

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306027

考虑碳排放的孤岛综合能源系统 多目标规划优化

王晓鹰¹, 徐 婧¹, 杨兆宇¹, 冯 征²

(1.太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2.国家电投集团综合智慧能源科技有限公司, 北京 100032)

[摘 要] 针对孤岛依赖传统化石能源供能引起的污染及碳排放高的问题, 提出了一种考虑碳排放的孤岛综合能源系统多目标规划优化方法。在构建设备模型的基础上, 考虑气候参数波动对可再生能源出力的影响, 逐时模拟系统全年运行情况, 以系统的生命周期成本及生命周期二氧化碳排放为优化目标, 结合非支配排序遗传算法 II 构建了孤岛综合能源系统多目标规划优化模型, 采用加权平均算子对优化结果决策; 以烟台某孤岛为例, 分析了以典型日和全年逐时数据作为模型输入对规划结果的影响, 探究了可再生能源设备投资变化和天然气价格以及风光装机和蓄电池容量对优化目标的影响, 获得了不同目标权重下各设备的最优容量。结果表明, 配置可再生能源及蓄电池可使生命周期二氧化碳排放降低 26.95%~55.96%, 但当生命周期二氧化碳排放权重由 0.6 增至 1.0 时, 主要依赖增加蓄电池装机容量降低碳排放, 生命周期成本增加 210.13%, 而生命周期二氧化碳排放仅降低 8.59%。该孤岛综合能源系统规划方法为决策者在孤岛规划综合能源系统时权衡低碳成本和能源供应经济性提供了参考。

[关 键 词] 孤岛综合能源系统; 规划优化; 生命周期成本; 二氧化碳排放; 非支配排序遗传算法 II

[引用本文格式] 王晓鹰, 徐婧, 杨兆宇, 等. 考虑碳排放的孤岛综合能源系统多目标规划优化[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 129-137. WANG Xiaoying, XU Jing, YANG Zhaoyu, et al. Research on multi-objective planning optimization of islanded integrated energy system concerning carbon emissions[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 129-137.

Research on multi-objective planning optimization of islanded integrated energy system concerning carbon emissions

WANG Xiaoyin¹, XU Jing¹, YANG Zhaoyu¹, FENG Zhen²

(1.College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. SPIC Integrated Smart Energy Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Aiming at the problems of pollution and high carbon emissions caused by island dependence on diesel energy supply, an islanded integrated energy system multi-objective planning optimization method considering carbon emission was proposed. Based on the construction of equipment model, the annual operation of the system was simulated hourly considering the influence of the climate fluctuation on the output of renewable energy devices, the life cycle costs and life cycle carbon dioxide emissions was taken as the optimization objectives, the multi-objective planning optimization model of islanded integrated energy system was constructed by combining with non-dominated sorting genetic algorithm II, the weighted arithmetic averaging operator was used to make decisions on the optimization results. An island area in Yantai was taken as an example, the influence of typical day and annual hourly data as input on planning results, the influence of investment changes in renewable energy devices and natural gas prices, as well as wind power and photovoltaic installed capacity and battery capacity on

修回日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51906171)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51906171)

第一作者简介: 王晓鹰 (1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域综合能源系统规划及运行优化, wangxy95@foxmail.com。

通信作者简介: 徐婧 (1989), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为区域综合能源系统能效分析与优化, xujing@tyut.edu.cn。

optimization objectives were analyzed. By multi-objective planning optimization of the study area, the optimal capacity of each device under different target weights was obtained. The results showed that the configuration of renewable energy and battery can reduce the life cycle carbon dioxide emissions by 26.95% -55.96%. But when the life cycle carbon dioxide emissions weight was increased from 0.6 to 1, the carbon dioxide emissions were reduced by increasing the battery capacity. At this time, life cycle costs increased by 210.13% and life cycle carbon dioxide emissions only decreased by 8.59%. The proposed island integrated energy system planning method provides a reference for decision makers to balance low carbon cost and energy supply economy when planning islanded low carbon IES.

Key words: islanded integrated energy system; planning optimization; life cycle costs; carbon dioxide emissions; non-dominated sorting genetic algorithm II

随着“双碳”目标的提出,进一步加快了绿色供能系统的建设进程^[1]。但是山区及海岛等偏远地区多依靠柴油供能^[2],存在污染严重,碳排放高的问题,在这些区域构建综合利用太阳能、风能等清洁能源的低碳综合能源系统(integrated energy system, IES)对推动我国能源转型有重要意义^[3-6]。国内外学者已在系统结构、优化算法、优化目标等方面对孤岛 IES 的规划做了一定研究。文献[7]设计了孤岛式液化天然气冷热电三联供系统。文献[8]就具体区域的柴油混合可再生能源及电池发电系统可行性进行了分析。文献[9]采用人工蜂群算法,以系统的年使用成本作为优化目标,优化了孤岛式柴油机混合可再生能源系统的配置。文献[10]考虑社会及居民的用能成本,采用双层优化模型优化孤岛柴油机/太阳能/储能的 IES,获得了位于偏远岛屿的独立多发电电源系统的最优规划及运行情况。文献[11]将海水淡化纳入到海岛 IES 设计规划中以提高可再生能源的消纳,同时利用光伏运行中的产热实现了冷、热、电三联供。文献[12]和文献[13]采用一种改进灰狼优化算法,以年均系统成本最小为优化目标优化了风光柴蓄混合发电系统各设备容量。

上述研究中多以投资及用能经济性为目标,并未直接将 CO₂ 排放量纳入优化目标,规划的方案不能满足区域低碳供能的需要;且规划中仅以区域典型日的气候数据作为参考,未考虑全年气候波动对规划的影响,设计的系统在极端气候条件下存在能源供应不足的问题,不能保证供能系统的可靠性。

