

计及海水制氢与生物质转化的海岛微能网 随机调度优化模型

张哲宇¹, 刘力², 吴潇雨³, 鞠立伟¹, 瞿斌¹, 刘谊¹

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081;
3. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:为实现海岛地区能源需求的可再生和自我可持续性发展,结合海岛的丰富可再生资源特征,设计一种海岛微能网优化调度模型。聚合出力设备、生物质废能转化装置、海水淡化装置以及储能为微能网,考虑风、光不确定性,设计以运行成本、环境成本、风险值最小为目标的随机调度优化模型,并运用混合差分进化算法进行求解。算例分析表明,该模型实现了电-热-气-氢多能协同优化,提高了海岛风、光和生物质等可再生资源的利用率,促进可再生能源的可持续发展和能源结构的清洁低碳转型。

关键词:微能网;生物质能;海水淡化;电制氢;鲁棒优化;需求响应

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:2096-4145(2024)08-0064-09

Optimization Model of Island Micro-energy Grid Stochastic Scheduling Considering Seawater Hydrogen Production and Biomass Conversion

ZHANG Zheyu¹, LIU Li², WU Xiaoyu³, JU Liwei¹, QU Bin¹, LIU Yi¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: To achieve the renewable and self-sustainable energy requirements of island areas, a microgrid optimization scheduling model is designed in light of the rich renewable resources available on islands. The model aggregates output equipment, biomass waste conversion units, seawater desalination facilities and energy storage as part of the microgrid. Considering the uncertainties of wind and solar power, a stochastic scheduling optimization model is designed with the objectives of minimizing operational costs, environmental costs and risk values. This model is solved using a hybrid differential evolution algorithm. Case study analysis demonstrates that the model achieves multi-energy optimization for electricity, heating, gas and hydrogen, enhances the utilization rate of renewable resources such as wind, solar and biomass on islands, promotes the sustainable development of renewable energy and the clean and low-carbon transformation of energy structure.

Key words: micro-energy grid; biomass; desalination; power-to-hydrogen; robust optimization; demand response

0 引言

大多数海岛负荷小,离岸远,化石燃料成本高且易污染^[1],电缆昂贵又不可靠^[2]。微能网(Micro Energy Grid, MEG)作为一种小型能源供应系统,可

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(72274060,52307088)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (72274060,52307088)

实现多能耦合互补,满足多负荷需求^[3]。双碳背景下,海岛的长期规划对环保性提出了更高的要求,未来的海岛微电网应实现无柴化^[4]。制定海岛微能网优化调度策略,处理风、光不确定性的影响是一个重点,通常涉及到随机规划和鲁棒随机理论^[5]。文献[6-9]使用两阶段随机规划方法设计和运行多微电网系统。文献[10-13]应用鲁棒随机理论描述风电和光伏发电的不确定性影响。随机规划基于随机变量的概率分布,将系统约束描述为机会约束^[14],但依赖变

量的概率分布信息获取。鲁棒理论用不确定参数的区间来描述不确定性,对随机变量的概率分布信息要求较低^[15],更适合描述风、光不确定性。此外,对于多目标优化问题,早期算法使用加权方法转化多目标,难以求解极小化问题。文献[16]提出基于分解的多目标进化算法(Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, MOEA/D),当目标数增加,MOEA/D收敛性更好。文献[17]利用基于DE/rand/1的MOEA/D产生后代个体和权重并更新父代邻域个体,但该变异策略较难发挥差分进化算法优势。文献[18]利用种群当前迭代信息对变异参数进行自适应动态选择,提高了算法挖掘能力。此外,对海岛MEG的研究大多限于电、热、冷的供应,而天然气在居民能源消费中占比增加^[19],电池储能是最常用的方法^[20],但面临能量密度低、电池老化、热稳定性差等问题^[21]。氢能作为一种大规模储能载体,能量密度大、转化效率高且无污染^[22]。此外,干燥的生物质废料可热解转化为清洁燃料,湿润的部分经过厌氧发酵后可提纯为天然气^[23],由此满足用气需求。

现有研究从配置、调度等方面对MEG进行了优化研究,但存在一些不足。首先,随着生物质制气、电制氢技术的成熟,将面临电、热、气、氢协同的新问题。其次,现有文献未分析(Power to Gas, P2G)等能源转化装置对系统结构和形态特征的改变,或未考虑生物质利用和海水淡化的生态效益。最后,对多目标求解算法的收敛和种群多样性改进不足。针对现有研究的不足,本文将海水淡化与电制氢、生物质转化系统集成到海岛微能网中,并将协同范围从电-热扩至电-热-气-氢。同时,研究多类灵活资源的协调运行方案,建立考虑经济性、环境性和运行风险的多目标调度优化模型。最后,通过改进变异算子和策略,提出一种基于MOEA/D-DE框架的混合差分进化算法(HMODE/D),提升多目标优化模型的求解效果。

1 微能网系统简介与单元建模

1.1 系统结构

本文集成风电(Wind Power Plant, WPP)、光伏(Photovoltaic, PV)、燃气发电(Combustion Gas Turbine, CGT)、氢燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HFC)、生物质废能转化系统(Biomass Energy Conversion System, BECS)、海水淡化耦合制氢系统(Desalination and Power-to-Hydrogen System, DHS)

为微能网。需求侧实施价格型需求响应(Price-Based Demand Response, PBDR)和激励型需求响应(Incentive-Based Demand Response, IBDR)。本文所提的海岛MEG结构如图1所示。

