_{WS}^{\max} \\ V_{Wcha}^{\min} \leq V_{Wcha}(t) \leq V_{Wcha}^{\max} \\ V_{Wdis}^{\min} \leq V_{Wdis}(t) \leq V_{Wdis}^{\max} \\ V_{WS}(0) = V_{WS}(E) \end{cases} \quad (21)$$

式中: V_{WS}^{\max} 和 V_{WS}^{\min} 分别为储淡水装置淡水体积的上下限; V_{Wcha}^{\max} 和 V_{Wcha}^{\min} 分别为储淡水装置储淡水体积的上下限; V_{Wdis}^{\max} 和 V_{Wdis}^{\min} 分别为储水装置放淡水体积的上下限; $V_{WS}(0)$ 和 $V_{WS}(E)$ 分别为调度周期初始时刻和结束时刻 ($E=24$) 储水装置的现存淡水体积。

储氢装置约束如下:

$$\begin{cases} V_{HS}^{\min} \leq V_{HS}(t) \leq V_{HS}^{\max} \\ V_{Hcha}^{\min} \leq V_{Hcha}(t) \leq V_{Hcha}^{\max} \\ V_{Hdis}^{\min} \leq V_{Hdis}(t) \leq V_{Hdis}^{\max} \\ V_{HS}(0) = V_{HS}(E) \end{cases} \quad (22)$$

式中: V_{HS}^{\max} 和 V_{HS}^{\min} 分别为储氢装置氢气容量的上下限; V_{Hcha}^{\max} 和 V_{Hcha}^{\min} 分别为储氢装置储氢体积的上下限; V_{Hdis}^{\max} 和 V_{Hdis}^{\min} 分别为储氢装置放氢体积的上下限; $V_{HS}(0)$ 和 $V_{HS}(E)$ 分别为调度周期初始时刻和结束时刻 ($E=24$) 储氢装置的现存氢气体积。

4 算例分析

4.1 方案设定

为验证所提优化调度模型的优越性, 考虑到储氢装置和氢氧燃料电池的工作特性, 设计以下三种优化方案进行对比验证。

方案1: 只使用蓄电池消纳多余的可再生能源发电。

方案2: 使用电解海水制氢及储氢装置替代蓄电池消纳多余的可再生能源发电, 但不回收氢氧燃料电池在产电同时产生的冷功率和淡水。

方案3: 在方案2的基础上, 回收氢氧燃料电池产生的冷功率和淡水。

4.2 算例说明

本文研究的问题是混合线性整数规划问题, 为验证提出的优化调度方案在降低运行成本、提升可再生能源利用率方面的有效性, 本节以中国山东渤海海湾某独立海岛为研究对象进行分析。该海岛位于内海, 数据资料表明, 极端环境出现的特征表现为概率低、时间短。在该极端环境下, 仅需保证短期淡水供应这一生活必备条件即可。系统内部设备参数如表1所示, 各设备的装机容量如表2所示。

表 1 设备参数

Table 1 The parameters of equipment

名称	数值	名称	数值	名称	数值
ρ	1.03	η_{wave}	0.25	η_{CL}	0.25
g	9.8	η_w	0.34	η_{PH}	1.8
Q_{HP}	1.26	η_{WH}	0.000 8	η_{HP}	4
σ_{QS}	0.05	σ_{HS}	0.02	σ_{WS}	0.03

表 2 设备装机容量

Table 2 The installed capacity of equipment

设备	参数	数值
风力发电设备	最大发电功率/kW	1500
太阳能发电设备	最大发电功率/kW	2000
波浪能发电设备	最大发电功率/kW	1600
电解海水制氢装置	最大制氢体积/ m^3	500
氢氧燃料电池	最大发电功率/kW	1200
海水淡化装置	最大产水体积/ m^3	300
海水源热泵	最大供冷热功率/kW	3000
蓄电池	最大蓄电量/kWh	1500
储氢装置	最大储氢量/ m^3	2000