针对上述问题,本文提出一种考虑碳排放的孤岛 IES 多目标规划优化方法,以 IES 设备数学建模为基础,以孤岛全年的历史气候参数为依托,考虑全年气候波动的边界条件,逐时模拟系统全年运行情况,以生命周期成本(life cycle costs, LCC)和生命周期二氧化碳排放量(life cycle CO₂ emissions, LCE)为优化目标构建孤岛 IES 多目标规划优化模型,结合加权平均算子(weighted

arithmetic averaging operator, WAA)与非支配排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)进行寻优,分析不同目标权重下的各供能设备的容量配置,为决策者在规划孤岛低碳 IES 时权衡低碳成本和能源供应经济性提供参考。

1 孤岛 IES 结构及设备模型

构建孤岛 IES 是以满足孤岛电、热、冷的用能需求为目标,以最大程度的实现可再生能源消纳为背景,通过对不同种类供能设备容量的科学规划,协同考虑能源转换单元的出力约束、效率特性、碳排放等问题,实现孤岛 IES 的低碳经济供能。典型的孤岛 IES 结构如图 1 所示。由于可再生能源出力具有波动性^[14],在配置可再生能源设备的基础上,配置燃气轮机等设备实现孤岛区域的电热冷联供。

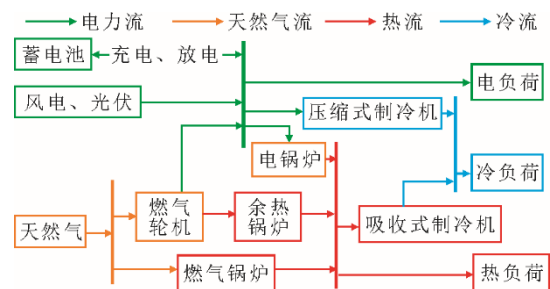


图 1 典型孤岛 IES 结构

Fig.1 The structure of islanded integrated energy system

孤岛 IES 中供能设备的数学模型如下。

光伏发电模型为^[15]:

$$P_{PV} = \eta_{PV,STC} A_{PV} G_g \times \left[1 + \frac{\mu}{\eta_{PV,STC}} (T_a - T_{STC}) + \frac{\mu}{\eta_{PV,STC}} \times \frac{9.5}{5.7 + 3.9v} \frac{(T_{NOC} - 20)}{800} (1 - \eta_{PV,STC}) G_g \right] \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为光伏系统每小时的输出功率, kW; $\eta_{PV,STC}$ 为光伏组件在标准测试条件下的效率; A_{PV} 为在阵列功率峰值的光伏阵列面积, 取 1 m²; G_g 为太阳总辐射强度, kW/m²; μ 为输出功率的温度系数,

取 $-0.0064/^\circ\text{C}$; T_a 为环境温度, $^\circ\text{C}$; T_{STC} 为标准测试条件下的温度, 为 25°C ; v 为风速, m/s ; T_{NOC} 为标准工作单元的温度, 为 45°C 。

风电机组的功率输出 P_{WT} (kW) 为^[16]:

$$P_{\text{WT}} = \begin{cases} 0 & , v < v_i \\ \eta_m \eta_e \rho A_{\text{WT}} C_p \frac{v^3}{2} & , v_i < v < v_r \\ P_{\text{WT,r}} & , v_r < v < v_0 \\ 0 & , v > v_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_i 、 v_r 和 v_0 为风力特征曲线的切入、额定和切出速度, 分别取 3、10、20 m/s ; η_m 、 η_e 为风电机组的机械效率和发电效率, 分别取 0.80、0.95; ρ 为空气密度, 取 1.225 kg/m^3 ; A_{WT} 为转子面积, m^2 ; C_p 为动力系数, 取 0.4; $P_{\text{WT,r}}$ 为风力发电机额定功率, kW。

布置蓄电池可促进可再生能源的消纳, 根据以下方程计算电池荷电状态。

充电过程:

$$S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t) = S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t - \Delta t) [1 - \delta_{\text{sd}}] + \eta_B P_{\text{in}} \Delta t \quad (3)$$

放电过程:

$$S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t) = S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t - \Delta t) [1 - \delta_{\text{sd}}] - \eta_B P_{\text{out}} \Delta t \quad (4)$$

式中: $S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t)$ 为 t 时段结束时蓄电池的剩余电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $S_{\text{SOC}_{\text{bat}}}(t - \Delta t)$ 为第 $t - \Delta t$ 个时段结束时蓄电池的剩余电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; t 为计算参数时的时间步长, h ; δ_{sd} 为 Δt 时间段蓄电池的自放电率, 取 $0.002/\text{h}$; η_B 为电池组的效率; P_{in} 为充电功率, kW; P_{out} 为放电功率, kW; Δt 为充放电时间, h 。

燃气轮机发电功率 P_{GT} (kW) 及热功率 Q_{GT} (kW) 的数学模型可描述如下:

$$P_{\text{GT}} = \frac{1}{3600} \eta_{\text{GT,e}} V_{\text{g,GT}} q_{\text{g}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{GT}} = \frac{1}{3600} \eta_{\text{GT,h}} V_{\text{g,GT}} q_{\text{g}} \quad (6)$$

式中: $\eta_{\text{GT,e}}$ 为燃气轮机的发电效率; $V_{\text{g,GT}}$ 为燃气轮机天然气消耗率, m^3/h ; q_{g} 为天然气热值, 取 38931 kJ/m^3 (标况下); $\eta_{\text{GT,h}}$ 为燃气轮机的制热效率。

燃气轮机变工况特性为^[17]:

$$\eta_{\text{GT,e}} = \eta_{\text{GT,e,N}} (0.0888 + 0.0241 f_{\text{GT}} - 2.3328 \times 10^{-4} f_{\text{GT}}^2 + 8.4143 \times 10^{-7} f_{\text{GT}}^3) \quad (7)$$

$$\eta_{\text{GT,h}} = \eta_{\text{GT,h,N}} (1.0459 - 0.0013 f_{\text{GT}} + 8.7403 \times 10^{-6} f_{\text{GT}}^2) \quad (8)$$