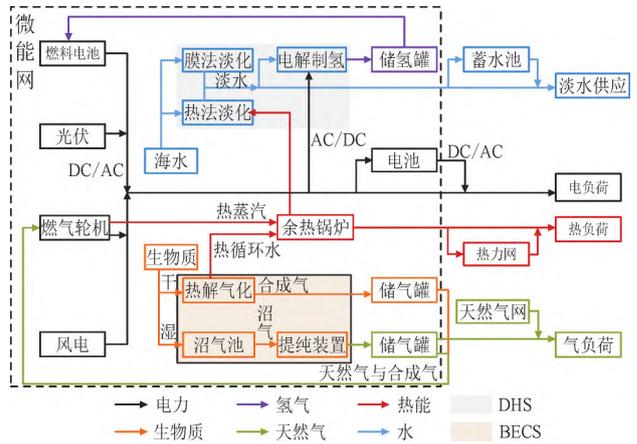


图1 海岛微能网结构

Fig.1 Island micro-energy grid structure

1.2 系统运行建模

1.2.1 出力设备

可出力设备分为可再生机组和可控机组。关于WPP, PV发电、CGT发电的建模参照文献[24-26]。

HFC将燃料和氧化剂中的化学能转化为电能,其转化率高且零排放,发电模型如下^[27]:

$$\begin{cases} M_{HFC,t}^{H_2} G_{H_2} = P_{HFC,t} + H_{HFC,t}^{loss} \\ \varphi_{HFC} = \frac{P_{HFC,t}}{M_{HFC,t}^{H_2} G_{H_2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{HFC,t}$, $M_{HFC,t}^{H_2}$, $H_{HFC,t}^{loss}$ 分别为 t 时刻 HFC 的电功率,耗氢量,热损失; G_{H_2} 为氢气热值; φ_{HFC} 为氢能转化效率。

1.2.2 海水淡化耦合制氢建模

热法(Multi-Effect Desalination, MED)和膜法(Reverse Osmosis, RO)工艺联合,在碱水电解制氢(Alkaline Water Electrolysis, AWE)装置中通入直流电,水分子在电极上发生电化学反应,分解成氢和氧。

1)MED建模如下:

$$\begin{cases} \alpha_{MED} = \frac{M_{water,t}^{MED}}{M_{steam,t}^{MED}} \\ \theta_{MED} = \frac{M_{coolwater,t}^{MED}}{M_{water,t}^{MED}} \\ H_{MED,t} = \lambda_{MED} M_{steam,t}^{MED} \\ \sum_m M_{m,t}^{MED} = \frac{P_{MED,t}}{\eta_{MED}}, m = \text{水,蒸汽,冷却水} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_{MED} , θ_{MED} 分别为 MED 装置产水率和冷却水

循环率; $P_{MED,t}$, $H_{MED,t}$ 分别为 MED 装置在 t 时刻的电功率和耗热; $M_{water,t}^{MED}$, $M_{steam,t}^{MED}$, $M_{coolwater,t}^{MED}$ 分别为产水量, 蒸汽量, 冷却水流量; λ_{MED} , η_{MED} 分别为单位产水热耗比, 电耗率; $M_{m,t}^{MED}$ 为在 t 时刻处理的淡水质量。

2) RO 建模如下:

$$\begin{cases} \alpha_{RO} = \frac{M_{water,t}^{RO}}{M_{seawater,t}^{RO}} \\ \eta_{RO} = f_{os} \varepsilon_{zero} \frac{1}{\alpha_{RO}} \ln\left(\frac{1}{1-\alpha_{RO}}\right) \\ M_{water,t}^{RO} = \frac{P_{RO,t}}{\eta_{RO}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{RO,t}$, $M_{water,t}^{RO}$, $M_{seawater,t}^{RO}$ 分别为 RO 装置在 t 时刻的功率, 产水量, 海水进料量; f_{os} , ε_{zero} 分别为海水的渗透压, 初始浓度; α_{RO} 为 RO 装置的回收率; η_{RO} 为电耗率。

3) AWE 建模如下:

$$\begin{cases} P_{AWE,t} = Q_{AWE,t}^{H_2} G_{H_2} + P_{AWE,t}^{loss} \\ \varphi_{AWE} = \frac{Q_{AWE,t}^{H_2} G_{H_2}}{P_{AWE,t}} \\ \theta_{AWE} = \frac{M_{water,t}^{AWE}}{Q_{AWE,t}^{H_2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{AWE,t}$, $Q_{AWE,t}^{H_2}$, $M_{water,t}^{AWE}$, $P_{AWE,t}^{loss}$ 分别为电制氢装置在 t 时刻的功率, 制氢量, 耗水量, 能量损失; φ_{AWE} , θ_{AWE} 分别为能量转换效率, 耗水率。

1.2.3 生物质转化系统建模

生物质通过热解气化 (Thermal Pyrolysis Device, TPD) 装置转化为可替代天然气燃料的合成气, 而沼气经过提纯 (Biogas Purification, BP) 装置去除杂质, 成为符合天然气标准的高品质沼气^[28]。

1) TP 建模如下:

$$\begin{cases} \varphi_{TP} = \frac{Q_{TP,t}^{syngas} G_{syngas}}{M_{biomass,t} G_{biomass}} \\ H_{TP,t} = (1 - \varphi_{TP} - \mu_{TP}^{loss}) M_{biomass,t} G_{biomass} \\ W_{TP,t} = \eta_{TP} M_{biomass,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $W_{TP,t}$, $Q_{TP,t}^{syngas}$, $M_{biomass,t}$, $H_{TP,t}$ 分别为 t 时刻热解气化装置耗电量, 合成气产量, 生物质进料量以及产热量; G_{syngas} 为合成气的热值。 φ_{TP} 为生物质转化效率; η_{TP} , μ_{TP}^{loss} 分别为耗电率, 损失率。

2) BP 建模如下:

$$\begin{cases} \theta_{biomass} = \frac{\sum_m \theta_{biomass,m} M_{biomass_{wet},m}}{\sum_m M_{biomass_{wet},m}} \\ \varphi_{BP} = \frac{Q_{BP,t}^{CH_4} G_{CH_4}}{Q_{BP,t}^{CH_4} P_{BP,t} + \theta_{biomass} M_{biomass_{wet}} G_{biomass}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{BP,t}$, $Q_{BP,t}^{CH_4}$ 分别为 t 时刻耗电量, 天然气产量; $M_{biomass_{wet},m}$, $\theta_{biomass,m}$ 分别为湿生物质 m 的质量, 生物质含量; $M_{biomass_{wet}}$, $\theta_{biomass}$ 分别为湿生物质总质量、生物质含量; G_{CH_4} , $G_{biomass}$ 分别为天然气和生物质热值; φ_{BP} 为耗电系数。