续表

设备	参数	数值
储冷热装置	最大储冷量/kW	2000
储淡水装置	最大储水量/m ³	200

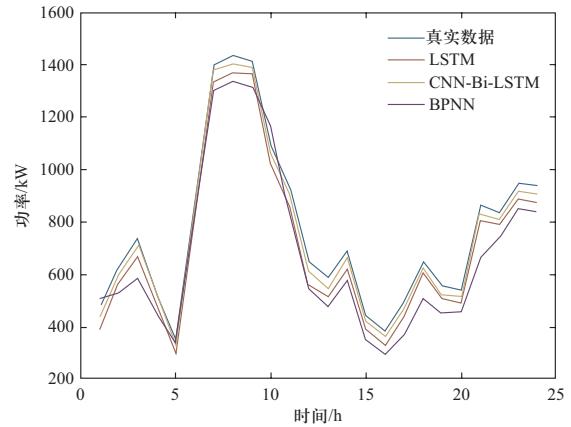
4.3 可再生能源功率预测结果

为更好地验证所提出的CNN-Bi-LSTM预测模型的有效性,选取中国山东威海海域海上风电光伏功率数据及环境变量数据,分别使用BPNN模型和LSTM模型进行功率预测,并使用相同的测试集数据对三种预测模型的预测精准度进行验证。为体现该预测模型在整体优化调度过程中的优越性以及在海岛综合能源系统的适应性,将冬夏两个典型日的风电功率预测结果与BPNN和LSTM的预测结果进行对比,如图5所示。可以看到,LSTM模型可有效解决梯度消失的问题,在预测精度上较BPNN模型更优一些。Bi-LSTM模型得益于数据的双向训练,可以更充分地探索数据间的关系,因此预测曲线更接近于真实值。预测误差评价系数如表3所示,CNN-Bi-LSTM预测模型的各项评价指标均优于BPNN模型和LSTM模型。其夏季典型日预测结果的均方根误差(root mean squared error, RMSE)较BPNN模型和LSTM模型分别减少36.184 8、16.016 4,冬季典型日预测结果的RMSE较BPNN和LSTM分别减少76.555 8、33.349 1;夏季典型日预测结果的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)较BPNN和LSTM分别减少35.336 8、15.919 9,冬季典型日预测结果的MAE较BPNN和LSTM分别减少71.035 6、32.883 4。此外,该方法在夏季典型日训练2000次,所消耗的时间较BPNN和LSTM分别节省109.82 s、10.03 s,冬季典型日的训练耗时较BPNN和LSTM分别节省115.71 s、13.23 s。以上结果表明,本文所提的预测模型在进行可再生能源发电预测时的训练误差更小,预测速度更快。

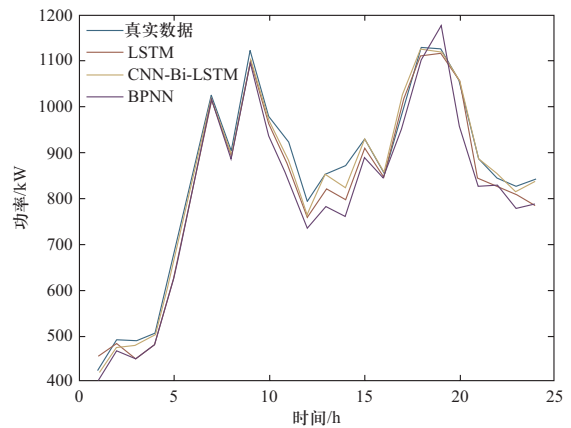
表3 预测结果评价指标

Table 3 Evaluation index of prediction results

预测方法	RMSE	MAE	R ²	训练时间/s
BPNN (夏)	53.436 2	46.992 1	0.931 3	261.62
LSTM (夏)	33.267 8	27.575 2	0.972 6	161.83
CNN-Bi-LSTM (夏)	17.251 4	11.655 3	0.992 5	151.80
BPNN (冬)	104.497 7	98.197 5	0.895 7	245.23
LSTM (冬)	61.291 0	60.045 3	0.962 5	142.75
CNN-Bi-LSTM (冬)	27.941 9	27.161 9	0.992 0	129.52



(a) 夏季典型日风电功率预测结果对比



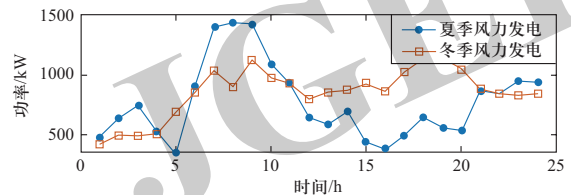
(b) 冬季典型日风电功率预测结果对比

图5 预测结果对比图

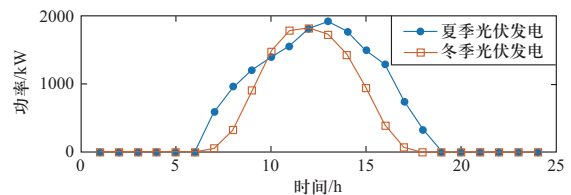
Fig. 5 Prediction results comparison diagram