式中: $\eta_{\text{GT,e,N}}$ 、 $\eta_{\text{GT,h,N}}$ 分别为燃气轮机的额定发电效率、额定热效率; f_{GT} 为燃气轮机的负荷率。

余热锅炉、电锅炉及燃气锅炉的数学模型如下:

$$Q_{\text{WB}} = \eta_{\text{WB}} Q_{\text{GT}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{EB}} = \eta_{\text{EB}} P_{\text{EB}} \quad (10)$$

$$Q_{\text{GB}} = \frac{1}{3600} \eta_{\text{GB}} V_{\text{g}} q_{\text{g}} \quad (11)$$

式中: Q_{WB} 为余热锅炉输出热功率, kW; η_{WB} 为余热锅炉的运行效率; η_{EB} 为电锅炉的运行效率; Q_{EB} 为电锅炉输出热功率, kW; P_{EB} 为输入电锅炉的电功率, kW; Q_{GB} 为燃气锅炉热功率, kW; η_{GB} 为燃气锅炉的运行效率; V_{g} 为燃气轮机天然气消耗率, m^3/h 。

吸收式制冷机和压缩式制冷机的数学模型如下:

$$Q_{\text{AC}} = C_{\text{COPAC}} Q_{\text{AC,H}} \quad (12)$$

$$Q_{\text{EC}} = C_{\text{COPEC}} P_{\text{EC}} \quad (13)$$

式中: Q_{AC} 为吸收式制冷机的制冷功率, kW; $Q_{\text{AC,H}}$ 为吸收式制冷机的输入热功率, kW; C_{COPAC} 为吸收式制冷机的制冷系数; Q_{EC} 为压缩式制冷机的制冷功率, kW; P_{EC} 为压缩式制冷机输入电功率, kW; C_{COPEC} 为压缩式制冷机的制冷系数。

2 孤岛 IES 多目标规划优化模型及决策方法

本文提出的考虑碳排放的孤岛 IES 多目标规划优化方法流程如图 2 所示。在对孤岛 IES 系统设备建模的基础上, 将光伏、风电、蓄电池容量和区域气候负荷数据作为多目标规划优化模型的边界输入, 逐时模拟系统运行, 以 LCC 和 LCE 为优化目标, 基于 NSGA-II 算法进行多目标规划优化得到 Pareto 解集, 结合基于加权算术平均算子的决策方法得到不同优化目标权重下的推荐方案。

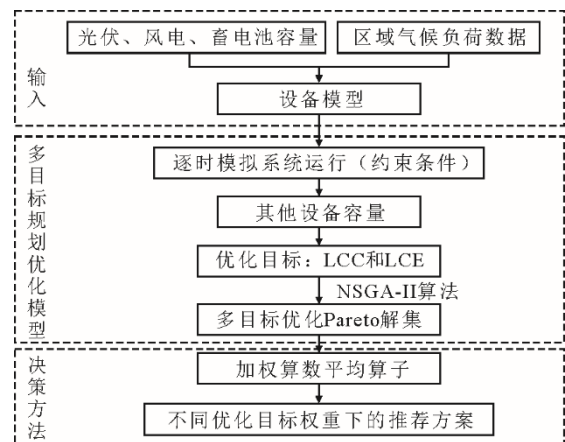


图 2 考虑碳排放的孤岛 IES 多目标规划优化方法流程
Fig.2 Flow chart of the IES multi-objective planning optimization method considering carbon emission

2.1 孤岛 IES 系统运行策略

在规划优化中通过逐时模拟系统全年运行情况的方式对系统各设备定容。

其中，光伏、风电和蓄电池的容量为规划的变

量，燃气轮机、余热锅炉、电锅炉、燃气锅炉、吸收式制冷机和压缩式制冷机的容量取模拟运行过程中最大出力为设备容量。图3为孤岛 IES 规划运行策略。

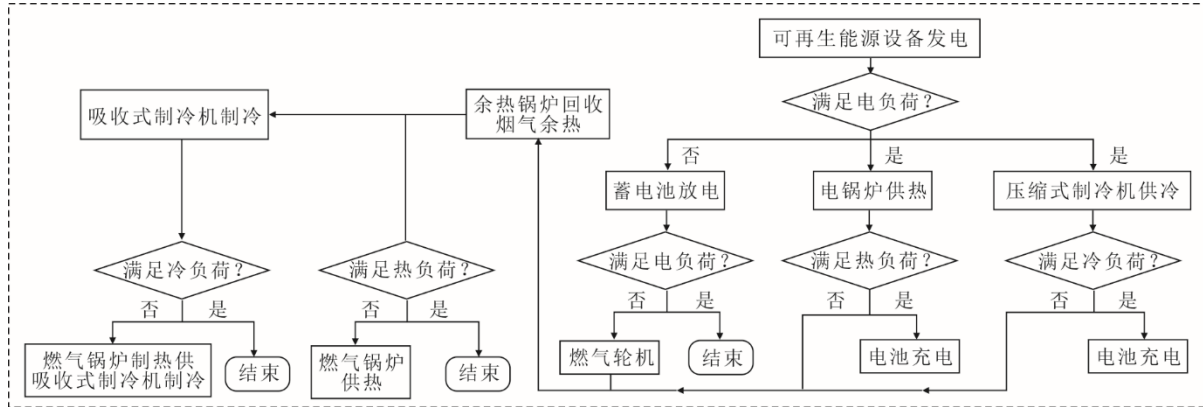


图3 孤岛 IES 规划运行策略

Fig.3 Operation strategies of islanded regional integrated energy system

2.2 孤岛 IES 规划约束条件

孤岛 IES 规划需满足能量供需平衡、设备容量及负载范围约束。能量供需平衡约束指在系统运行各时刻电热冷输出功率与负荷的平衡。设备容量约束指各个设备装机容量应为最小容量的整数倍。负载范围约束为设备运行时的负载的上下限。表1给出了各设备相关参数^[18-19]。