1.2.4 储能及余热锅炉建模和 DR 建模

储能设备与余热锅炉运行建模参照文献[25-27]。用户根据分时电价与激励政策调整用电, 可降低能耗成本并响应调度。具体建模参照文献[25-27]。

2 多目标调度优化模型

2.1 目标函数

多目标调度考虑运行成本最小、环境成本最小以及风险最小。

1) 运行成本最小:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{t=1}^T (C_{commute,t} + C_{om,t} + C_{abandon,t} + C_{DR,t}) \\ C_{commute,t} = \{ \xi_{heat,t} (H_{buy,t} - H_{sell,t}) + \xi_{CH_4,t} Q_{buy,t}^{CH_4} \} \Delta t \\ C_{om,t} = \sum_{i \in \Omega_{all}} \sum_{s \in \Omega_s} \left\{ K_{om,i} P_{i,t} + K_{om,s} \left[u_{s,t} P_{s,t}^{in} + (1 - u_{s,t}) P_{s,t}^{out} \right] \right\} \Delta t \\ C_{abandon,t} = \xi_{abandon} P_{abandon,t} \Delta t \\ C_{DR,t} = (R_{PBDR,t} + R_{IBDR,t}) \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中: T 为运行时间; F_1 为运行成本; $C_{commute,t}$, $C_{om,t}$, $C_{abandon,t}$, $C_{DR,t}$ 分别为交互成本, 运维成本, 弃电惩罚成本, 需求响应成本; Δt 为时间变化量; $Q_{buy,t}^{CH_4}$, $H_{buy,t}$, $H_{sell,t}$ 分别为 t 时刻的购气, 购热, 售热; Ω_{all} , Ω_s 分别为所有设备和存储设备; $P_{i,t}$, $K_{om,i}$ 分别为设备 i 的功率与维护费用; $K_{om,s}$ 为储能设备维护费用; $\xi_{heat,t}$, $\xi_{CH_4,t}$, $\xi_{abandon}$ 分别是热价, 气价, 惩罚费用; $u_{s,t}$ 为储能设备状态; $P_{s,t}^{in}$, $P_{s,t}^{out}$ 分别为储能设备在 t 时刻的充电和放电功率; $P_{abandon,t}$ 为时间 t 的弃风光功率; $R_{PBDR,t}$, $R_{IBDR,t}$ 分别为 PBDR 和 IBDR 在时间 t 的收入。

2) 环境成本最小:

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{m \in \Omega_{env}} \left\{ \xi_{CO_2} \left(\sigma_{CO_2}^{CGT} P_{CGT,t} + \sigma_{CO_2}^{TP} P_{TP,t} \right) - \xi_m M_{m,t} \right\} \Delta t \quad (8)$$

式中： ξ_{CO_2} 为碳排放成本； F_2 为环境成本； $\sigma_{CO_2}^{CGT}$ ， $\sigma_{CO_2}^{TP}$ 分别为 CGT, 热解气化炉的碳排放率； $M_{m,t}$ ， ξ_m 分别为处理物 m 的质量与单位效益， $\Omega_{env} = [$ 干生物质量,湿生物质量,淡水 $]$ 。

3) 风险最小: 本文基于条件风险价值方法来构造最小风险目标。选取随机向量 $P_{RE,t}$ 的 N 个样本值 P_1, P_2, \dots, P_N ，参照条件风险值 (Conditional Value-at-Risk, CVaR) 方法^[29]，构造最小化风险目标函数为：

$$\min F_3 = \alpha + \frac{1}{N(1-\beta)} \sum_{k=1}^N [f(G, g) - \alpha]_k^+ \quad (9)$$

式中： F_3 为 CVaR 风险值； α 为 MEG 运行损失的边界值； $f(G, g)$ 为损失函数，等于 $F_{1,t}$ ； $G^T = [P_{MEG,t}(1), P_{MEG,t}(2), \dots, P_{MEG,t}(T)]$ 为决策向量； $g^T = [P_{WPP,t}, P_{PV,t}, L_t]$ 为多元随机向量； $P_{MEG,t}$ ， $P_{WPP,t}$ ， $P_{PV,t}$ 分别为 MEG、WPP 和 PV 在 t 时刻的发电功率； β 代表置信度。

2.2 约束条件

微能网运行需考虑能量平衡约束、出力设备约束、DHS 约束、BECS 约束、储能约束、需求响应约束及其他约束。

1) 能量平衡约束: 能量平衡约束包括电力平衡约束、热能平衡约束和燃气平衡约束。

2) 出力设备约束为：

$$\begin{cases} P_{CGT}^{\min} \cdot U_{CGT,t} \leq P_{CGT,t} \leq P_{CGT}^{\max} \cdot U_{CGT,t} \\ -RD_{CGT}^{\max} \leq P_{CGT,t} - P_{CGT,t-1} \leq RU_{CGT}^{\max} \\ -RD_{HFC}^{\max} \leq P_{HFC,t} - P_{HFC,t-1} \leq RU_{HFC}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中： P_{CGT}^{\min} ， P_{CGT}^{\max} 分别为 CGT 功率的上下限值； $U_{CGT,t}$ 为燃气轮机的启停状态； RU_{CGT}^{\max} ， RD_{CGT}^{\max} 分别为 CGT 爬坡速率的上下限值； RU_{HFC}^{\max} ， RD_{HFC}^{\max} 分别为 HFC 爬坡速率的上下限值。

3) DHS 约束为：

$$\begin{cases} M_{freshwater} \leq \sum_{t=1}^T M_{freshwater,t} \\ -RD_{AWE}^{\max} \leq P_{AWE,t} - P_{AWE,t-1} \leq RU_{AWE}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $M_{freshwater}$ 为处理的淡水总量； $M_{freshwater,t}$ 为 t 时刻处理的淡水质量； RU_{AWE}^{\max} 和 RD_{AWE}^{\max} 为 AWE 爬坡速率的上下限值。