4.4 优化及仿真结果分析

使用第2章提出的预测模型,根据典型日当天的环境变量数据,预测得到风光发电功率,并根据公式(1)和公式(2)计算求得波浪能发电功率。风光发



(a) 风力发电功率



(b) 光伏发电功率

图6 风光发电功率

Fig. 6 Wind and photovoltaic energy power generation

电功率如图6所示, 波浪能发电功率如图7所示, 典型日的负荷曲线如图8所示。针对三种设计方案, 利用CPLEX求解器求解得到优化调度方案。

夏季典型日方案1电平衡运行结果如图9(a)所示

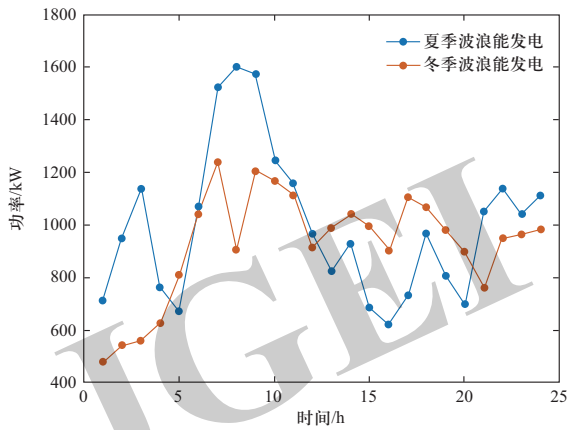
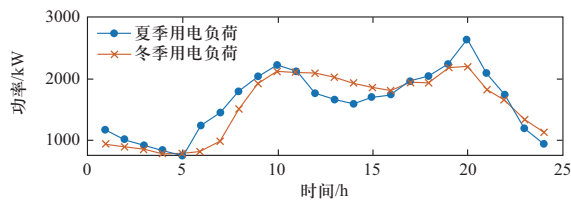
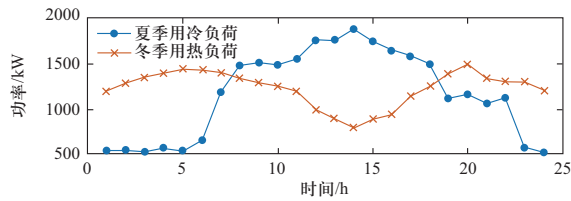


图7 波浪能发电功率

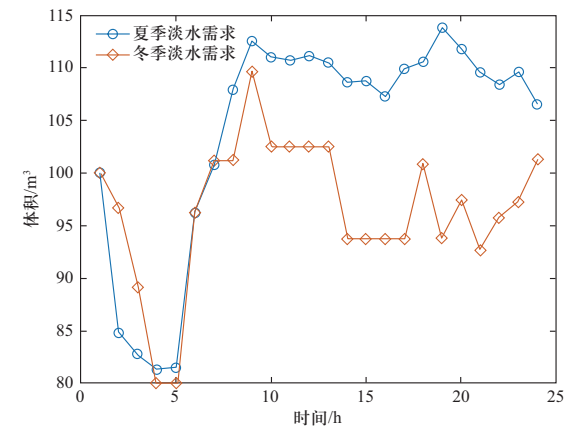
Fig. 7 Wave energy power generation



(a) 用电负荷



(b) 冷热负荷

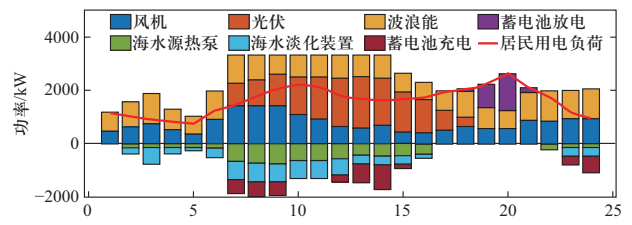


(c) 淡水需求

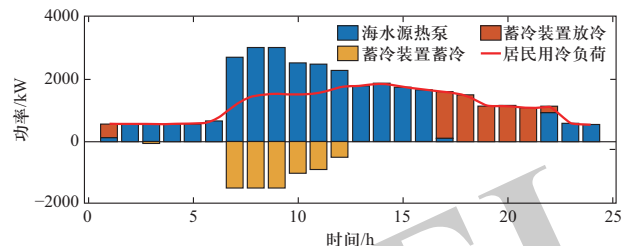
图8 居民电冷热负荷及淡水需求

Fig. 8 Residential electric, cooling and heating load, and fresh water demand

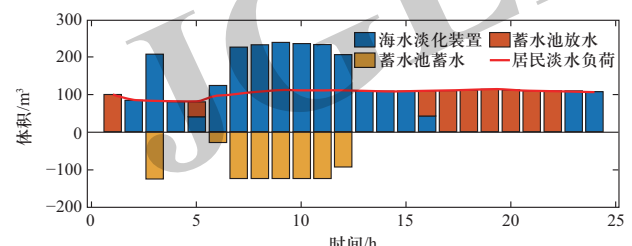
示, 在22:00—6:00时段, 用户电负荷需求较低, 此时光照强度不足, 所需的电负荷主要由风机和波浪能发电装置满足。对于7:00—15:00时段, 用户电负荷需求处于平值, 光伏发电随着光照强度变强逐渐增多, 可再生能源发电大于所需电功率, 蓄电池蓄电用于消纳新能源出力。对于16:00—21:00时段, 用户电负荷处于高峰期, 用户用电量较大且光伏不发电, 风机、波浪能发电已不能满足用电需求, 此时蓄电池放电以补充供电缺口, 维持系统稳定。用户冷平衡运行结果如图9(b)所示, 对于7:00—11:00时段, 海水源热泵制冷大于所需冷功率, 储冷装置用于消纳新能源出力。对于16:00—21:00时段, 热泵产热不能满足居民供冷需求, 此时储冷装置放冷, 维持系统稳定。用户淡水需求平衡分析方式与电冷负荷类似, 如图9(c)所示, 其中居民所用淡水由海水淡化装置提供。