$$L_e + P_{bat} + P_{EB} + P_{EC} = P_{PV} + P_{WT} + P_{GT} \quad (14)$$

$$L_h = Q_{WB} + Q_{EB} + Q_{GB} \quad (15)$$

$$L_c = Q_{AC} + Q_{EC} \quad (16)$$

式中： L_e 、 L_h 、 L_c 分别为电、热、冷负荷，kW； P_{bat} 为电池负荷，kW，充电时为正，放电时为负。

表1 各设备参数
Tab.1 parameters of each device

设备名称	最小装机容量/kW	负荷范围/%	单位装机容量投资/(元·kW ⁻¹)	生命周期/年	额定效率或制冷系数
光伏			13 200	25	0.15
风电	500		15 000	25	
蓄电池			8 280	8	0.70
燃气轮机	100	20~100	9 000	15	发电：0.24 制热：0.52
余热锅炉		20~100	120	15	0.85
电锅炉			1 000	15	0.95
燃气锅炉	700	20~100	720	15	0.85
吸收式制冷机		0~100	720	15	1.20
压缩式制冷机		10~100	600	15	3.50

2.3 孤岛 IES 规划优化目标

孤岛 IES 规划的优化目标是 C_{LCC} 与 E_{LCE} 。 C_{LCC} 可表示为^[20]：

$$C_{LCC} = C_{ICC} + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{(1+i)^n} (1-t_r) + \sum_{r=1}^R \frac{C_{ICC,c}}{(1+i)^{r l_c}} (1-t_r) - \frac{s}{(1+i)^N} - \sum_{n=1}^N \frac{d_n}{(1+i)^n} t_r \quad (17)$$

式中： C_{LCC} 为系统生命周期成本，元； C_{ICC} 为系统的初始资本成本，元； N 为系统设计生命周期，本文取25年； n 为指项目的第 n 年； d_n 为第 n 年折旧费用，元； i 为利率，%； t_r 为税率，%； a_t 为年度维护和运营成本，元； R 为生命周期内总更换次数； r 是指在项目设备替换的第 r 次； $C_{ICC,c}$ 为要更换组件的投资成本，元； l_c 为要更换组件的使用寿命，年； s 为设备残值，元。生命周期内总更换次数 R 为该设备生命周期的函数，由以下方程给出：

$$R = \text{floor}\left(\frac{N}{l_c}\right) - 1 \quad (18)$$

式中： floor 为MATLAB软件中的向下取整函数，将数字舍入到下一个较小的整数。

E_{LCE} 可表示为：

$$E_{LCE} = \frac{1}{1000} \gamma_{gas} (N_{gas,GT} + N_{gas,GB}) \quad (19)$$

式中： E_{LCE} 为生命周期二氧化碳排放量，t； γ_{gas} 为天然气二氧化碳排放系数，取 2.11 kg/m^3 ； $N_{gas,GT}$ 和 $N_{gas,GB}$ 分别为生命周期内燃气轮机、燃气锅炉消耗的天然气体积， m^3 。

2.4 NSGA-II 算法

NSGA-II算法是一种建立在自然选择的建模基础上的启发式算法^[21], 现已被广泛应用于各种多目标优化问题上^[22-23], 算法流程如图 4 所示。本文在 MATLAB 软件中编写 NSGA-II算法对孤岛 IES 规划方案进行多目标寻优。

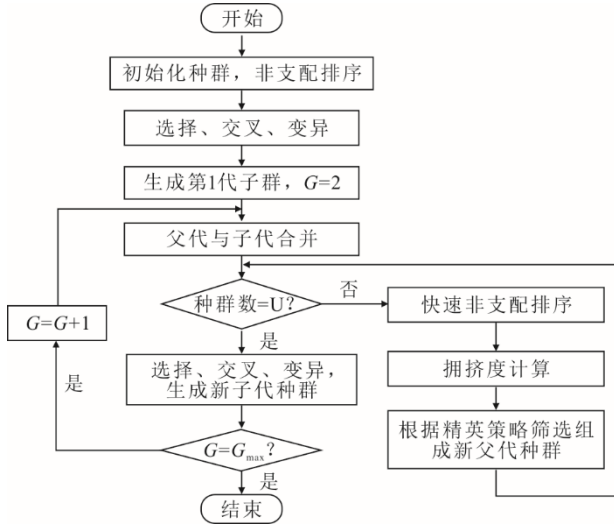


图 4 NSGA-II 算法流程
Fig.4 Flow chart of NSGA-II

2.5 多目标优化决策方法

由于 C_{LCC} 和 E_{LCE} 量纲不同, 会影响到决策结果, 需对数据进行规范化处理:

$$X_{scale} = \frac{X_{max} - X}{X_{max} - X_{min}} \quad (20)$$

式中: X 为原始数据; X_{scale} 为规范化处理后的数据; X_{max} 为数据集中的最大值; X_{min} 为数据集中的最小值。结合 WAA 对优化目标决策, 对于 $(X_{LCC,i}, X_{LCE,i})$ 有:

$$WAA_i = w_{LCC} X_{LCC,i} + w_{LCE} X_{LCE,i} \quad (21)$$

式中: w_{LCC} 、 w_{LCE} 为 C_{LCC} 与 E_{LCE} 在决策中的权重, 范围为 $[0,1]$ 。取 WAA 值大的作为推荐方案。

3 案例分析

本文以山东烟台某孤岛区域为研究对象, 该区域地理位置为 N 37°55', E 120°44', 陆地面积 12.8 km², 当地天然气价格为 3.63 元/m³。