4) BECS 约束为：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T M_{biomass,t} \leq M_{biomass}^{\max} \\ \sum_{t=1}^T Q_{TP,t}^{biogas} \leq Q_{biogas}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $M_{biomass,t}$ 为 TP 在 t 时刻消耗的生物质量； $M_{biomass}^{\max}$ 为 TP 消耗生物质量的上限； $Q_{TP,t}^{biogas}$ 为 t 时刻提纯的沼气体积； Q_{biogas}^{\max} 为可提纯沼气总体积。

5) 其他运行约束: 储能及余热锅炉约束、需求响应约束、可出力设备约束、DHS 和 BECS 需满足最大启停次数约束^[26]，热网、天然气网约束需满足最大交互功率约束^[19]。此外，为了应对风、光出力不确定性，需考虑旋转备用约束^[27]。

3 求解算法

本文采用一种基于 DE/rand/1 的 MOEA/D (MOEA/D based on DE/rand/1, MOEA/D-DE) 框架的混合差分进化算法 (Hybrid Differential Evolution Algorithm Based on MOEA/D-DE, HMODE/D) 求解多目标优化模型。

3.1 变异与交叉策略

3.1.1 局部最优策略

局部最优策略使用轮盘选择方式来选择局部最优个体，步骤如下：

1) 集合个体 x_i 的子群体 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iT}\}$ 。

2) 基于目标函数对 X_i 内个体的每个目标值进行排序，赋予个体排名向量，然后计算每个排名向量的和 $R(x_{ij})$ ，其中 $j = 1, 2, \dots, T$ ， i, j 为向量排名， T 为邻里个体大小。

3) 设置选择概率：

$$P_{ij} = 1 - \frac{R(x_{ij})}{\sum_{i=1}^T R(x_{it})}, j = 1, 2, \dots, T. \quad (13)$$

$$P(x_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^T P_{it}}, j = 1, 2, \dots, T. \quad (14)$$

式中： P_{ij} 为每个排名向量的概率； $P(x_{ij})$ 为选择概率。通过赌轮选择得到潜在较优个体 x_{best} ，并进行新的变异生成子代 V_i ：

$$V_i = x_{best} + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (15)$$

式中： x_{r1} 和 x_{r2} 为从子种群 X_i 中选择的不同个体， r 为子代个体排名。

3.1.2 外部精英集策略

1)为每个权重向量 λ^i 设置精英集 $X_{\text{archive}}(i)$ 以存储个体和权重值。

2)比较第 i 个权重向量邻域内个体的权重值 λ^i 与交叉个体的权重值,较小的权重值和个体存储在精英集中。

3)分别从邻域和精英集中随机选择 2 个不同的个体 x_{r_1} 和 x_{r_2} ,与个体 $X_{\text{archive}}^{\text{best}}$ 生成子代 v_i 。

$$v_i = X_{\text{archive}}^{\text{best}} + F(x_{r_1} - x_{r_2}) \quad (16)$$

3.1.3 启发式交叉策略

1)使用拉丁方阵 $L_M(Q^D) = [a_{ij}]_{M \times D}$ 生成 0-1 正交矩阵。其中, $a_{ij} = 0$ 代表从父代个体 x_i 中选择第 j 个分量作为交叉个体对应的分量, $a_{ij} = 1$ 代表从变异个体 v_i 中选择第 j 个分量作为交叉个体对应的分量,重组个体数量为 M 个, D 为变量的维度。

2)随机地从邻域中选取一个权值向量,并计算出重组个体的权重。

3)根据权重,筛选重组后的优势个体,组成个体集,从矩阵 $L_M(Q^D)$ 中找到相应的行,在矩阵 A 中存储。

4)计算矩阵 A 第 i 列中元素为 1 的概率值,计为 p_i 。若 $p_i \leq 0.5$,则从父代个体中选择交叉个体的第 i 个分量。否则,就从变异个体中选择交叉个体的第 i 个分量,其中 $i = 1, 2, \dots, D$, D 为变量维度。

3.2 自适应变异因子

1)随机选取任一目标函数,找到与其最大值和最小值对应的个体集,记为 X_{max} 和 X_{min} 。

2)计算 X_{max} 和 X_{min} 个体间的欧氏距离。找到满足最大欧氏距离的向量,记为 x_{max} 和 x_{min} ,随机选取个体 x_{r_1} 和 x_{r_2} 。

3)计算 (x_{r_1}, x_{r_2}) 和 $(X_{\text{max}}, X_{\text{min}})$ 的范数 $\|x_{r_1} - x_{r_2}\|_2$ 和 $\|X_{\text{max}} - X_{\text{min}}\|_2$,最后设置变异因子 F_i 。

$$F_i = \rho \frac{\|x_{\text{max}} - x_{\text{min}}\|_2}{\|x_{r_1} - x_{r_2}\|_2} \quad (17)$$

$$F_i = \begin{cases} F_{\text{max}}, & \text{if } F_i \geq F_{\text{max}} \\ F_{\text{min}}, & \text{if } F_i \leq F_{\text{min}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: F_{max} , F_{min} 分别是 F_i 的上、下限, τ 为变异因子相关参数, G 和 G_{max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数,控制参数 ρ 设置如下:

$$\rho = \tau e^{-\left(\frac{G}{G_{\text{max}}}\right)^2} \quad (19)$$

3.3 算法流程

以迭代次数 $G \bmod 10 == 0$ 和最大函数评估数

$FES \leq \text{MaxFES}$ 为停止标准。若 HMODE/D 满足标准,则执行变异,并使用生成后代;若不满足标准,则执行经典交叉策略和变异策略。在整个迭代过程采用适应性调整策略,若满足停止条件,则输出最优值。算法框架和流程如图 2 所示。

