

海岛低碳综合能源微网优化方案设计

邢晓敏¹, 杜钧淇¹, 李贻涛¹, 周茉²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华电吉林能源有限公司, 长春 130021)

摘要: 海岛微网不同季节的风光出力 and 负荷水平不同并且缺少跨季节性的长期储能方式, 导致了当前海岛微网大规模弃风弃光和高额碳排放。为了提高风光利用率和降低碳排放, 建立了包含氢储能系统和海水源热泵的海岛综合能源微网。以最小化年化成本、最小化弃风光率、最小化碳排放量为目标函数, 以分布式电源出力和功率平衡为约束, 采用 NSGA-III 算法对各分布式电源的容量进行多目标优化配置, 使用模糊隶属度函数选取综合满意度最大的解, 算例结果证明了综合能源微网的优越性, 为今后海岛微网的规划建设提供参考。

关键词: 海岛供电; 综合能源微网; 氢储能; 海水源热泵; 优化配置; 发电侧收益

Optimization Scheme Design of Island Low-Carbon Integrated Energy Microgrid

XING Xiaomin¹, DU Junqi¹, LI Yitao¹, ZHOU Mo²

(1. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132012, China; 2. Huadian Jilin Energy Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: The different wind and solar output and load levels of island microgrids in different seasons and the lack of cross-seasonal long-term energy storage methods have led to the current large-scale abandonment of wind and solar energy and high carbon emissions in island microgrids. In order to improve the utilization rate of wind and solar energy and reduce carbon emissions, an island integrated energy microgrid including hydrogen energy storage system and seawater source heat pump is established. The objective function is to minimize the annualized cost, the abandoned wind rate and the carbon emissions. Taking the output of distributed power generation and power balance as constraints, the NSGA-III algorithm is used to optimize the capacity of each distributed generation source with multiple objectives, and the fuzzy membership function is used to select the solution with the highest comprehensive satisfaction. The superiority of the integrated energy microgrid is verified by the example and it provides a reference for the planning and construction of island microgrids in the future.

Key words: island power supply; integrated energy microgrid; hydrogen energy storage; seawater source heat pump; optimized configuration; power generation side revenue

0 引言

我国海岛众多, 保障其电力能源供给对我国发展海洋经济、实现海洋强国战略具有重要意义^[1], 同时构建清洁低碳、高效稳定的能源系统是实现我国碳中和目标的重要一环。微电网是由传统化石能源供能转向新能源供能的重要手段, 也是解决我国偏远海岛地区供电的关键技术^[2-5], 微电网凭借风

电、光伏结合储能电池和燃气轮机可以保证海岛供电的灵活性和稳定性。然而海岛居民负荷变化和风光出力均随季节更替有明显的变化^[6], 夏季和冬季居民的冷热负荷需求给海岛供电带来压力, 需要燃气轮机频繁参与调度, 这产生了大量的碳排放; 同时, 在春秋季节负荷水平较低时, 电池储能不足以消纳过剩的风光出力, 缺乏大规模、长周期的储能方式, 导致大量弃风弃光, 解决上述问题是当前海岛微网建设规划研究的重点之一。

关于海岛微电网建设的研究内容已有很多, 文献^[7-8]引入了海水淡化设备, 在消纳多余的风光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177074)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177074).

出力的同时实现海岛水-电联合供应；文献[9-10]提出储电船舶概念，海岛群之间通过储电船舶进行能量调度，储电船舶在新能源出力过剩或负荷水平低的海岛进行充电，在新能源出力不足或者负荷水平高的海岛放电，打破了单一海岛独立发展的格局；文献[11-12]基于海岛地理条件，在海岛上建设抽水蓄能电站来平抑新能源出力的波动性，实现电能的长期储存。上述研究给海岛微网建设提供了一定的参考，但也存在一定的局限性：海水淡化工程后期维护成本高，且海域环境不同导致设计标准不同，难以形成统一的工程规范；储电船舶航行受海上恶劣天气影响，难以保证可靠性；抽水蓄能电站要求一定的地理条件。目前，氢储能系统凭借储能周期长，新能源消纳能力强等特点成为当前风光消纳研究的热点^[13-14]。随着新能源发电制氢及储氢技术日益成熟，在海岛微网中引入氢储能系统作为长期储能方式是一个可行的办法。

目前针对氢储能已有较多研究：文献[15]使用氢储能系统平抑风光场发电侧的波动性，结合NSGA-II和熵权法对氢储能系统的容量进行优化配置；文献[16]考虑不确定性对电-热-氢综合能源系统进行容量优化；文献[17]建立了一个以氢储能系统为储能核心的微网群，使用遗传算法对四个微网的分布式电源进行容量优化；文献[18]对单位电量成本、供电不足以及发电过剩3个指标进行加权构成单目标函数，使用回溯搜索算法确定最优电氢混合储能容量；文献[19]对电解制氢设备进行了改进，基于我国南海某岛屿，优化了含氢储能的海岛微网调度方案，但未对容量配置进行研究；文献[20]建立了含氢储能的综合能源系统容量和调度双层优化模型，但仅用一种典型日的风光出力及负荷情况作为算例，缺乏对不确定性的考虑。

此外，上述有关海岛微网建设研究内容供能形式单一，研究内容仅考虑海岛供电和供水，没有考虑海岛居民冷热负荷需求。目前海岛居民普遍使用空调满足冷热负荷需求，而海水源热泵相对于空调具有更高的能效系数，只需消耗少量的电能就能达到和空调同样的效果，能够降低海岛夏季冬季的电负荷需求^[21]，当前，我国大连、威海已有相关的水源热泵工程示范案例。文献[22]对我国天津、青岛、上海、宁波4个沿海城市的水源热泵工程从技术、经济、环境、地理条件4个角度进行了可行性分

析，并指出海水源热泵系统可以在减少碳排放；文献[23]对大量数据进行了统计，给出了水源热泵能效系数的计算模型；文献[24]指出进水温度是影响海水源热泵能效系数的主要因素；文献[25]分析了海水源热泵的成本问题；文献[26]对含热泵的综合能源系统的调度问题进行了优化；文献[27]考虑电动汽车和热泵参与调度提高风电消纳；但文献[26-27]均未考虑热源温度对热泵能效系数的影响，这也是当前含热泵的综合能源系统研究普遍存在的问题。

综上所述，本文针对当前海岛缺乏长期储能方式和碳排放量高的问题，建立了包含氢储能系统和海水源热泵的海岛综合能源微网，采用NSGA-III算法综合年化成本、风光损耗率、碳排放三方面求解海岛微网的最佳容量，基于模糊隶属度函数选出综合满意度最大的配置结果，对比一般的海岛微网结构的容量配置结果，本文建立的海岛微网在风光利用率和环保性方面更具优势；优化后典型日各分布式电源的运行曲线验证了优化结果的正确性。