(a) 电平衡运行结果



(b) 冷平衡运行结果



(c) 淡水平衡运行结果

图9 夏季典型日方案1优化调度结果

Fig. 9 The optimal dispatch results of Scheme 1 in typical summer day

夏季典型日方案2电氢平衡运行结果如图10(a)、图10(b)所示。对于7:00—15:00时段, 可再生能源发

电已超过系统所需的电功率，电解海水装置通过制氢储氢消纳多余的可再生能源发电。对于16:00—21:00时段，用户负荷处于高峰期，光伏不发电，风机、波浪能发电并不能满足用电需求。此时氢氧燃料电池消耗上一时段储存的氢气补充供电缺口，维持系统稳定。用户冷平衡及淡水需求平衡分析方式与方案1类似，如图10(c)、图10(d)所示。

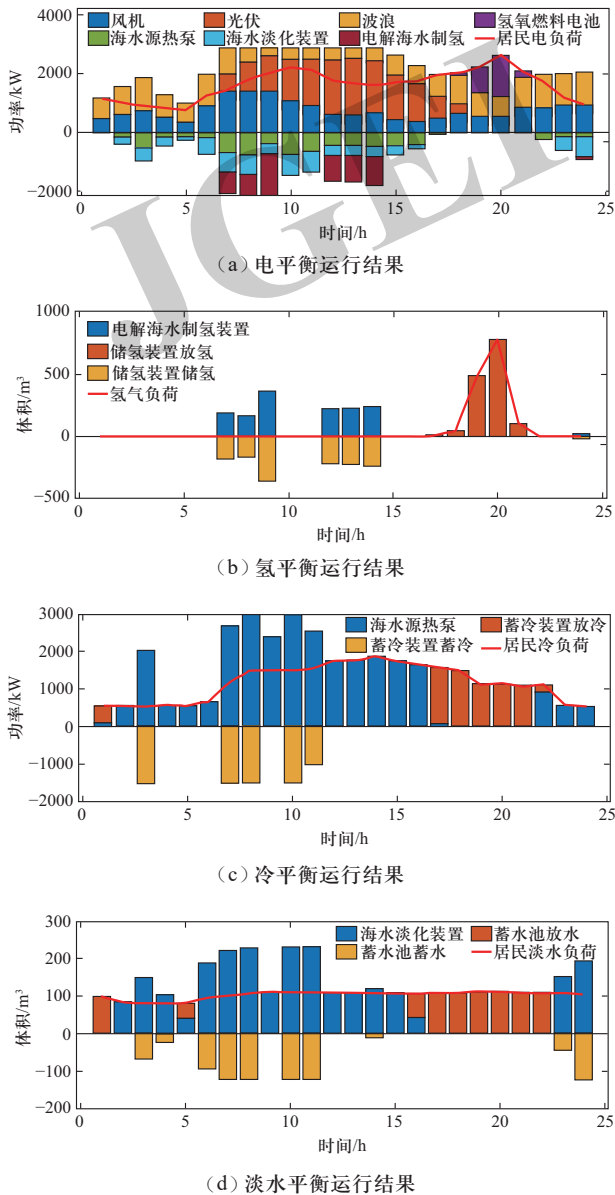


图 10 夏季典型日方案2优化调度结果

Fig.10 The optimal dispatch results of Scheme 2 in typical summer day

夏季典型日方案3运行结果如图11所示。对于22:00—6:00时段，用户电负荷需求较低。电负荷主要由风机和波浪能发电装置满足，冷负荷由海水源热泵满足，淡水需求由海水淡化装置满足。对于7:00—15:00时段，用户负荷需求处于平值，光伏发电逐渐增高，可再生能源发电大于所需电功率。为了消纳可再生能源发电，电解海水制氢装置制氢并储氢，海水源热泵制冷并蓄冷，海水淡化装置制淡水并蓄淡水。在16:00—21:00时段，用户负荷处于高峰期，用电量较大，可再生能源发电不能满足用电需求。此时氢氧燃料电池工作，补充供电缺口，同时系统回收氢氧燃料电池产生的热功率和淡水，结合供热系统和供淡水系统，维持系统稳定。