3.1 孤岛可再生能源利用潜力评估及负荷需求

由 Meteonorm8 数据库获得区域 2020 全年和典型日逐时气候数据, 结果如图 5 和图 6 所示。由于研究区域全年逐时负荷数据无法获得, 以区域各季节典型负荷作为对应季节每日负荷, 具体如图 7 所示。根据国土资源部发布的《光伏电站工程项目用地控制指标》要求^[24], 区域孤岛的太阳能光伏装机容量

量限制在 10MW 之内。由风速数据结合式(2)可得风能利用潜力, 将风电机组容量限制在 7MW 之内^[25]。

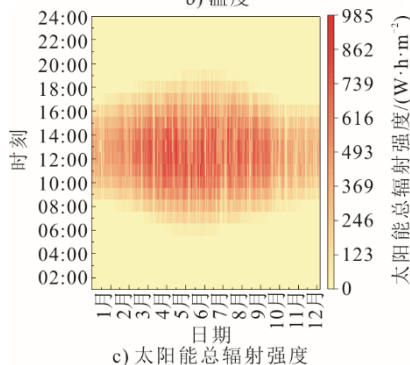
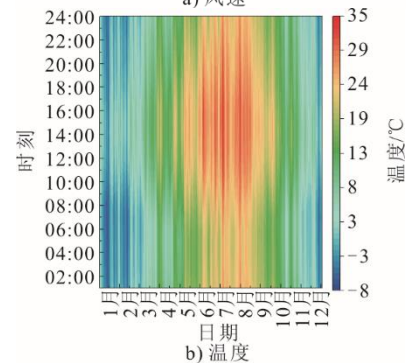
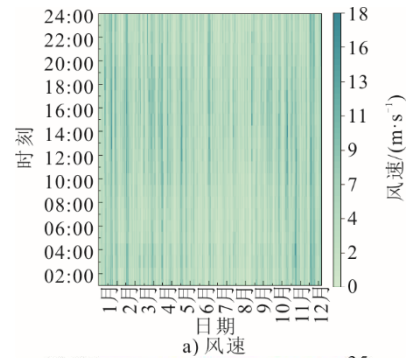


图 5 区域全年逐时气候数据
Fig.5 Regional annual hourly climate data

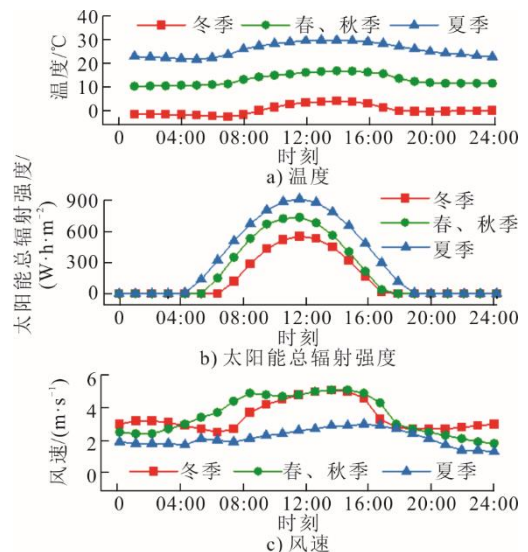


图 6 各季节典型日气候数据
Fig.6 Typical climate data of each season

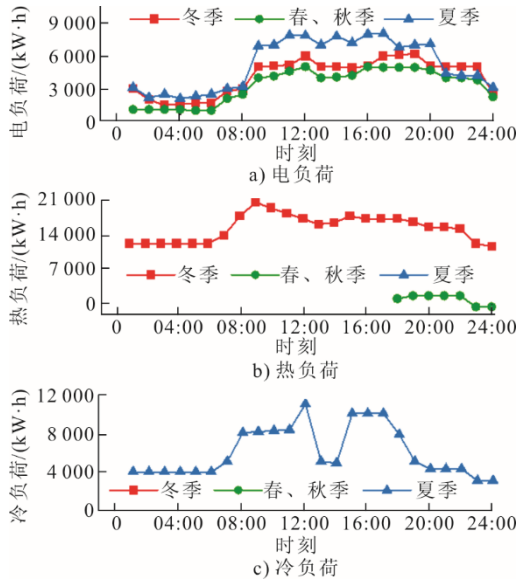


图7 各季节典型日负荷
Fig.7 Typical daily load of each season

3.2 典型日和全年逐时数据对规划结果的影响

据 3.1 所述，将光伏、风电容量分别设置为最大容量 10 MW 和 7 MW，分别以典型日逐时气候数据和全年逐时气候数据作为多目标规划模型的输入，计算得到燃气轮机等设备的容量，结果见表 2。

表 2 典型日运行规划及全年规划设备容量 单位: MW
Tab.2 Device capacity of typical day and annual planning

项目	燃气轮机	余热锅炉	燃气锅炉	电锅炉	吸收式制冷机	压缩式制冷机
典型日	8.6	18.6	28.0	4.2	13.8	0
全年	9.4	20.4	29.4	9.6	13.8	7.8

计算结果表明，全年逐时模拟规划的 IES 各设备容量要高于典型日规划得到的设备容量。以典型日数据规划得到的 IES 各设备容量在实际供能时，会出现设备所需出力高于设备容量的情况，无法满足实际的负荷需求。

3.3 可再生能源设备成本及天然气价格对 C_{LCC} 影响

当光伏装机成本在现价的 60%~100%之间变化时， C_{LCC} 与光伏装机容量的关系如图 8 所示。

当风电装机成本在现价的 60%~100%间变化时， C_{LCC} 与风电装机容量的关系如图 9 所示。

由图 8 和图 9 可以看出， C_{LCC} 随着光伏和风电设备容量的改变呈现相同的变化趋势，即 C_{LCC} 随着设备容量的增加先下降后上升。随着光伏和风电设备单位装机容量成本的降低， C_{LCC} 随设备装机容量变化的拐点向设备容量增加的方向移动，即当光伏、风电的装机成本降低时，可在更大范围内通过增加装机容量降低 C_{LCC} 。这是因为随着光伏、风电