1 海岛综合能源微网简介

1.1 海岛综合能源微网结构模型

海岛的综合能源微网的结构模型如图1所示。光伏太阳能板(photovoltaic, PV)和风力发电机(wind turbine, WT)作为主要出力设备；电池储能电站作为发电侧储能平抑风光出力波动；氢储能系统作为发电侧储能，由制氢设备(hydrogen production equipment, HPE)、氢存储罐(hydrogen storage tank, HST)和氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)组成；燃气轮机(gas turbine, GT)用于岛内紧急供电；海水源热泵(sea source heat pump, SSHP)用于供应岛内热负荷和冷负荷；吸收式制冷机用于回收氢燃料电池和燃气轮机的余热制冷。此外，制氢的副产物氧气也可以用于供给海岛水产养殖企业，发展海岛经济。

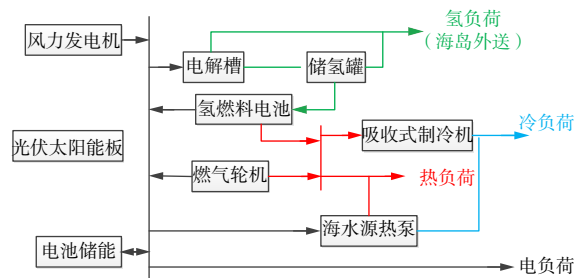


图1 海岛综合能源微网结构

Fig. 1 Island integrated energy microgrid structure

海水源热泵结构模型如图 2 所示。

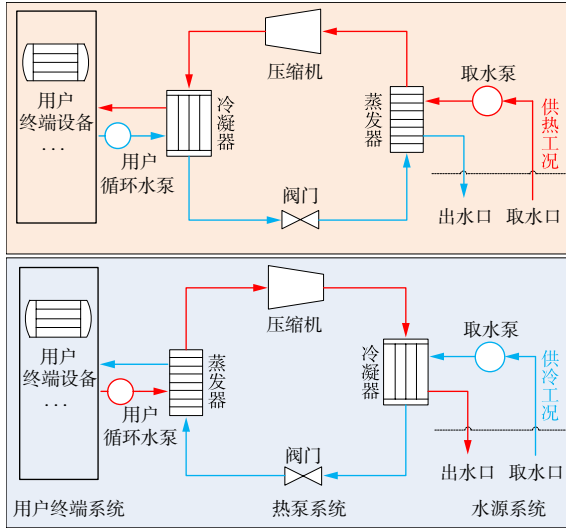


图 2 海水源热泵结构模型图

Fig. 2 Structural model diagram of seawater source heat pump

整个海水源热泵系统由水源系统、热泵系统和用户终端系统组成, 其中水源系统用于给整个系统提供热源或冷源, 热泵系统用于完成热交换过程, 用户终端系统用于分配热、冷能给用户。在供热工况下: 海水经水源系统的取水泵输送至热泵系统蒸发器, 冷却剂在蒸发器中吸收海水热量气化, 再通过压缩机增压, 在冷凝器处放热液化, 用户侧循环水吸收冷却剂的热量后分配给用户供暖, 放热后的冷却剂通过阀门回到蒸发器, 继续下一循环; 供冷工况是供热工况的逆向过程, 气化的冷却剂在冷凝器处放热液化, 经阀门至蒸发器吸收用户循环水中的热量气化, 气化后的冷却剂经压缩机至冷凝器处继续下一循环。

1.2 各出力单元数学模型

风力发电机及光伏太阳能板数学模型如式(1)~(3)所示。

$$P_{WT(t)} = \begin{cases} 0, & V_{(t)} < V_{in} \text{ 或 } V_{(t)} \geq V_{out} \\ P_{rate} \frac{V_{(t)}^3 - V_{in}^3}{V_{rate}^3 - V_{in}^3}, & V_{in} \leq V_{(t)} \leq V_{rate} \\ P_{rate}, & V_{rate} < V_{(t)} < V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{(t)} = V_{sta} \left(\frac{h_{WT}}{h_{sta}} \right)^\gamma \quad (2)$$

$$P_{PV(t)} = P_{rate} f_{pv} \left(\frac{G_{(t)}}{G_{sta}} \right) K \quad (3)$$

式中: $V_{(t)}$ 、 V_{in} 、 V_{out} 、 V_{rate} 分别为 t 时刻的风力发电机桨叶处风速、风力发电机切入风速、切出风速以

及额定风速; P_{rate} 、 $P_{WT(t)}$ 分别为风力发电机额定功率和 t 时刻的输出功率; V_{sta} 、 h_{sta} 、 h_{WT} 分别为风速计所测的风速、风速计安装高度以及风力发电机高度; γ 为摩擦系数, 与风力发电机安装地形有关; $P_{PV(t)}$ 、 P_{rate} 分别为 t 时刻光伏太阳能板的输出功率和额定功率; $G_{(t)}$ 、 G_{sta} 分别为 t 时刻太阳辐射强度和标准辐射强度; K 为温度对光伏太阳能板功率的影响系数; f_{pv} 为板面清洁度影响因子。

电池储能电站的数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} S_{SOC(t)} = S_{SOC(t-1)}(1 - \delta) + P_{bc(t)} \eta_c \Delta t \\ S_{SOC(t)} = S_{SOC(t-1)}(1 - \delta) - \frac{P_{bd(t)}}{\eta_d} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{SOC(t)}$ 、 $S_{SOC(t-1)}$ 分别为储能电池在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的电量状态; $P_{bc(t)}$ 、 $P_{bd(t)}$ 分别为 t 时刻储能电池的充电功率和放电功率; η_c 、 η_d 分别为储能电池的充、放电效率; δ 为电池的自放电系数; Δt 为单位调度区间 1 h。

电解槽的数学模型如式(5)所示。

$$E_{Ech2(t)} = \eta_{EC} P_{EC(t)} \alpha \quad (5)$$

式中: $P_{EC(t)}$ 分别为电解槽 t 时刻的功率; η_{EC} 、 α 分别为电解槽的效率和电氢转化系数; $E_{Ech2(t)}$ 为电解槽 t 时刻的产氢量, kg。