泵满足，淡水需求由海水淡化装置满足。对于7:00—15:00时段，用户负荷需求处于平值，光伏发电逐渐增高，可再生能源发电大于所需电功率。为了消纳可再生能源发电，电解海水制氢装置制氢并储氢，海水源热泵制冷并蓄冷，海水淡化装置制淡水并蓄淡水。在16:00—21:00时段，用户负荷处于高峰期，用电量较大，可再生能源发电不能满足用电需求。此时氢氧燃料电池工作，补充供电缺口，同时系统回收氢氧燃料电池产生的热功率和淡水，结合供热系统和供淡水系统，维持系统稳定。

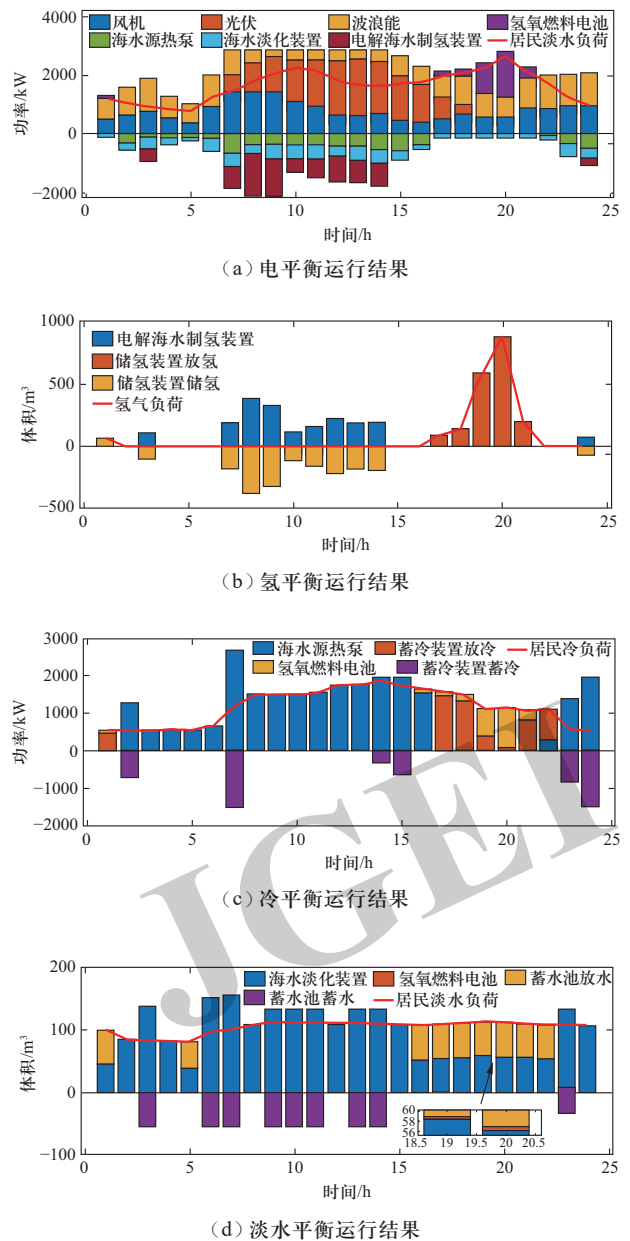


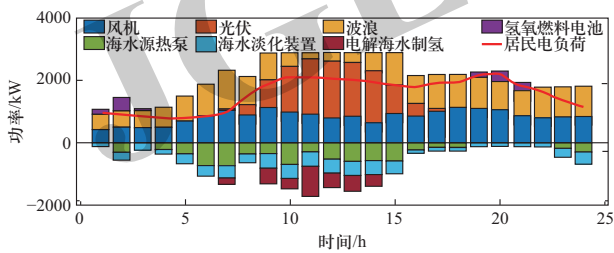
图 11 夏季典型日方案3优化调度结果

Fig. 11 The optimal dispatch results of Scheme 3 in typical summer day

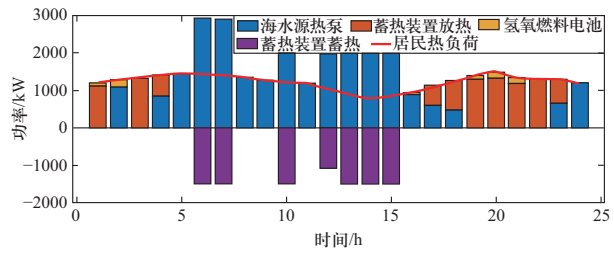
冬季典型日方案3运行结果如图12所示。对于22:00—6:00时段, 不同于夏季典型日, 冬季气温较低, 需要夜间集中供暖。风机和波浪能出力不足以满足负荷, 氢氧燃料电池工作, 补充供电缺口, 保障居民供暖。对于7:00—15:00时段, 用户负荷需求处于平值, 光伏发电逐渐增加, 此时气温较高, 供暖需求降低, 可再生能源发电大于所需电功率。为了消纳可再生能源发电, 电解海水制氢装置制氢并储氢, 海水源热泵制热并蓄热, 海水淡化装置制淡水并蓄淡水。在16:00—21:00时段, 用户负荷处于高峰期, 用电和供暖需求较大, 可再生能源发电不能满足用户需求。此时氢氧燃料电池工作, 补充供电缺口, 同时系统回收