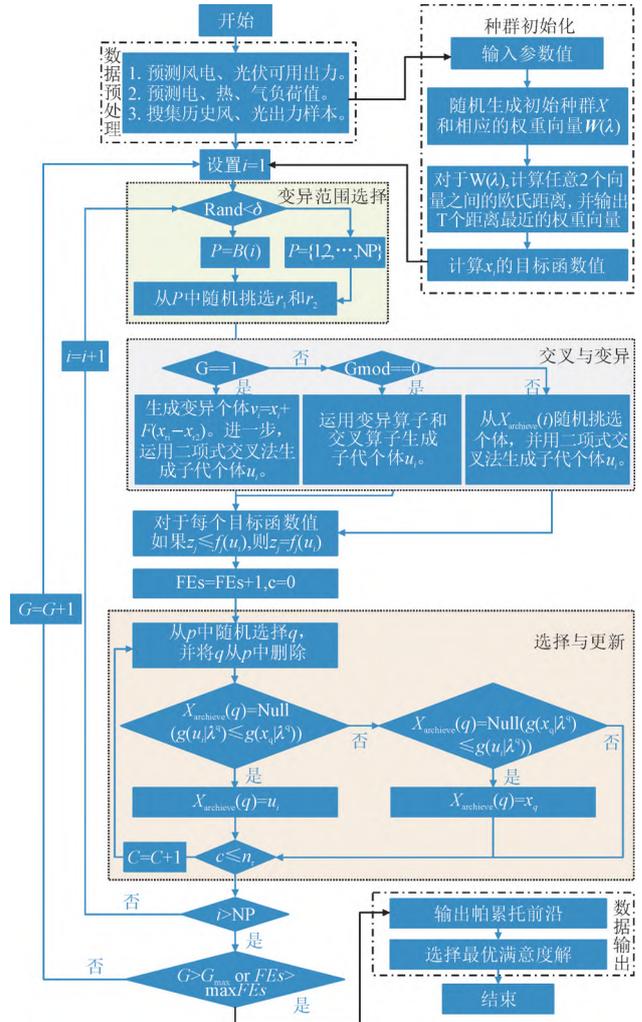


图2 算法框架和流程

Fig.2 Framework and detailed flow of the algorithm

4 算例分析

4.1 基础数据

以南海永兴岛 MEG 为例,MEG 配置 4×70 kW 风电, 4×55 kW 光伏, 2×70 kW 燃气轮机和 2×40 kW 燃料电池,同时配置海水淡化和电制氢装置^[30]。此外,还配备热解气化与沼气提纯装置,沼气池平均每天可处理 5 t 可热解生物质和 6 t 湿生物质(2 t 粪便 $\theta_{\text{bio}} = 18\%$ 和 4 t 餐厨垃圾 $\theta_{\text{bio}} = 78\%$),产生 55%~61%浓度的沼气 $1\ 000\ \text{m}^3$ ^[31]。切入风速、额定风速和切出风速分别为 4 m/s, 15 m/s, 25 m/s,空气密度为

1.205 kg/m³。生成 10 组风、光伏发电场景,选择概率最高的一般情景和波动最大的极端情景作为调度数据。风、光出力及分时价格如图 3、图 4 所示。

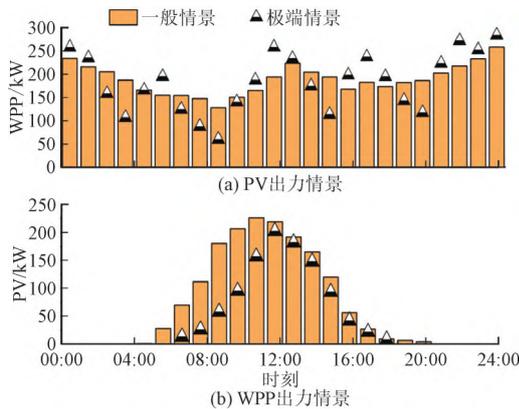


图3 PV,WPP出力情景

Fig.3 PV and WPP output scenarios

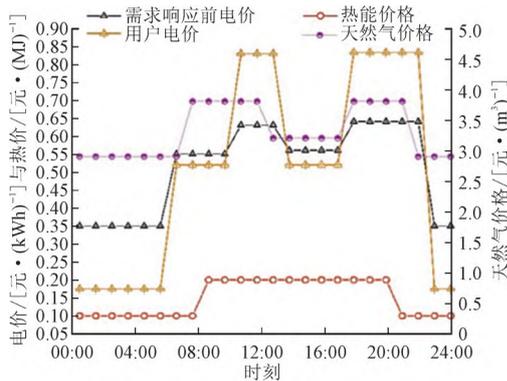


图4 分时电、气、热价格

Fig.4 Time-of-use electricity, gas and heat prices

需求响应前,终端用户电价为 0.55 元/kWh,需求响应后,高峰时段电价增加 30%,低谷时段电价下降 50%。为避免响应过大造成负荷曲线峰谷反转,设定 PBDR 引起的负荷累计变化不超过原负荷的 10%,IBDR 提供的总上下输出不超过原负荷的

3%。可中断负荷正出力的价格为 0.65 元/kWh,负出力价格为 0.25 元/kWh。为便于分析,将全天划分为谷时段(00:00—08:00)、平时段(08:00—13:00, 21:00—24:00)、峰时段(13:00—21:00)。为深入分析 DHS、BECS 对调度优化的影响,本文设置以下 4 个场景进行分析^[32]:

场景 1:DHS 与 BECS 不参与调度,基本场景。该方案只考虑 MEG 的自最优运行。

场景 2:MEG+DHS 场景,该场景考虑 DHS 对微能网优化调度影响。

场景 3:MEG+BECS 场景,该场景考虑 BECS 对微能网优化调度影响。

场景 4:MEG+DHS+BECS,综合场景。该场景讨论 DHS 与 BECS 耦合对微能网调度优化的影响。

根据所设置的仿真场景,算法的参数设置包括邻域选择定义概率 $\delta=0.9$,变异因子相关系数 $\tau=0.8$,交叉概率 $CR=0.9$,更新父代的最大数量 $n_r=2$,启发式交叉运算维度 $D-K=[D/3]$,D-K 为启发式交叉操作的维度变异因子, F 的上限和下限 $F_{max}=1.2, F_{min}=0.5$ 。群组大小设为 500, G_{max} 设为 10 000;置信度和鲁棒系数 G_{RE} 设为 0.5。