储氢罐的数学模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} H_{HST(t)} = H_{HST(t-1)} + E_{Ech2(t)}(1 - \eta_{loss}) \Delta t \\ H_{HST(t)} = H_{HST(t-1)} - H_{HFCh2(t)} \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中: $H_{HST(t)}$ 、 $H_{HST(t-1)}$ 、 η_{loss} 分别为储氢罐 t 时刻和 $t-1$ 时刻的储存氢量、压缩机耗电量(已转化为氢气损耗率); $H_{HFCh2(t)}$ 为 t 时刻的输送给氢燃料电池的氢气量, kg。

氢燃料电池的数学模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{HFC(t)} = H_{HFCh2(t)} \beta \eta_{e_HFC} \\ H_{HFC(t)} = H_{HFCh2(t)} \beta (1 - \eta_{e_HFC}) \eta_{h_HFC} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{HFC(t)}$ 、 $H_{HFC(t)}$ 分别为 t 时刻氢燃料电池的输出电功率和热功率; η_{e_HFC} 、 η_{h_HFC} 分别为氢燃料电池的电效率和热效率; β 为氢气的低位热值。

海水源热泵的数学模型如式(8)所示。

$$\begin{cases} H_{SSH(t)} = P_{SSH(t)} C_{COP H(t)} \\ C_{SSH(t)} = P_{SSH(t)} C_{COP C(t)} \\ C_{COP H(t)} = a \exp(b T_h + c T_s) + d \frac{T_h}{T_s} + e \\ C_{COP C(t)} = f \exp(g T_c + h T_s) + i \frac{T_s}{T_c} + j \end{cases} \quad (8)$$

式中: $C_{\text{COPH}(t)}$ 、 $C_{\text{COPC}(t)}$ 分别为 t 时刻海水源热泵的制冷制冷能效系数; $H_{\text{SSH}(t)}$ 、 $C_{\text{SSH}(t)}$ 、 $P_{\text{SSH}(t)}$ 分别为 t 时刻海水源热泵的制热量、制冷量和消耗的电量; T_h 、 T_c 、 T_s 分别为供暖季和供冷季平均出水温度以及水源温度; a — j 均为拟合系数。

燃气轮机的数学模型如式(9)所示。

$$\begin{cases} F_{(t)} = \frac{P_{\text{GT}(t)}}{\eta_{\text{e-GT}} L_{\text{CV}}} \\ H_{\text{GT}(t)} = F_{(t)} L_{\text{CV}} (1 - \eta_{\text{e-GT}}) \eta_{\text{h-GT}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{GT}(t)}$ 、 $H_{\text{GT}(t)}$ 为燃气轮机 t 时刻的输出电功率和热功率; $\eta_{\text{e-GT}}$ 、 $\eta_{\text{h-GT}}$ 分别为燃气轮机的电效率和热效率; $F_{(t)}$ 、 L_{CV} 分别为燃气轮机 t 时刻的燃料消耗量和天然气低位热值。

吸收式制冷机的数学模型如式(10)所示。

$$C_{\text{abs}(t)} = C_{\text{COP, abs}} (H_{\text{GT}(t)} + H_{\text{HFC}(t)}) \quad (10)$$

式中 $C_{\text{abs}(t)}$ 、 $C_{\text{COP, abs}}$ 分别为吸收式制冷机 t 时刻的制冷量和能效系数。

2 海岛微网优化模型建立

2.1 目标函数

为保证海岛综合能源微网建设的经济性, 提出目标函数一: 最小化综合年化成本。

$$\begin{cases} f_1 = \min(C) \\ C = C_{\text{inv}} + C_{\text{man}} + C_{\text{rep}} - C_{\text{sub}} + C_{\text{env}} + C_{\text{p}} \\ C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^n k_i N_i A \\ A = \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \\ C_{\text{man}} = \sum_{i=1}^n m_i N_i + \sum_{t=1}^{8760} f_t F_{(t)} \\ C_{\text{rep}} = \sum_{i=1}^n (k_i - k_{\text{rep}}) N_i A \\ C_{\text{sub}} = \sum_{i=1}^n s_i k_i N_i \\ C_{\text{env}} = \sum_{i=1}^n E_i (K_i + P_{\text{pal } i}) \\ C_{\text{p}} = c_{\text{pal}} \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^{8760} l_{\text{lpSP } i(t)} - L_{\text{LPSP } i} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: C 、 C_{inv} 、 C_{man} 、 C_{rep} 、 C_{sub} 、 C_{env} 、 C_{p} 分别为综合年化成本、投资成本、运维损耗成本、设备更换成本、政策补贴、环境成本以及能源断供惩罚。在投资成本中: k_i 、 N_i 、 A 分别为第 i 种分布式电源的

单位装机成本、装机容量和资金回收系数; r 、 n_i 分别为利率和设备使用年限。在运维损耗成本中: m_i 为第 i 种分布式电源的单位容量固定运维损耗成本; f_t 为 t 时刻燃气轮机的工作状态, 取值 0-1 变量, 1 表示燃气轮机机启动, 0 表示未启动。在设备更换成本中: k_{rep} 为第 i 种需要更换设备的残余价值。在政策补贴中: s_i 为第 i 种分布式电源在建设时的政策补贴率。在环境成本中: K_i 为第 i 种排放物的治理成本系数; E_i 为第 i 种排放物的排放量; $P_{\text{pal } i}$ 为第 i 种污染物的罚款金额。在能源断供惩罚中: c_{pal} 、 $l_{\text{lpSP } i(t)}$ 、 $L_{\text{LPSP } i}$ 分别为断供惩罚系数、 t 时刻第 i 种能源断供量和第 i 种能源的全年允许最大能源断供量。

为了保证海岛综合能源微网的风光利用率, 不出现大规模弃风弃光现象, 提出目标函数二: 最小化风光浪费率。

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^{8760} \frac{l_{\text{loss}(t)}}{P_{\text{WT}(t)} + P_{\text{PV}(t)}} \quad (12)$$

式中 $l_{\text{loss}(t)}$ 为 t 时刻弃风光量。

为保证海岛综合能源微网建设的环保性, 提出目标函数三: 最小化碳排放量:

$$f_3 = \min \sum_{t=1}^{8760} E_m P_{\text{GT}(t)} \quad (13)$$

式中 E_m 为燃气轮机单位发电量的碳排放量。

2.2 约束条件

海岛综合能源微网各分布式电源以及优化过程中需满足的约束条件如下。

2.2.1 不等式约束

考虑到岛屿面积等实际情况, 各分布式电源装机有最大最小限制约束。

$$N_i^{\min} \leq N_i \leq N_i^{\max} \quad (14)$$

式中 N_i^{\min} 、 N_i^{\max} 分别为第 i 种分布式电源的最大和最小装机容量。

为保证储能电池的使用寿命, 制定储能电池的相关约束条件如下:

$$\begin{cases} 0.1 S_{\text{SOCmax}} \leq S_{\text{SOC}(t)} \leq 0.9 S_{\text{SOCmax}} \\ 0 \leq S_{\text{SOC}(t)} - S_{\text{SOC}(t-1)} \leq P_{\text{SOCmax}} \end{cases} \quad (15)$$