氢氧燃料电池产生的热功率和淡水, 结合供热系统和供淡水系统, 维持系统稳定。冬季典型日方案1、2的趋势及分析与方案3类似, 在此不做赘述。

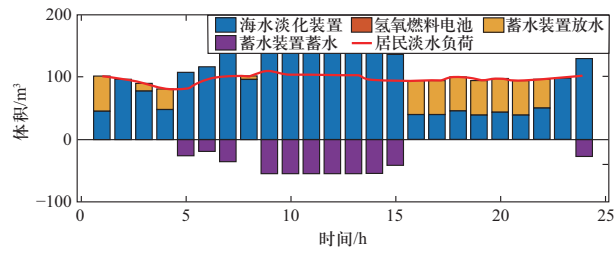
本文第3.1节中设置的包含系统运行成本和可再生能源消纳率的目标函数采用的是惩罚函数形式, 即整体目标函数为系统运行成本加上未消纳新能源惩罚总价, 惩罚价格选取电网平段电价, 其价格远高于各设备运行单价, 在目标函数最小时, 即可达到最优经济性和最高消纳率。因此, 本文选取系统运行成本、可再生能源消纳率、未消纳新能源、惩罚总价和目标函数总价为评价指标, 结果如表4、表5所示。



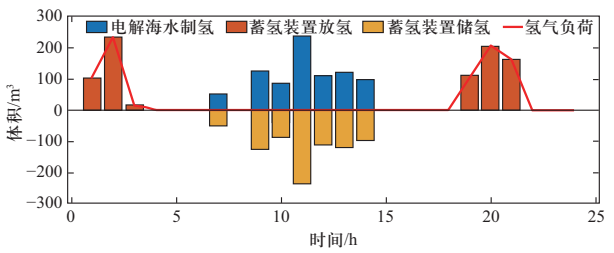
(a) 电平衡运行结果



(b) 热平衡运行结果



(c) 淡水平衡运行结果



(d) 氢平衡运行结果

图 12 冬季典型日方案3优化调度结果

Fig. 12 The optimal dispatch results of Scheme 3 in typical winter day

表 4 夏季典型日优化调度结果对比

Table 4 Comparison of optimal dispatch results in typical summer day

方案	系统运行成本/元	可再生能源消纳率	未消纳新能源/kWh	惩罚总价/元	系统累计成本/元
1	6 964.85	98.09%	1 096.40	624.95	7 589.80
2	8 347.41	97.88%	1 217.70	694.09	9 041.50
3	6 985.39	98.97%	595.04	339.17	7 324.56

表 5 冬季典型日优化调度结果对比

Table 5 Comparison of optimal dispatch results in typical winter day

方案	系统运行成本/元	可再生能源消纳率	未消纳新能源/kWh	惩罚总价/元	系统累计成本/元
1	6 175.84	98.36%	877.67	500.27	6 676.11
2	7 582.37	98.04%	1 047.00	596.79	8 179.16
3	6 206.17	98.92%	576.06	328.35	6 534.52

方案2将氢能装置用于能量储存, 与方案1使用蓄电池的情况相比, 夏季和冬季分别增加了1 382.56元、1 406.53元的运行成本, 少消纳了121.3 kWh、169.33 kWh可再生能源。其原因在于, 方案2中用于储能的氢能装置需经过制氢、储氢、用氢三个步骤, 在这些过程中未充分利用燃料电池产生的冷功率和淡水, 且设备运维费用较高。

相比于方案2, 方案3考虑了氢氧燃料电池的产热产淡水特性, 目的是进一步提高能源利用率, 消纳新能源。与方案2的对比结果表明, 方案3拥有更低的系统运行成本和更高的可再生能源消纳率。其中, 系统夏冬运行成本分别降低了1 362.02元、1 376.20元, 多消纳了626.66 kWh、470.94 kWh可再生能源。与方案1相比, 可再生能源消纳率分别提高了0.88和0.56个百分点, 系统整体成本降低了265.24元、141.59元。

在极端环境下,系统启动应急处理方案,仅满足能够保障居民极端生存的淡水需求。本研究设置的蓄水池中的蓄水量以及储氢装置中储存的氢气用于燃料电池发电并淡化的海水可满足居民1 d的淡水需求,保障极端环境下岛上居民的基本生活条件。