设备容量的增加，其设备成本和用于消纳可再生能源的电锅炉和压缩式制冷机的成本会相应增加，而燃气轮机和余热锅炉的成本会降低，所以，系统 C_{LCC} 呈现降低趋势。但燃气轮机的装机容量受可再生能源设备出力低谷期负荷的约束，随光伏、风设备装机容量的进一步增加，燃气轮机 C_{LCC} 降低趋势变缓，系统 C_{LCC} 又会逐渐增加。

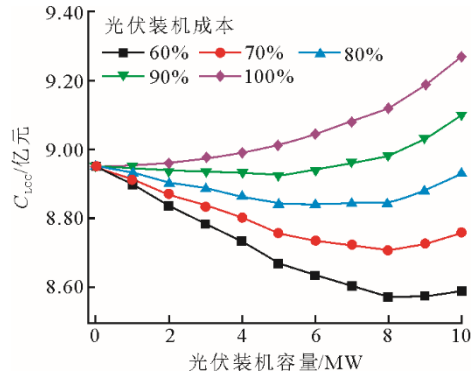


图 8 不同光伏成本下光伏装机容量对 C_{LCC} 的影响
Fig.8 The influence of installed capacity of photovoltaic on C_{LCC} under different photovoltaic costs

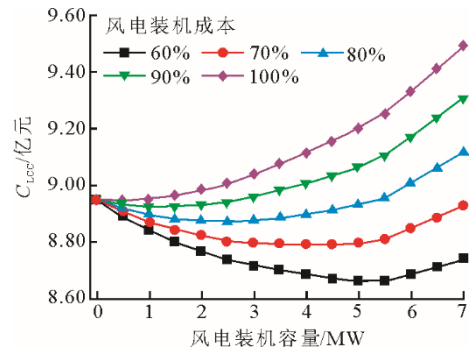


图 9 不同风电成本下风电装机容量对 C_{LCC} 的影响
Fig.9 The influence of wind power installed capacity on C_{LCC} under different wind power costs

图 10 和图 11 分别表示天然气价格在现价的 80%~120%间波动时， C_{LCC} 分别随光伏装机容量和风电装机容量的变化关系。

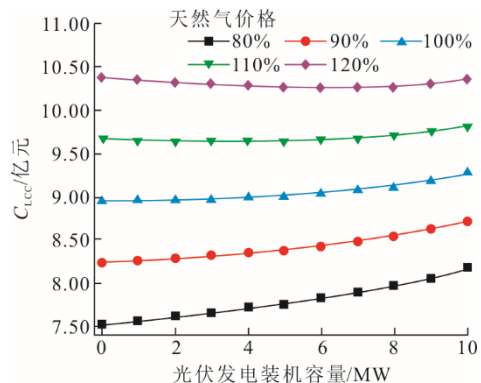


图 10 不同天然气价格下光伏装机容量对 C_{LCC} 的影响
Fig.10 The influence of photovoltaic installed capacity on C_{LCC} under different natural gas prices

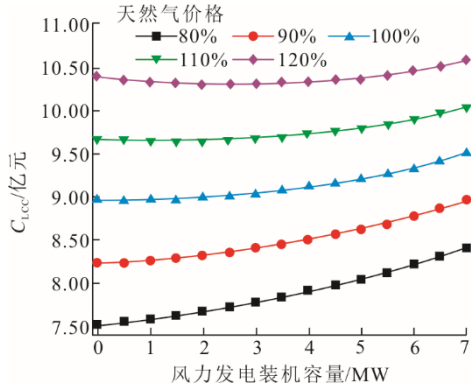


图 11 不同天然气价格下风电装机容量对 C_{LCC} 的影响
Fig.11 The influence of wind power installed capacity on C_{LCC} under different natural gas prices

由图 10 和图 11 可以看出，当天然气价格升高时，系统 C_{LCC} 随光伏、风电装机容量升高呈现先降低后升高趋势。但当天然气价格降低时， C_{LCC} 随设备装机容量的增加而升高。

3.4 可再生能源设备容量及蓄电池容量对 E_{LCE} 影响

将只依靠天然气供能，不配置光伏、风电及蓄电池时的 IES 规划结果作为基准案例，系统各供能设备装机容量见表 3。此时系统 E_{LCE} 为 78.33 万 t， C_{LCC} 为 8.95 亿元。

表 3 无可再生能源冷热电多联供系统各设备容量
Tab.3 Device capacity of non-renewable energy combined cooling heating and power system

E_{LCE} /万 t	C_{LCC} /亿元	燃气轮机容量/MW	余热锅炉容量/MW	燃气锅炉容量/MW	吸收式制冷机制冷量/MW
78.33	8.95	10.00	21.70	27.00	13.80

图 12 表示不设蓄电池时，可再生能源装机容量对 E_{LCE} 的影响。

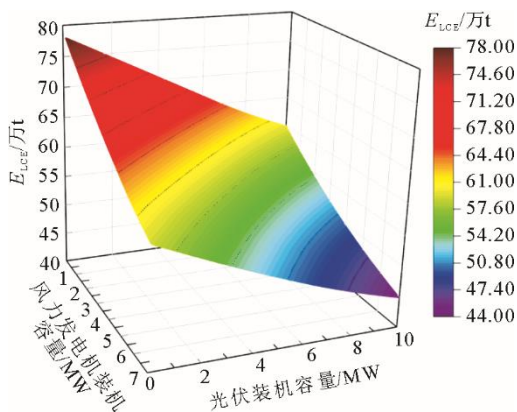


图 12 可再生能源装机容量对 E_{LCE} 的影响
Fig.12 The influence of renewable energy capacity on E_{LCE}