式中 S_{SOCmax} 、 P_{SOCmax} 分别为储能电池的最大容量以及单位调度时间内最大充放电功率。

电解槽、储氢罐、氢燃料电池的出力约束限制为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{EC(t)} \leq P_{ECmax} \\ 0 \leq P_{EC(t)} - P_{EC(t-1)} \leq E_{ECmax} \\ 0 \leq H_{HST(t)} - H_{HST(t-1)} \leq H_{HSTmax} \\ 0.1V_{HSTmax} \leq H_{HST(t)} \leq V_{HSTmax} \\ 0 \leq P_{HFC(t)} \leq P_{HFCmax} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{ECmax} 、 E_{ECmax} 分别为电解槽的最大输出功率和单位时间的最大可调度功率; H_{HSTmax} 、 V_{HSTmax} 分别为储氢罐单位调度时间的最大充放氢气上限和额定容量; P_{HFCmax} 为氢燃料电池的出力上限。

海水源热泵、燃气轮机、吸收式制冷机的出力约束限制为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{SSHPT(t)} \leq P_{SSHPTmax} \\ 0 \leq P_{GT(t)} \leq P_{GTmax} \\ 0 \leq C_{abs(t)} \leq C_{absmax} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{SSHPTmax}$ 为海水源热泵的最大输入电功率; P_{GTmax} 为燃气轮机的最大出力; C_{absmax} 为吸收式制冷机的出力上限。

此外, 规定储能电池不许同时充放电, 储氢罐不许同时充放氢气。

2.2.2 等式约束

1) 电功率平衡约束

$$P_{WT(t)} + P_{PV(t)} + P_{bd(t)} + P_{GT(t)} + P_{HFC(t)} + E_{lsp(t)} = E_{load(t)} + P_{SSHPT(t)} + P_{EC(t)} + P_{bc(t)} + I_{loss(t)} \quad (18)$$

式中 $E_{load(t)}$ 、 $E_{lsp(t)}$ 分别为海岛 t 时刻的电负荷和电负荷不足量。

2) 热功率平衡约束

$$H_{load(t)} = H_{SSHPT(t)} + H_{HFC(t)} + H_{GT(t)} + H_{lsp(t)} \quad (19)$$

式中 $H_{load(t)}$ 、 $H_{lsp(t)}$ 分别为海岛 t 时刻的热负荷和热负荷不足量。

3) 冷功率平衡约束

$$C_{load(t)} = C_{SSHPT(t)} + C_{abs(t)} + C_{lsp(t)} \quad (20)$$

式中 $C_{load(t)}$ 、 $C_{lsp(t)}$ 分别为海岛 t 时刻的冷负荷和冷负荷不足量。

4) 氢功率平衡约束

$$Q_{load(t)} = Q_{EC(t)} + Q_{HST(t)} + Q_{lsp(t)} \quad (21)$$

式中 $Q_{load(t)}$ 、 $Q_{EC(t)}$ 、 $Q_{HST(t)}$ 、 $Q_{lsp(t)}$ 分别为海岛 t 时刻的氢负荷、电解槽供给氢负荷的氢气、储氢罐供给氢负荷的氢气以及氢负荷不足量。规定各种负荷不足量不得超过全年总量的 1%。

3 模型求解算法

第 2 节所建模型是一个多目标优化问题, 2014 年 Deb 团队提出的 NSGA-III 算法是典型的多

目标求解算法^[28-30], 相较于 NSGA-II 算法, NSGA-III 的核心是采用基于归一化空间参考点距离的选择策略, 使用 NSGA-III 选择策略在求解高维优化问题时, 可以避免算法陷入局部最优。

NSGA-III 中的迭代算法是遗传算法, 引入 pareto 支配理论对生成的子代进行不断更新, 以求最佳的 pareto 前沿解, NSGA-III 算法求解流程如图 3 所示。

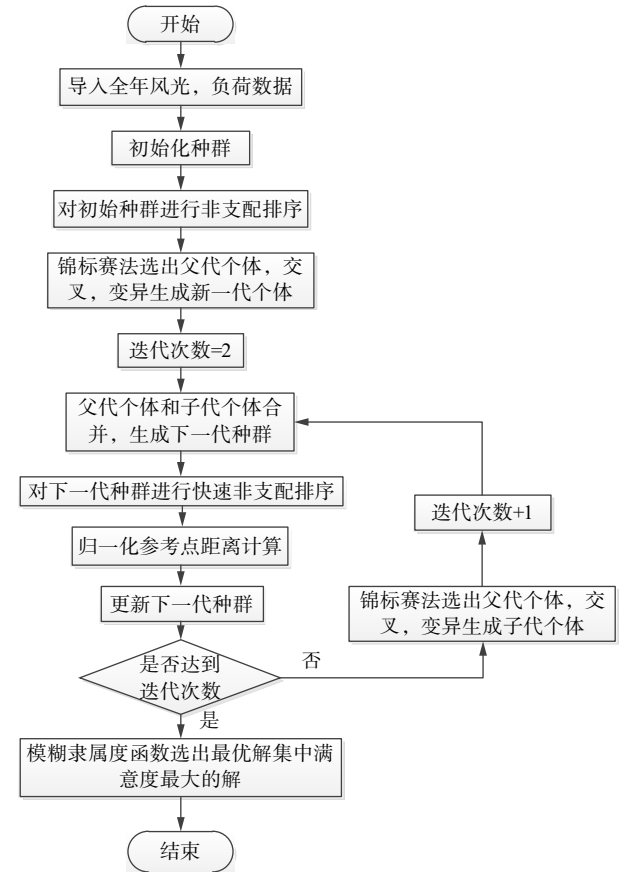


图 3 模型优化求解流程

Fig. 3 Model optimization solution process

对算法优化流程关键步骤说明如下。

1) 种群对应本文分布式电源装机容量的方案集, 种群中每一个个体即为一个分布式电源装机容量方案, 每一个个体的基因型为风电、光伏等各分布式电源的装机容量。

2) 对初始种群根据 pareto 支配理论进行非支配排序后, 通过锦标赛选择法选取排序等级靠前的个体作为父代个体, 父代个体通过模拟二进制交叉和多项式变异操作生成子代个体。