综上所述,考虑可再生能源发电预测的海岛综合能源系统运行优化调度方法在考虑燃料电池产热产水特性后,可以实现海岛能源的供需平衡,有效避免可再生能源发电浪费现象,降低海岛综合能源系统运行成本,提升系统运行经济性和可再生能源消纳率,为海岛建设提供新思路、新方法。

5 结论

本文提出了一种基于风光预测的海岛综合能源系统运行优化调度方法。

1) 相比于传统的综合能源系统模型,本研究因地制宜地建立了包含波浪能发电装置、电解海水制氢装置、氢氧燃料电池和海水淡化装置等新型能源转换设备的海岛综合能源系统模型,缓解了海岛能源供需矛盾,可充分利用海岛资源,满足海岛基本生存条件。

2) 提出了一种考虑环境变量重要性排序的可再生能源发电预测模型。通过不同模型预测结果的对比分析,证明所提出的CNN-Bi-LSTM预测模型具有良好的预测精度和计算速度。

3) 构建了以电-冷-淡水-氢平衡为约束,以经济性和可再生能源消纳率为目标函数的优化调度模型。运行优化结果表明,该系统能够同时满足用户电负荷、冷负荷和淡水需求。在考虑氢氧燃料电池的产热产淡水特性时,该系统能有效提高运行经济性和可再生能源消纳率。

在未来的研究中,需要对设备进行更详细的建模,探索更有效的求解算法。同时,尝试将碳交易收益作为优化目标,并增加水产养殖等能够固碳的海岛特色负荷,进一步完善和优化海岛综合能源系统。此外,计划为特殊海岛,如军用岛屿或易出现极端情况的岛屿进行更为全面、更有针对性的模型设计。

参考文献

[1] 时帅, 吴慧娴, 黄冬梅, 等. 考虑复杂海洋气候条件影响的海上风电场储能容量配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 172-179.
SHI Shuai, WU Huixian, HUANG Dongmei, et al. Energy

storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 172-179(in Chinese).

- [2] 李贤育, 姚良忠, 程帆, 等. 海上风电多类型直流送出系统拓扑经济性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 476-485.
LI Xianyu, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Economic analysis of multi-type DC system topologies for offshore wind power transmission[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 476-485(in Chinese).
- [3] 江冰. 构建面向30·60的新型电力系统: 中国电力4.0的思考[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 534-541.
JIANG Bing. Building new power system for 30·60—reflections on China's electricity 4.0[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 534-541(in Chinese).
- [4] 李凯文, 黄帅. 单桩式海洋风电装置风振数值分析和现场监测研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 166-171.
LI Kaiwen, HUANG Shuai. Site monitoring and numerical simulation on the vibration of the marine wind power installation founded on monopiles[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 166-171(in Chinese).
- [5] 丁明, 王磊, 毕锐. 基于改进BP神经网络的光伏发电系统输出功率短期预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 93-99.
DING Ming, WANG Lei, BI Rui. A short-term prediction model to forecast output power of photovoltaic system based on improved BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 93-99(in Chinese).
- [6] 易善军, 王汉军, 向勇, 等. 基于集成多尺度LSTM的短时风功率预测[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(7): 75-81.
YI Shanjun, WANG Hanjun, XIANG Yong, et al. Short-term wind power forecasting based on integrated multi-scale LSTM[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(7): 75-81(in Chinese).
- [7] LIU Y, GUAN L, HOU C, et al. Wind power short-term prediction based on LSTM and discrete wavelet transform[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1108.
- [8] 陈海鹏, 周越豪, 王趁录, 等. 基于改进的CNN-LSTM短期风功率预测的系统旋转备用经济性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 439-448.
CHEN Haipeng, ZHOU Yuehao, WANG Chenlu, et al. Economic analysis of system spinning reserve based on improved CNN-LSTM short term wind power prediction[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 439-448(in Chinese).
- [9] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708(in Chinese).