4.2 算例结果

4.2.1 结果对比分析

考虑多目标下的 MEG 最优运行,整体优化结果如表 1 所示。

对比场景 1,场景 2 目标函数值分别降低了 2.1%,72.8%和 2.0%,场景 3 的 F_1 和 F_3 分别降低了 75.1%,74.9%, F_2 提高 9.9%,场景 3 目标函数值分别降低了 78.2%,61.8%和 77.9%。结合表 1,DHS 通过生产淡水减少环境成本,同时消纳可再生电力从而减少弃电惩罚;BECS 生物质制气减少燃料成本,

表1 MEG运行最优满意度结果

Table 1 Results of optimal satisfaction with MEG operation

项目	一般场景				极端场景	
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 4	
目标值	F_1 /元	3 848.27	3 769.75	959.63	839.18	719.86
	F_2 /元	317.10	86.39	348.49	120.99	307.78
	F_3	3 858.92	3 781.32	969.75	853.31	739.99
能源生产	电能 /MW	7.54	8.04	7.72	8.36	7.74
	热能 /MW	2.91	3.67	4.22	5.59	5.80
	天然气 /m ³	-	-	666.24	622.19	666.47
	氢气 /kg	-	21.17	-	19.65	10.66
	合成气 /t	-	-	0.82	1.25	1.14
环境效益	淡水 /t	-	156.84	-	159.84	69.39
	生物质 /m ³	-	-	979.36	933.29	999.68
	碳排放 /kg	634.19	800.14	735.54	941.45	947.91
弃电	弃风、弃光 /kW·h	1 696.81	64.76	1 467.03	56.73	0.03
	弃电率 /%	27.62	1.05	23.88	0.92	<0.01

并提高售热收入,但导致碳排放增加 16.0%。极端场景下,场景 4 的 F_2 增加 154.4%, F_1 与 F_3 分别降低 14.2% 和 13.3%。这是因为 WPP 与 PV 实际功率降低,导致 DHS 与 BECS 可用功率减少。总而言之,综合场景的优化调度结果明显优于单一 DHS 或 BECS 场景。同时,DHS 与 BECS 在电、热方面存在耦合互补,图 5 为 4 种场景的热能供需与 CGT 燃料占比。

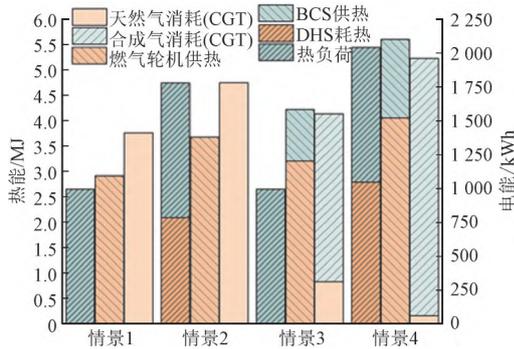


图5 场景1-4热能供需与CGT燃料占比

Fig.5 Ratio of heat energy supply and demand to CGT fuel in scenarios 1-4

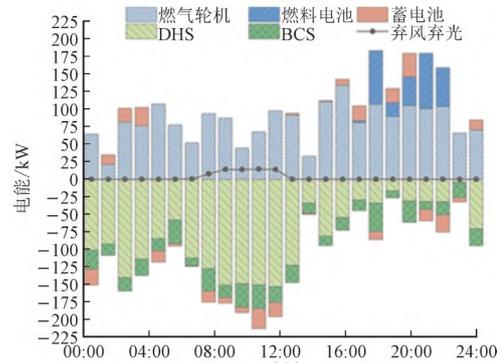
根据图 5,场景 2 热耗比产热高 28.9%,场景 3 热耗比产热低 37.2%,场景 4 热耗仅比产热低 2.7%。由此可知,DHS 耗热和 BECS 产热互补可实现热供需平衡。在场景 1 和 2 中,CGT 仅消耗天然气,而在场景 3 和 4 中,CGT 同时消耗合成气,天然气仅分别占 20.1%、3.1%。因此,BECS 制合成气可替代大部分天然气使用,同时 DHS 制氢供燃料电池参与调峰,CGT 调峰降低,天然气使用进一步减少。

4.2.2 最恶劣场景分析

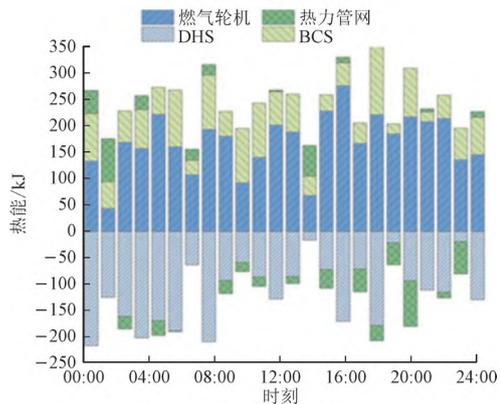
相比于一般场景,极端场景下的燃气轮机峰时发电提高 22.6%,BECS 和 DHS 功率分别下降 21.2%、21.5%。图 6 给出最差情况下 BSP-MEG 优化调度的结果。19:00—21:00 期间,可控发电机的输出达到峰值。最差情况下的最大和最小可控产出分别比一般情况下高 26.7% 和低 15.4%。这是因为可再生能源输出在最坏的情况下波动较大,可控发电机需要更显著地调整电力,以满足供需平衡。