3) 父代和子代组成新种群后, 此时新种群的个

体数往往会超过种群个体数上限。对新种群的目标函数进行归一化处理,采用NSGA-III的选择策略选出有利于种群整体迭代方向的个体进入下一代。

4)迭代完成时输出最优方案集,使用模糊隶属度函数归一化量纲,选出满意度最大的个体(最优配置方案)。其中,模糊隶属度函数定义如下。

$$u_i^n = \begin{cases} 0 & f_i^n < f_{i\min}^n \\ \frac{f_i^n - f_{i\min}^n}{f_{i\max}^n - f_{i\min}^n} & f_{i\min}^n \leq f_i^n \leq f_{i\max}^n \\ 1 & f_i^n > f_{i\max}^n \end{cases} \quad (22)$$

$$U_n = -\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 u_i^n \quad (23)$$

式中: u_i^n 、 U_n 分别为第 n 个个体的第 i 个目标函数的满意度和第 n 个个体的综合满意度; f_i^n 、 $f_{i\min}^n$ 、 $f_{i\max}^n$ 分别为第 n 个个体的第 i 个目标函数值、第 i 个目标函数的最小值、最大值。

4 案例分析

4.1 算例参数

本文仿真计算参考我国东海某小型海岛条件,7—8月份为该岛旅游季,总负荷水平全年最高。风光、负荷数据采用全年 8 760 h 的仿真数据。其中,风速、太阳辐射强度参考文献[4]。全年模拟风光光照和东海月平均水温如图 4 所示,全年电、热、冷负荷和日氢负荷如图 5 所示。

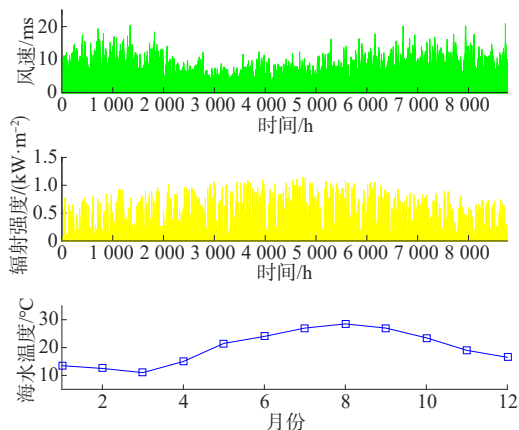


图 4 风光数据及海水温度

Fig. 4 Wind solar data and sea temperature

由图 4—5 可以看出,海岛风速夏季低而冬季高,光照强度夏季高而冬季低;总负荷夏冬季高、春秋低;风光出力和海岛负荷均呈现明显的季节

性。此外,图 4 中风光曲线存在光照强度过低或风速过低的极限场景,对应阴天或者无风等情况,如果仅采用单一典型日数据进行算例仿真,会忽略季节效应以及极限场景,所得优化结果将产生很大误差,因此本文仿真算例选用全年数据考虑了不确定性和季节效应。所用各分布式电源设备的投资成本、技术参数如表 1 所示。

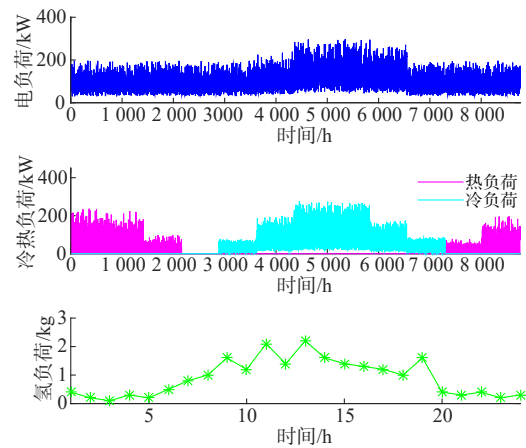


图 5 负荷曲线

Fig. 5 Load curve

表 1 中的成本均为考虑政策补贴后的成本,各种排放污染物罚款参考文献[31],储能电池参数参考钜大锂电公司的电池参数;燃气轮机的成本参考文献[14],技术参数参考 Capstone 公司 C65 微型燃气轮机参数;氢储能系统成本以及技术参数数据参考文献[13],其中考虑到电解槽制氢所需水处理装置,电解槽成本取 2 000 元/kW;热泵配套设备成本参考文献[32]的算例数据,考虑到海水的预处理成本和设备腐蚀情况,海水源热泵投资成本取 1.5 万元/kW,拟合参数和出水口平均水温参考文献[21]数据;年固定运维成本取投资成本的 2%,利率为 5%,工程年限为 20 a。

海岛实施海水源热泵工程有以下优势:水源充足,无需为寻求水源铺设长管道以及建设大容量泵站,减少投资成本;其次,东海全年水温均在 0℃ 以上,无需考虑管道结冰问题,海洋表层(深度 0~0.5 m)水温受太阳辐射影响,日温度变化幅度较大,因此东海岛屿海水源热泵水源取水深度范围在 0.5~50 m^[21],此外也可以建造沙滩井以保证水源质量。

表 1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameters

设备	技术参数	数值
风电机组	切入风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3
	切出风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	20
	额定风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	11
	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	8 000
	高度/m	10
	使用寿命/a	20
分布式光伏	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	2 000
	使用寿命/a	20
储能电池	成本/($\text{元}\cdot\text{kWh}^{-1}$)	3 000
	电池效率	0. 98
	逆变器效率	0. 9
	最大放电速率/($\%/ \cdot \text{h}^{-1}$)	0. 25
	使用寿命/a	15
燃气轮机	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	6 500
	电效率	0. 3
	热效率	0. 6
	使用寿命/a	20
电解槽	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	2 000
	效率	0. 7
	使用寿命/a	15
储氢罐	成本/($\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$)	3 000
	压缩损耗率	0. 03~0. 07
	最大充放速率	0. 3 V_{HSTmax}
	使用寿命/a	20
氢燃料电池	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	3 200
	电效率	0. 5
	热效率	0. 6
	使用寿命/a	5
海水源热泵	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	15 000
	使用寿命/a	20
吸收式制冷机	成本/($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$)	1 200
	能效系数	1. 2
	使用寿命/a	20

4.2 容量配置优化结果分析

在容量优化配置的求解中, 为了验证本文所提出海岛微网结构的先进性, 设以下 3 个方案, 分别用 NSGA-III 算法进行求解。

方案 1: 海岛微网结构为普通的“风-光-柴-

储”配置形式, 供能方式为单一供电, 居民供暖供冷采用空调。

方案 2: 海岛微网结构在方案 1 的基础上引入氢储能系统, 供能方式为电-氢联供, 居民供暖供冷采用空调。

方案 3: 在方案 2 的基础上引入海水源热泵和吸收式制冷机, 即本文所建海岛微网结构, 供能方式为电-氢-冷-热多能联供, 居民供暖供冷采用图 1 中所示方式。