- [10] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573-589.
ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 573-589(in Chinese).
- [11] 马一鸣, 周夕然, 董鹤楠, 等. 考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 118-127.
MA Yiming, ZHOU Xiran, DONG Henan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 118-127(in Chinese).
- [12] 邹云阳, 杨莉, 李佳勇, 等. 冷热电多能互补的微能源网鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 65-72.
ZOU Yunyang, YANG Li, LI Jiayong, et al. Robust optimal dispatch of micro-energy grid with multi-energy complementation of cooling heating power and natural gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 65-72(in Chinese).
- [13] 孟明, 薛宛辰, 商聪. 含地源热泵与混合储能区域能源系统协同调度[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 68-80.
MENG Ming, XUE Wanchen, SHANG Cong. Coordinated scheduling of regional energy system with ground source heat pump and hybrid energy storage[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(1): 68-80(in Chinese).
- [14] 刘贝贝. 引入地源热泵和储能装置的综合能源系统优化调度[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [15] 郭汇江. 海水源热泵技术海上设施应用概述[J]. 节能, 2020, 39(12): 108-109.
GUO Huijiang. Overview of seawater source heat pump for offshore installations[J]. Energy Conservation, 2020, 39(12): 108-109(in Chinese).
- [16] 崔杨, 郭福音, 付小标, 等. 供用能转换促进风电消纳的综合能源系统源荷协调优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1437-1447.
CUI Yang, GUO Fuyin, FU Xiaobiao, et al. Source-load coordinated optimal dispatch of integrated energy system based on conversion of energy supply and use to promote wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1437-1447(in Chinese).
- [17] 赵雪莹, 李根蒂, 孙晓彤, 等. “双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 436-446.
ZHAO Xueying, LI Gendi, SUN Xiaotong, et al. Key technology and application progress of hydrogen production by electrolysis under peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality targets[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 436-446(in Chinese).
- [18] 郭梦婕, 严正, 周云, 等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 115-123.
GUO Mengjie, YAN Zheng, ZHOU Yun, et al. Optimized operation design of integrated energy system with wind power hydrogen production[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 115-123(in Chinese).
- [19] 侯慧, 刘鹏, 黄亮, 等. 考虑不确定性的电-热-氢综合能源系统规划[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1): 133-144.
HOU Hui, LIU Peng, HUANG Liang, et al. Planning of electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement 1): 133-144(in Chinese).
- [20] 刘海涛, 朱海南, 李丰硕, 等. 计及碳成本的电-气-热-氢综合能源系统经济运行策略[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 21-29.
LIU Haitao, ZHU Hainan, LI Fengshuo, et al. Economic operation strategy of electric-gas-heat-hydrogen integrated energy system considering carbon cost[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 21-29(in Chinese).
- [21] PU Y C, LI Q, QIU Y B, et al. Two-stage scheduling for island CPHH IES considering plateau climate[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020: 1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9299507>.
- [22] 陈培育, 宋杰, 陈嘉栋, 等. 含海水淡化负荷的多源多荷系统日前优化调度策略研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 310-316.
CHEN Peiyu, SONG Jie, CHEN Jiadong, et al. Optimized day-ahead dispatching strategy of multisource and multiload system with desalination load[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 310-316(in Chinese).
- [23] 孙景钊, 周泰斌, 胡长洪, 等. 基于综合需求响应的海岛式多能微网优化调度[J]. 电工技术, 2021(7): 17-22.
SUN Jingliao, ZHOU Taibin, HU Changhong, et al. Optimal dispatch of multi energy island-microgrid based on integrated demand response[J]. Electric Engineering, 2021(7): 17-22(in Chinese).
- [24] 崔琳, 李蒙, 白旭. 海洋可再生能源技术现状与发展趋势[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 22-33.
- [25] 黄慧生, 王永智, 唐玉峰, 等. 低碳背景下波浪能发电有关问题探讨[J]. 中国工程咨询, 2021(10): 57-61.
- [26] MARGHERITINI L, VICINANZA D, FRIGAARD P. SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device[J]. Renewable Energy, 2009, 34(5): 1371-1380.
- [27] 张步恩, 郑源, 付士凤, 等. 一种新型波浪能发电转换装置试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7263-7271.
ZHANG Bue, ZHENG Yuan, FU Shifeng, et al. Experimental study of a new type wave energy converter[J]. Proceedings of

the CSEE, 2019, 39(24): 7263-7271(in Chinese).

- [28] 牛耕, 季宇, 陈培坤, 等. 含海洋能发电的海岛微网能量优化调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 96-104.
NIU Geng, JI Yu, CHEN Peikun, et al. Optimal energy dispatching method for island microgrid with ocean power generation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 96-104(in Chinese).
- [29] 黄冬梅, 陈柯翔, 孙锦中, 等. 含电解制氢装置及光热电站的海岛微网优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. (2022-03-08) [2022-05-18]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000966>.
HUANG Dongmei, CHEN Kexiang, SUN Jinzhong, et al. A optimization dispatch study of micro grid with electricity hydrogen production device and CSP station in isolated islands[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA. (2022-03-08)[2022-05-18]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000966>(in Chinese).
- [30] PU Y C, LI Q, ZOU X L, et al. Optimal sizing for an integrated energy system considering degradation and seasonal hydrogen storage[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117542.

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-03。



王润治

作者简介:

王润治(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源功率预测、综合能源系统建模及优化调度, E-mail: 1062620116@qq.com。

王瑞琪(1986), 男, 高级工程师, 研究方向为综合能源技术、清洁能源技术、双碳节能技术, E-mail: 13698622826@163.com。

陈阿莲(1976), 女, 教授, 研究方向为新能源发电系统优化控制理论与技术、电力电子技术及应用。通信作者, E-mail: chenalian@sdu.edu.cn。

(责任编辑 张宇 翁宇威)

JGEEI