进一步比较场景 1 与场景 4 的运行模式,分析不同风险态度对调度方案的影响。表 2 为不同鲁棒系数下的调度优化方案。

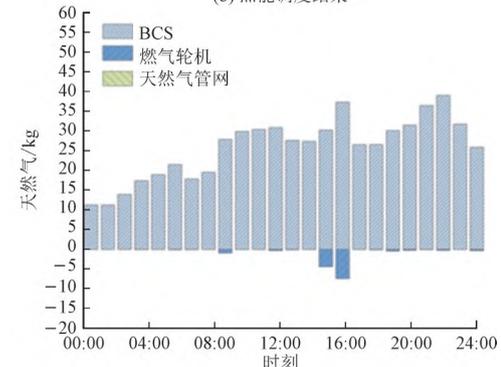
随着鲁棒系数 G_{RE} 增加,风、光出力逐渐减少, F_1 和 F_2 逐渐增加, F_3 逐渐减少,表明调度方案趋于保守。不确定性对系统偏差成本的影响较大,因为随着不确定性参数的增加,风、光出力下降,不确定性引起的系统偏差调整需求下降。相应地,系统偏差调整成本降低。



(a) 电能调度结果



(b) 热能调度结果



(c) 天然气调度结果

图6 最差情况下BSP-MEG优化调度结果

Fig.6 Optimal dispatching results for BSP-MEG in worst scenario

表2 不同鲁棒系数下的MEG调度优化方案

Table 2 MEG scheduling optimization scheme under different robustness coefficients

项目	0	0.25	0.5	0.75	1	
场景 1	WPP/kW	4 854.0	4 768.0	4 510.0	4 082.6	3 940.6
	PV/kW	1 674.3	1 664.7	1 633.2	1 381.3	1 297.8
	F_1 /元	3 550.2	3 629.1	3 848.3	4 163.8	4 269.0
	F_2 /元	265.4	278.5	317.1	329.51	333.7
	F_3	6 873.7	6 150.2	3 858.9	3 135.4	2 894.2
场景 4	WPP/kW	4 862.5	4 774.4	4 510.0	4 397.8	4 360.3
	PV/kW	2 006.5	1 913.6	1 633.2	1 557.9	1 533.3
	F_1 /元	604.1	633.8	719.9	757.0	768.8
	F_2 /元	252.5	266.4	307.8	311.7	313.2
	F_3	941.8	908.2	740.0	639.1	605.4

5 结论

本文基于海岛可再生能源资源丰富的地理特征,针对风、光伏发电随机性与波动性给系统带来的不稳定,以及海岛淡水匮乏等问题,建立了一种含生物质废能转化与海水淡化耦合制氢装置的MEG。考虑运行成本最小、环境成本最小及风险最小的多目标,提出了MEG运行策略,并利用一种混合差分进化算法求解多目标优化模型。由算例结果得到以下结论:

1)海岛MEG在电-热-气-氢多能耦合前提下,能够满足生物质废能利用与淡水供应的需求。其中,海水淡化装置为电制氢提供淡水,电制氢与燃料电池形成电-氢-电循环,帮助实现日内调峰。此外,通过生物质废能转化,所得到的清洁燃料与提纯天然气满足了岛内燃气需求。

2)在WPP/PV出力的一般情景下,MEG的运营成本、环境成本和CVaR分别降低了78.2%、61.8%和77.9%,而弃电率从25.6%降至0.9%。当鲁棒性系数提高,决策者对风险更敏感,随着WPP和PV发电逐渐减少,运营成本和环境成本逐渐增加,CVaR逐渐减少。

3)提出的基于MOEA/D-DE框架的混合差分进化算法,能够有效求解多目标调度优化模型,在求解目标数较多的复杂多目标问题时表现更好。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李飞宇,随权,林湘宁,等.考虑储能船舶参与的近海海岛灵活供电网络规划[J].中国电力,2022,55(11):10-20.
LI Feiyu, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Flexible energy supply network planning for offshore islands considering participation of electric vessels[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 10-20.
- [3] 刘任,刘洋,许立雄,等.计及分布式需求响应的多微电网系统协同优化策略[J].电力建设,2023,44(5):72-83.
LIU Ren, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Multi-microgrid system collaborative optimization strategy considering distributed demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 72-83.
- [4] 郭旭升,文汀,林湘宁,等.面向多利益主体的清洁能源化大型离网海岛源储一体化优化定容[J].中国电机工程学报,2019,39(S1):1-14.

- GUO Xusheng, WEN Ting, LIN Xiangning, et al. Integration capacity optimization of multi-stakeholder generation-storage on large-scale off-grid island[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 1-14.
- [5] YANG S B, TAN Z F, LIU Z X, et al. A multi-objective stochastic optimization model for electricity retailers with energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277.
- [6] 赵雪楠,段凯悦,李萌,等.考虑调度决策非预期性的多阶段随机规划调度策略[J].电力建设,2022,43(10):87-97.
ZHAO Xuenan, DUAN Kaiyue, LI Meng, et al. Scheduling strategy of multi-stage stochastic programming considering non-anticipativity of scheduling decision[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 87-97.
- [7] 鲁明芳,李咸善,李飞,等.季节性氢储能-混氢燃气轮机系统两阶段随机规划[J].中国电机工程学报,2023,43(18):6978-6992.
LU Mingfang, LI Xianshan, LI Fei, et al. Two-stage stochastic programming of seasonal hydrogen energy storage and mixed hydrogen-fueled gas turbine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6978-6992.
- [8] YANG K Y, WANG Q P, ZHAO L. Two-stage stochastic programming for multi-objective optimization of sustainable utility systems integrating with combined heat and power units[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 451: 142143.
- [9] POULADKHAY M, MOGHADDAM M M, SAHAB A. A multi-objective two-stage stochastic programming approach for wind farms and demand side provider decisions using the weighted metric method[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101300.
- [10] 刘志宏,邵振通,丛鹏,等.基于节点可靠性重要度评估的配网侧储能鲁棒规划方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):33-39,45.
LIU Zhihong, SHAO Zhentong, CONG Peng, et al. A robust planning method for distribution-level energy storage based on nodal reliability importance assessment[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 33-39, 45.
- [11] 张晓毅,高振峰,孙雷.源网荷储协同主动配电网分布鲁棒优化调度系统[J].电子设计工程,2023,31(24):113-117.
ZHANG Xiaoyi, GAO Zhenfeng, SUN Lei. Distributed robust optimal dispatching system for active distribution network with source network load storage collaboration[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(24): 113-117.
- [12] 汤东升,钟伟东,慕小斌,等.基于鲁棒模型的多站融合场景下综合能源系统全局低碳策略[J].电测与仪表,2022,59(6):113-121,180.
TANG Dongsheng, ZHONG Weidong, MU Xiaobin, et al. Global low carbon strategy of integrated energy system in multi-station integration based on robust model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 113-121, 180.
- [13] 魏梅芳,吴燕,黎跃龙,等.基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):81-90.
WEI Meifang, WU Yan, LI Yuelong, et al. Day-ahead economic operation model of microgrid and its solving method based on distributed robust optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(12): 81-90.