3 种方案优化配置满意度最大的配置形式如表 2 所示。

表 2 容量配置结果

Tab. 2 Capacity configuration results

设备参数	方案 1	方案 2	方案 3
风电装机/kW	340	270	250
分布式光伏/kW	620	790	780
储能电池/kWh	1 800	780	580
燃气轮机/kW	330	315	250
电解槽/kW	0	435	500
储氢罐/kg	0	1 428	1 320
氢燃料电池/kW	0	228	200
海水源热泵/kW	0	0	60
吸收式制冷机/kW	0	0	50

3 种方案容量配置结果目标函数值如表 3 所示。

表 3 目标函数值

Tab. 3 The objective function value

参数	方案 1	方案 2	方案 3
年化成本/万元	174. 20	248. 37	228. 41
弃风光率/%	20. 38	6. 02	5. 95
年碳排放量/t	33. 03	8. 84	2. 44

方案 1 和方案 2 的年弃风光率分别为 20. 38% 和 6. 02%, 年碳排放量分别为 33. 03 t 和 8. 84 t, 可以明显看出, 氢储能系统能有效减少弃风光率和碳排放量, 而方案 3 的年弃风光率为 5. 95%, 年碳排放量仅为 2. 44 t, 这说明本文所提微网结构在提高风光利用率和降低碳排放方面具有显著的优越性。同时, 海水源热泵的应用降低了海岛全年负荷的峰谷差异, 方案 3 对储能电池、储氢罐、氢燃料电池和燃气轮机的容量需求减小, 因此方案 3 的年化成本较方案 2 低 19. 96 万元, 节省的成本主要是海水源

热泵带来的低碳收益以及节省的其余分布式电源的投资。

最后,对比方案1、方案2,方案3的目标函数值,年化成本与弃风光率以及碳排放是矛盾的,如果要降低碳排放,就需要提高风光装机容量,而大容量的风电光伏难免会产生大规模弃风弃光,若要减少弃风弃光需要装设大容量的储能,大容量的储能会带来高额的成本。

4.3 后续运行结果分析

为了验证优化结果的正确性,选取春秋典型日电调度曲线,日氢调度曲线,夏季典型日冷调度和冬季典型日热调度,对上述调度的功率曲线进行绘制,如图6—9所示。

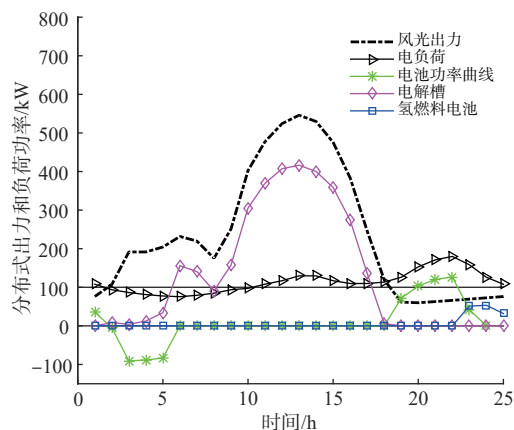


图6 春秋季节电调度曲线

Fig. 6 Spring and autumn electricity dispatch curves

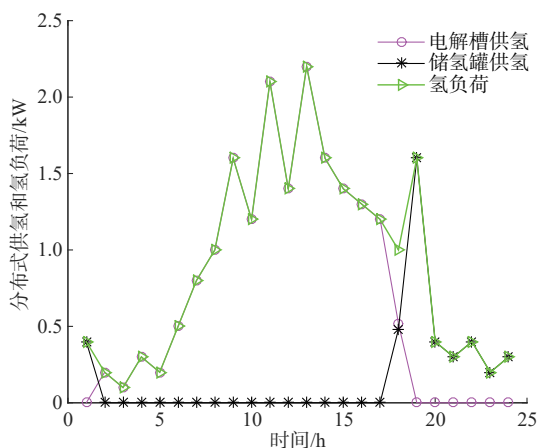


图7 春秋季节氢调度曲线

Fig. 7 Spring and autumn hydrogen dispatch curves

由图6—9的调度运行曲线可知,各分布式出力完全满足功率平衡以及各分布式电源出力约束,

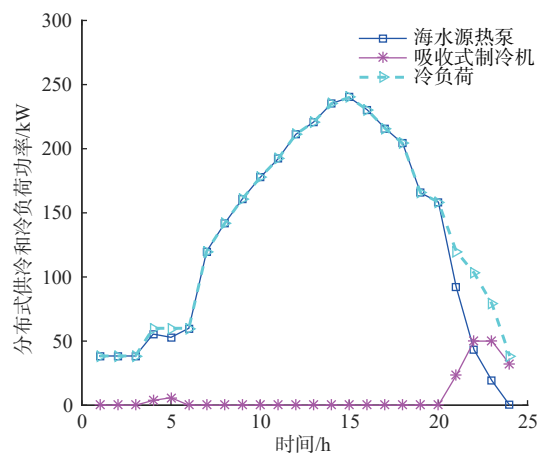


图8 夏季冷调度曲线

Fig. 8 Summer cold dispatch curves

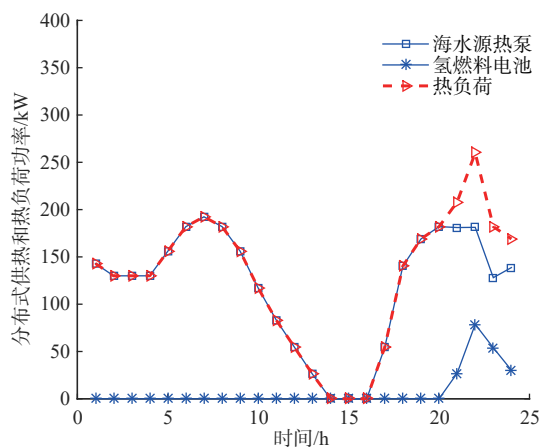


图9 冬季热调度曲线

Fig. 9 Winter heat dispatch curves

这说明本文的优化结果是准确的。在春秋季节典型日的电调度曲线中:储能电池在03:00—05:00时风光出力过剩时消纳多余电量,电池充满后,启动电解槽继续消纳多余风光出力,在19:00—24:00时风光出力不足以供给负荷时,储能电池放电供电,23:00—24:00时储能电池电量不足,启动氢燃料电池继续供电;