由图 12 可见，随风电与光伏装机容量的增加， E_{LCE} 降低，布置可再生能源能够有效降低 E_{LCE} 。在

光伏装机 10 MW，风电装机 7 MW 时， E_{LCE} 为 44.90 万 t，相较于无可再生能源装机的基准案例， CO_2 减排 33.43 万 t，减排 42.68%。

图 13 表示当光伏发电装机 10 MW，风电装机 7 MW 时，蓄电池容量对 C_{LCC} 和 E_{LCE} 的影响。由图 13 可见，随着蓄电池容量增加， E_{LCE} 降低速率变缓，在蓄电池装机容量为 100 MW·h 时， E_{LCE} 为 34.18 万 t， C_{LCC} 为 36.29 亿元，相比未设置储能的供能系统，进一步碳减排 23.87%，但 C_{LCC} 增加了 243.79%，经济性差。所以，在多目标规划优化时将蓄电池容量上限设置为 100 MW·h。

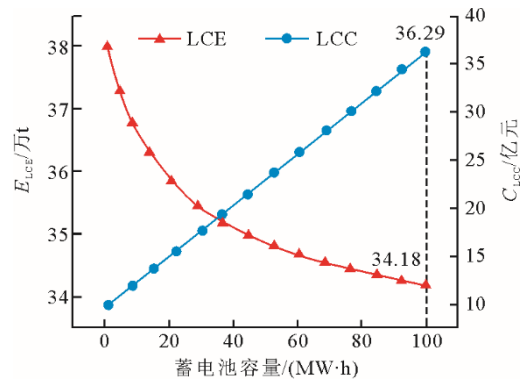


图 13 蓄电池容量对 C_{LCC} 和 E_{LCE} 影响
Fig.13 The influence of battery capacity on C_{LCC} and E_{LCE}

3.5 多目标规划优化结果分析

以 E_{LCE} 及 C_{LCC} 为目标，采用 NSGA-II 求解，种群大小设置为 200，迭代次数为 500，交叉率设置为 0.8，变异率设置为 0.2，光伏、风电、蓄电池容量上线分别设置为 10 MW、7 MW、100 MW·h。图 14 为多寻优求得的帕累托解集。由图 14 可见： C_{LCC} 与 E_{LCE} 呈现相反的变化趋势，随着 E_{LCE} 的减少， C_{LCC} 会逐渐增加；当 C_{LCC} 增加至 10 亿元后， E_{LCE} 缓慢降低，而 C_{LCC} 急剧增加。

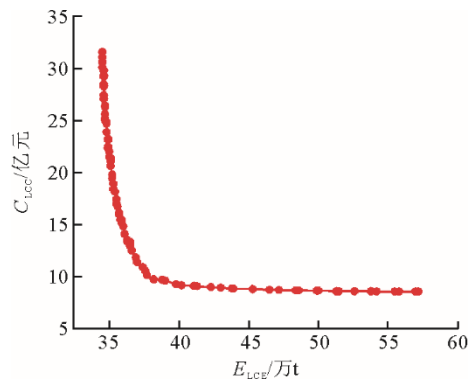


图 14 多目标优化帕累托解集
Fig.14 Pareto solution set of multi-objective optimization

当 C_{LCC} 及 E_{LCE} 权重不同时, 最优方案的光伏、风电及蓄电池容量会有所差异, 具体见表 4。由表 4 可见, 相较于无可再生能源的供能系统, 不同权重下的 7 个方案可使系统 E_{LCE} 降低 26.95%~55.96%, C_{LCC} 变化率在-4.13%~252.07%。其中, 当 E_{LCE} 权重由 0 增至 0.6, 主要通过增设光伏、风电

装机容量来降低 E_{LCE} , 此时 C_{LCC} 增加了 13.51%, 而 E_{LCE} 降低了 33.32%; 当 E_{LCE} 权重由 0.6 增至 1.0, 通过增加蓄电池容量来降低 E_{LCE} , 但 E_{LCE} 降低 8.59%的同时 C_{LCC} 增加了 210.13%, 碳减排效果不明显, 但经济成本大幅增加。因此, 在孤岛 IES 规划时, 需要权衡低碳成本和能源供应成本。

表 4 不同权重比下冷热电多联供系统各设备参数
Tab.4 Device capacity of combined cold heat and power system under different weight ratios

C_{LCC} 权重	E_{LCE} 权重	C_{LCC} /亿元	E_{LCE} /万 t	C_{LCC} 变化率/%	E_{LCE} 变化率/%	光伏容量/MW	风机容量/MW	蓄电池容量/(MW·h)
1.0	0	8.58	57.22	-4.13	26.95	3.8	2.0	0.1
0.8	0.2	9.14	41.13	2.12	47.49	7.7	6.0	0.1
0.6	0.4	9.18	40.58	2.57	48.19	9.3	6.5	0.7
0.5	0.5	9.74	38.15	8.83	51.30	10.0	7.0	1.5
0.4	0.6	10.16	37.74	13.52	51.82	10.0	7.0	2.4
0.2	0.8	13.37	36.29	49.39	53.67	10.0	7.0	14.7
0.0	1.0	31.51	34.50	252.07	55.96	10.0	7.0	84.0

4 结 论

本文提出了一种考虑碳排放的孤岛 IES 多目标规划优化方法, 该方法亦适用于类似区域供能系统的规划。以山东烟台某孤岛为案例做 IES 规划, 分析得到以下结论。

1) 与以典型日逐时数据规划方法相比, 考虑全年气候波动的逐时模拟方法规划得到的各供能设备装机容量增大, 但其可满足在各边界条件下的孤岛的实用能需求, 保证供能的可靠性。