- 2022, 34(12): 81-90.
- [14] 梁燕, 宋巍, 王尧, 等. 基于改进模糊均衡策略的碳循环虚拟电厂多目标鲁棒随机调度优化模型[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 82-94. LIANG Yan, SONG Wei, WANG Yao, et al. A multi-objective robust stochastic optimal dispatching model for carbon cycle virtual power plant based on improved fuzzy equilibrium strategy[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8): 82-94.
- [15] 孟令卓超, 杨锡运, 赵泽宇. 考虑光-荷不确定性和旋转备用约束的主动配电网经济优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 63-72. MENG Lingzhuochao, YANG Xiyun, ZHAO Zeyu. An economic optimal dispatch strategy for active distribution networks considering photovoltaic-load uncertainty and rotating reserve constraints[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 63-72.
- [16] 黄海涛, 田胜轩, 余文昶, 等. 计及需求响应的MPIES多时空尺度鲁棒随机优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(4): 38-49, 58. HUANG Haitao, TIAN Shengxuan, YU Wenchang, et al. Robust stochastic optimal scheduling of MPIES on multiple time-space scales considering demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(4): 38-49, 58.
- [17] 方绍凤, 周任军, 许福鹿, 等. 考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 50-57. FANG Shaofeng, ZHOU Renjun, XU Fulu, et al. Optimal operation of integrated energy system for park micro-grid considering comprehensive demand response of power and thermal loads[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(1): 50-57.
- [18] 肖俊明, 杨璐, 朱永胜, 等. 考虑用户满意度的主动配电网多目标动态经济调度[J]. 可再生能源, 2020, 38(5): 696-704. XIAO Junming, YANG Lu, ZHU Yongsheng, et al. Multi-objective dynamic economic dispatching of active distribution network considering user satisfaction[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(5): 696-704.
- [19] FANG X, CUI H T, YUAN H Y, et al. Distributionally-robust chance constrained and interval optimization for integrated electricity and natural gas systems optimal power flow with wind uncertainties[J]. Applied Energy, 2019, 252: 113420.
- [20] 杨洁, 吴志强, 范宏. 基于实时电价的含储能可再生资源系统协同调度策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 46-53. YANG Jie, WU Zhiqiang, FAN Hong. Collaborative scheduling strategy for renewable energy systems with energy storage based on real time price[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 46-53.
- [21] 朱庆, 林慧婕, 张宇峰. 考虑风电消纳的含P2G-CCS虚拟电厂优化调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 77-83. ZHU Qing, LIN Huijie, ZHANG Yufeng. Optimal scheduling of virtual power plants with P2G-CCS considering wind power consumption[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 77-83.
- [22] MOSTAFA A, KARAR M, MOHAMED M F D, et al. Reliable and robust observer for simultaneously estimating state-of-charge and state-of-health of LiFePO₄/sub batteries[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3609.
- [23] 邓杰, 姜飞, 王文辉, 等. 考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1692-1704. DENG Jie, JIANG Fei, WANG Wenye, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering electric-heat flexible load and hydrogen energy refined modeling[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1692-1704.
- [24] 朱一昕, 王靖芸, 毕恺韬, 等. 基于随机模型预测控制的数据中心微电网能量优化调度研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 102-108. ZHU Yixin, WANG Jingyun, BI Kaitao, et al. Energy optimization dispatch of data center microgrid based on stochastic model predictive control[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 102-108.
- [25] 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.
- [26] 王金锋, 于广亮, 姜炎君, 等. 基于阶梯碳交易的多微网电能合作运行优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 28-39. WANG Jinfeng, YU Guangliang, JIANG Yanjun, et al. The optimization strategy for collaborative operation of multi-microgrids based on tiered carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 28-39.
- [27] 王钰, 郝毅, 王磊, 等. 基于改进粒子群算法的多能微网多目标优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 29-36, 59. WANG Yu, HAO Yi, WANG Lei, et al. Multi-objective optimal dispatching for multi-energy microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 29-36, 59.
- [28] 刘雪飞, 庞凝, 王云佳, 等. 农村综合能源系统多层协同优化运行方法[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 63-71. LIU Xuefei, PANG Ning, WANG Yunjia, et al. Multi-layer cooperative optimization operation method for rural integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 63-71.
- [29] 朱思嘉, 余思雨, 王戈, 等. 基于条件风险价值的电动汽车充电站规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 13-18, 82. ZHU Sijia, YU Siyu, WANG Ge, et al. Research on charging station planning of EV based on CVaR[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 13-18, 82.
- [30] 李笑竹, 陈来军, 殷骏, 等. 面向低碳供能的多园区共享氢能系统容量规划[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2534-2544. LI Xiaozhu, CHEN Laijun, YIN Jun, et al. Capacity planning of multiple parks shared hydrogen energy storage system for low-carbon energy supply [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2534-2544.
- [31] JU L W, LU X L, YANG S B, et al. A multi-time scale dispatching optimal model for rural biomass waste energy conversion system-based micro-energy grid considering multi-energy demand response[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120155.
- [32] KARMELOS M, GEORGIU P, MAVROTAS G. A comparison of methods for the optimal design of distributed energy systems under uncertainty[J]. Energy, 2019, 178: 318-333.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期: 2024-01-11; 修改日期: 2024-07-17

作者简介: 张哲宇(1999), 河南驻马店人, 女, 硕士就读, 主要从事电力系统规划方面的研究工作。