在春秋季节的氢调度曲线中,在02:00—17:00时风光出力过剩时电解槽直接制氢供给氢负荷,多余的氢气存在储氢罐中,在18:00—次日01:00时,风光出力不足,由储氢罐继续供给氢负荷。

在夏季冷调度曲线中,冷负荷在00:00—19:00时主要由海水源热泵供给,21:00—24:00时由海水源热泵和吸收式制冷机共同供给,因为在晚间负荷高峰期,电池电量耗尽后,由氢燃料电池进行供

电,同时吸收式制冷机吸收氢燃料电池的余热进行制冷,最大化能量利用。

在冬季热调度曲线中,热负荷在01:00—20:00时完全由海水源热泵供给,在21:00—24:00时由海水源热泵和氢燃料电池的余热共同供给。

对微网全年运行情况进行分析,储氢罐内氢气全年变化、燃气轮机全年出力曲线以及全年弃风弃光分布情况分别如图10所示,假设储氢罐内初始氢气存量为储氢罐上限的50%。

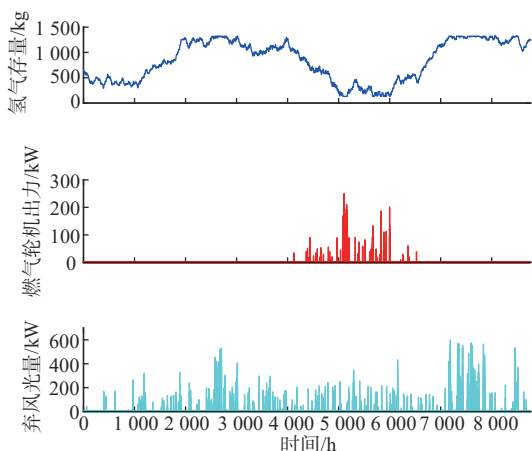


图10 海岛微网全年运行情况

Fig. 10 Yearly operation of island microgrid

由图10全年氢气存量可以看出,在1—1 000 h储氢罐内氢气存量略有下降,此时对应海岛冬季,此阶段居民热负荷需求全年最高,氢燃料电池消耗储氢罐内的氢气参与调度;1 000—3 000 h对应海岛春季,此阶段总体负荷水平较低,风光发电过剩,电解槽出力制氢,氢气存量逐步上升;3 000—6 000 h逐渐进入夏季,此阶段居民冷需求以及旅游季游客的登岛带来的额外电负荷需求给海岛供能带来压力,在负荷高峰期,氢燃料电池发电上限不足以满足负荷需求,燃气轮机开始频繁参与调度,在5 000 h左右氢气存量降至最低水平;6 000 h后对应海岛秋冬季,总负荷水平下降,风速逐步升至全年最高水平,风光发电过剩,此阶段电解槽出力制氢,氢气存量上升。

在2 000—3 000 h以及7 000—8 000 h阶段,海岛全年弃风弃光情况较为严重,这两个阶段分别对应春季低负荷时期以及冬季高风速时期。此外,夏季阶段主要对应弃光现象,夏季光照辐射强度和负荷水平全年最高,在白天光伏发电冗余高于电解槽

出力上限,导致弃光;夜间负荷水平高于储能电池和氢燃料电池的调峰上限,需要燃气轮机参与调度,导致夏季高碳排放水平。

经过一年8 760 h的运行后,储氢罐内氢气存量升高,而且本文还考虑了海岛外送氢负荷,这说明在本文的优化结果条件下,海岛可以实现氢能自给自足。从弃风光和燃气轮机出力分布来看,可以考虑对现有氢负荷进行时域上的转移:将夏季4 000—6 000 h时段氢负荷转移至春季2 000—3 000 h时段和冬季7 000—8 000 h时段,消纳这两个阶段过高的风光出力,同时对夏季总负荷进行削减,降低燃气轮机参与调度的频率。除夏季4 000—6 000 h时段,海岛微网在其余时段实现了“零碳”运行,增加储氢罐和氢燃料电池容量可进一步延长“零碳”运行时间,但同时年化成本也会增加,无法保证经济性。

4.4 海岛微网新能源发电侧经济性分析

由于当前风电、光伏、储能等新能源主体在面对传统发电主体时并不具备经济优势,因此针对4.2节容量优化配置的结果对新能源发电侧的全年预计收益进行计算,以便在当前海岛微网建设上给出一定的政策参考。陆上大规模新能源发电上网电价为0.365元/kW,氢气售价为50元/kg,微网购热价为0.3元/kW,各新能源主体全年预计收益如表4所示。

表4 分布式电源全年预计收益

Tab. 4 Estimated full-year revenue of distributed power

成本及收益	风电	光伏	储能电池	万元
				氢储能
年化成本	20.00	15.60	27.84	92.48
预计收益	32.65		4.90	50.58
盈利	-2.95		-22.94	-41.90

由表4结果可知,风光场全年总收益为-2.95万元,储能电池全年增加风光场售电收益4.90万元,氢储能增加售电、热、氢收益50.58万元,然而考虑到储能的年化成本,新能源发电侧总体全年总收益为-67.79万元,因此在当前陆上新能源上网电价条件下,在海岛微网新能源发电侧安装储能不具备经济效益,仍需要一定的政策补贴。在本文的算例条件下,待到上网电价为0.932元/kW,即电价补贴为0.566元/kW时,发电侧总体达到新能源发电侧的年售电收益可以抵消储能的年化成本,在上网

电价为 2.51 元/kW 时, 即电价补贴为 2.15 元/kW 时, 发电侧储能带来的额外售电收益与储能的年化成本持平。

5 结论

本文针对当前海岛微网规划建设中存在的缺少长期储能方式以及碳排放过高问题, 提出了一种结合氢储能和海水源热泵的综合能源海岛结构, 以年化成本最小、弃风光率最小和碳排放量最小为目标函数, 在分布式电源不等式约束和功率平衡的前提下, 基于我国东海某岛屿情况, 对综合能源海岛分布式电源进行容量优化配置。本文的主要结论如下。

1) 本文所构建的海岛综合能源微网相较于传统“风光柴储”结构模式的海岛微网, 其全年弃风光率和碳排放量分别减少了 14.43% 和 30.59 t; 相较于只结合氢储能的微电网, 其年化成本、弃风光率和碳排放量分别减少了 19.96 万元、0.07% 和 6.4 t。这充分说明了本文所提出的海岛综合能源微网的优越性, 改善了我国海岛单一供能局面, 符合我国能源发展方向。