2) 随着可再生能源设备容量的增加, C_{LCC} 呈先降低后升高的趋势; 随着可再生能源设备成本的降低, C_{LCC} 随设备装机容量变化的拐点向容量增加的方向移动; 天然气价格升高, C_{LCC} 随可再生能源装机容量升高先降低后升高, 天然气价格降低, C_{LCC} 随可再生能源设备装机容量的增加而升高。

3) 在孤岛 IES 增设可再生能源设备, 能够有效降低 CO_2 排放量, 当光伏装机 10 MW, 风力发电机装机 7 MW 时, 相较于无可再生能源的供能系统, CO_2 减排 33.43 万 t, 减排 42.68%, 碳减排效果明显; 蓄电池的配置可进一步降低 CO_2 的排放量, 但是投资成本将大幅增加。

4) 以 C_{LCC} 和 E_{LCE} 为目标进行孤岛 IES 规划时, C_{LCC} 与 E_{LCE} 的权重不同, 光伏、风电、蓄电池设备的容量会有差别。当 E_{LCE} 权重增大时, C_{LCC} 会相应的增加; 当 E_{LCE} 权重由 0.6 进一步增加时, IES 的碳减排主要依赖增设蓄电池实现, 碳减排效果不明显, 但经济成本大幅增加。

[参 考 文 献]

- [1] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, Zhang Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2021, 23(6): 1-14.
- [2] 徐箭, 谭昌奇, 廖思阳, 等. 考虑需求侧管理的孤岛微电网频率协调控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 886-893.
XU Jian, TAN Changqi, LIAO Siyang, et al. Coordinated control strategy of island microgrid frequency considering demand side management[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(9): 886-893.
- [3] 任洪波, 王广涛, 李琦芬, 等. 供需互动视角下区域综合能源系统设备配置与运行策略协同优化研究[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 60-67.
REN Hongbo, WANG Guangtao, LI Qifen, et al. Collaborative optimization of equipment configuration and operation strategy for integrated energy systems based on supply-demand interaction[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 60-67.
- [4] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [5] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域研究(一): 概念、建模与降维观测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3188-3204.
WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources (Part I): concepts, modeling and dimension reduction observation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3188-3204.
- [6] 王相宇, 任洪波, 吴琼, 等. 面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 136-145.
WANG Xiangyu, REN Hongbo, WU Qiong, et al.

- Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable energy system facing carbon neutrality[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(7): 136-145.
- [7] 沈红萍. 孤岛式LNG冷热电三联供系统开发设计与分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 55-68.
SHEN Hongping. Design and analysis on liquefied natural gas-combined cooling heating and power (LNG-CCHP) system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 55-68.
- [8] ALIREZA H M, SEBASTIAN A A E, BEHZAD N, et al. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 297-305.
- [9] 王荣杰, 詹宜巨, 周海峰. 孤岛式柴油机混合能源系统优化配置研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 348-355.
WANG Rongjie, ZHAN Yiju, ZHOU Haifeng. Research on optimal sizing of stand-alone diesel-based hybrid energy systems[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(2): 348-355.
- [10] LUO X, LIU J, LIU Y, et al. Bi-level optimization of design, operation, and subsidies for standalone solar/diesel multi-generation energy systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101592.
- [11] LUO X, ZHU Y, LIU J, et al. Design and analysis of a combined desalination and standalone CCHP (combined cooling heating and power) system integrating solar energy based on a bi-level optimization model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 43: 166-175.
- [12] 黄云云, 吴健, 王斌, 等. 基于改进灰狼算法的混合发电系统优化设计[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 775-781.
HUANG Yunyun, WU Jian, WANG Bin, et al. Sizing optimization of hybrid generation system based on improved grey wolf optimization[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(6): 775-781.
- [13] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 256-262.
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(1): 256-262.
- [14] 杜永峰. 计及风光不确定性的电气热综合能源系统日前区间优化[J]. *热力发电*, 2022, 51(2): 85-91.
DU Yongfeng. Day-ahead interval optimization of electricity-gas-heat integrated energy system considering uncertainty of wind and PV[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(2): 85-91.
- [15] DUFFIE J, BECKMAN W. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013: 745-773.
- [16] LYDIA M, KUMAR S S, SELVAKUMAR A I, et al. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 452-460.
- [17] 蔡睿贤, 张娜. 单轴恒速燃气轮机及其功热并供装置的典型变工况特性[J]. *工程热物理学报*, 1998(2): 145-149.
CAI Ruixian, ZHANG Na. Typical off design characteristics of single shaft constant speed gas turbine and its combined power and heat supply device[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1998(2): 145-149.
- [18] 周灿煌. 区域综合能源系统的规划与运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 31.
ZHOU Canhuang. Optimal planning and operation of district integrated energy system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 31.
- [19] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2020[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021: 10-11.
- [20] CAMPBELL M A P B J. The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics[R]. Sunpower, 2008: 5.
- [21] WEI D, CHEN A, SUN B, et al. Multi-objective optimal operation and energy coupling analysis of combined cooling and heating system[J]. *Energy*, 2016, 98: 296-307.
- [22] PRASAD D D, KUMAR D S, BASU M. Application of NSGA-II for environmental constraint economic dispatch of thermal-wind-solar power system[J]. *Renewable Energy Focus*, 2022, 43: 239-245.
- [23] 高维东, 吕丽霞, 王梓齐, 等. 基于 NSGA-II 的塔式太阳能电站定日镜场调度方案研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(5): 94-101.
GAO Weidong, LYU Lixia, WANG Ziqi, et al. Scheduling scheme of heliostat field of tower solar power station based on NSGA-II[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(5): 94-101.
- [24] 中华人民共和国国土资源部. 光伏电站工程项目用地控制指标[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015: 8-36.
Ministry of Land and Resources. Land use control index of photovoltaic power station project[R]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2015: 8-36.
- [25] 风力发电设计规范: GB 51096—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 4-22.
Code for design of wind farm: GB 51096—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015: 4-22.

(责任编辑 杨嘉蕾)