2) 后续的典型日调度曲线满足各分布式能源的不等式约束和功率平衡约束; 根据全年运行结果, 除夏季负荷高峰期外, 剩余时段海岛综合能源微网可以实现“零碳”运行。

3) 当前我国储能系统成本过高, 尚不具备大规模商业化水平, 仍需要一定的政策支持, 按照当前 0.365 元/kW 的新能源上网电价, 新能源发电侧总体每年亏损 69.79 万元, 但当上网电价补贴达到 0.566 元/kW 时, 新能源发电侧总体达到收支平衡。

本文的研究可为今后海岛综合能源微网的建设和发展提供理论参考, 值得指出的是本文所提储能方为发电侧储能, 完全跟随微网调度指令, 缺乏一定的调度灵活性, 但随着技术进步和政策完善, 以新能源为主体的综合能源系统发展会更加迅速, 成本也会进一步下降, 同时不同新能源主体之间的利益冲突问题也会进一步加剧, 如何解决这种利益冲突需要进一步开展研究。

参考文献

- [1] 林湘宁, 陈冲, 周旋, 等. 远洋海岛群综合能量供给系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 98 – 109.
LIN Xiangning, CHEN Chong, ZHOU Xuan, et al. Integrated energy supply system of pelagic clustering islands [J]. Proceed-

- ings of the CSEE, 2017, 37(1): 98 – 109.
- [2] 雷金勇, 白浩, 马溪原, 等. 南方电网多能互补海岛微电网综述及展望[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 27 – 34.
LEI Jinyong, BAI Hao, MA Xiyuan, et al. Summary and prospect of multi-energy complementary island microgrid developed by China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 27 – 34.
- [3] 王盼宝, 徐殿国, 谭岭玲, 等. 基于改进 MOPSO 的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 130 – 140.
WANG Panbao, XU Dianguo, TAN Lingling, et al. Multiple optimal operation strategy of multi-energy complementary microgrid [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 130 – 140.
- [4] 赵璞, 潘乐真. 考虑联络线利用率与储能寿命特性的海岛微电网优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(20): 48 – 55.
ZHAO Pu, PAN Lezhen. Optimal operation strategy of island microgrid considering tie-line utilization and energy storage life characteristics [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(20): 48 – 55.
- [5] OMAR H, KANDAR B. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids [J]. Renewable Energy, 2012, 45(9): 7 – 15.
- [6] ZHAO B, CHEN J, ZHANG L, et al. Three representative island microgrids in the East China Sea: Key technologies and experiences [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018(96): 297 – 304.
- [7] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102 – 112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/ storage and seawater desalination load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102 – 112.
- [8] 汪致洵, 林湘宁, 刘畅, 等. 基于光热电站水电联产的独立海岛综合供给系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5192 – 5203.
WANG Zhixun, LIN Xiangning, LIU Chang, et al. Optimal planning of integrated supply system in independent islands based on cogeneration of concentrating solar power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5192 – 5203.
- [9] 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.
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.
- [10] 随权, 武传涛, 魏繁荣, 等. 基于储电船舶的远洋海岛群多能流优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1137 – 1148.
SUI Quan, WU Chuantao, WEI Fanrong, et al. Multienergy flow optimization dispatch based on electric vessel in pelagic clustering islands [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1137 – 1148.
- [11] 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 – 945.
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): 932–945.
- [12] DIMITRIS A K, BJARTI T, IRINI D, et al. Faroe islands: towards 100% R. E. S. penetration [J]. Renewable Energy, 2019, 135(5): 473–484.
- [13] WEI C, LI G, PEI A, et al. A manganese-hydrogen battery with potential for grid-scale energy storage [J]. Nature Energy, 2018, 3(5): 428–435.
- [14] 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 等. 余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4650–4659.
- SUN Cai, LI Qi, QIU Yibin, et al. Economic evaluation of whole life cycle of the micro-grid system under the mode of residual power connection/hydrogen production [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4650–4659.
- [15] 许传博, 赵云灏, 王晓晨, 等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 11–18.
- XU Chuanbo, ZHAO Yunhao, WANG Xiaochen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage for wind and solar power stations considering electricity-hydrogen coupling under carbon neutrality vision [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 11–18.
- [16] 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(S1): 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(S1): 133–144.
- [17] LI B. Build 100% renewable energy based power station and microgrid clusters through hydrogen-centric storage systems [C]//2020 4th International Conference on HVDC, November 6, 2020, Xian, China, New York: IEEE, 2020: 1253–1257.
- [18] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486–495.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486–495.
- [19] 丁苏阳, 林湘宁, 陈哲, 等. 资源富集岛蓄-氢-冷联合可再生能源消纳系统设计及调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4659–4673.
- DING Suyang, LIN Xiangning, CHEN Zhe, et al. A design and dispatch strategy of storage-hydrogen-cooling combined renewable energy absorption facility on rich resource island [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4659–4673.
- [20] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11–20.
- LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11–20.
- [21] HENRIK P, TORBEN O, BRIAN E, et al. Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating [J]. Energy, 2019, 176(1): 156–170.
- [22] SU C, HATEF M, LIU H, et al. Seawater heat pumps in China, a spatial analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2020(203): 112240.
- [23] ZOU S H, XIE X K. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112(10): 201–207.
- [24] JIA X, DUANMU L, SHU H W. Effect of seawater intake methods on the performance of seawater source heat pump systems in cold climate areas [J]. Energy and Buildings, 2017, 153(10): 317–324.
- [25] JULIAN D H, EDWARD B, ANTONIO S S. Technical potential and cost estimates for seawater air conditioning [J]. Energy, 2019, 166(10): 979–988.
- [26] 杨志鹏, 张峰, 梁军, 等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1736–1742.
- YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of cchp microgrid with heat pump and energy storage [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1736–1742.
- [27] 崔杨, 姜涛, 仲悟之, 等. 电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 1–7.
- CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Economic dispatch approach of RIES for electric vehicle and heat pump to promote wind power accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 1–7.
- [28] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577–601.
- [29] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 602–622.
- [30] YE T, RAN C, Xingyi Z, et al. Plat EMO: a MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization educational forum [J] IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 73–87.
- [31] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11–15.
- QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11–15.
- [32] 赖道新. 地表水源热泵系统全寿命周期成本分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

收稿日期: 2022-08-11; 网络首发日期: 2022-11-30

作者简介:

邢晓敏(1973), 女, 教授, 硕士, 研究方向为智能配电网关键技术, Teacherxing@163.com;

杜钧洪(1999), 男, 硕士研究生, 学士, 研究方向为微电网容量及运行优化, 1326324722@qq.com;

李贻涛(1974), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为智能配电网关键技术, lytxxm@163.com。