

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.018

碳交易背景下基于 LGPG-P2G 的微电网容量优化配置

冯帅, 袁至, 王维庆, 何山

(可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 优化传统微电网的容量配置对其经济性的提升效果有限。为进一步提升经济性, 文中在传统微电网的基础上耦合垃圾填埋气发电(landfill gas power generation, LGPG)和电转气(power to gas, P2G), 提出一种基于 LGPG-P2G 的微电网模型。首先, 综合考虑碳交易和资金的时间价值对容量优化配置的影响, 引入全生命周期理论和经济学中的净现值分析法; 然后, 以全生命周期的收益最大为目标, 利用变异粒子群算法求解 4 种场景下的微电网容量最优配置, 并使用 Cplex 求解传统微电网模型和所提微电网模型容量最优配置下的最优调度方案。结果表明在碳交易背景下基于 LGPG-P2G 的微电网模型具有更好的经济性。

关键词: 微电网; 垃圾填埋气发电(LGPG); 电转气(P2G); 碳交易; 净现值分析法; 容量配置

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0157-11

0 引言

传统微电网模型一般由风力发电(wind turbine, WT)、光伏发电(photovoltaic, PV)、燃气轮机(gas turbine, GT)和储能电池构成^[1-2], 合理配置微电网的容量是提高微电网经济性的主要研究方向。

为合理配置微电网的容量, 提升微电网的经济性, 文献[3-4]构建混合储能的微电网模型, 以总净现值成本最小为目标对储能的容量配置进行优化, 降低了储电池的投资成本, 提高了传统微电网模型的经济性。文献[5]构建了包含度电成本、可再生能源利用率和碳排放处理成本的微电网多目标优化模型, 以传统微电网模型的经济性、环保性和可靠性为目标确定了风机、光伏和储能的最优容量配置, 降低了微电网的建设成本和运维成本, 提高了微电网的经济性。文献[6]构建了并网型风、光、储微电网容量多目标优化模型, 以最小系统年等额成本、最小系统年碳排放总额和最小系统外购电比例为优化目标, 进而获得各方案下风机、光伏及储能装置的最优容量配置。文献[7]建立以投资成本和可再生能源利用率综合最优的多目标优化配置模型, 提高了传统微电网的经济性。

上述文献对传统微电网中各电源容量进行了优化配置以提高系统经济性, 但传统微电网受模型结构所限, 容量优化配置对经济性的提升效果有限。文中为进一步提高微电网经济性, 提出了一种基于垃圾填埋气发电(landfill gas power generation, LGPG)和电转气(power to gas, P2G)的孤岛型微

网模型, 结合西北某地区的运行数据, 运用自适应变异粒子群优化(adaptive mutation particle swarm optimization, AMPSO)算法对模型进行了求解, 并对最优配置的优化调度, 对容量配置的结果进行了验证。

1 模型结构

文中研究基于 LGPG-P2G 的孤岛型微电网模型, 见图 1。该系统主要由 PV、WT、LGPG 系统、P2G 系统及用户构成。LGPG 系统由 GT、填埋气预处理单元(landfill gas pretreatment unit, LGPU)、垃圾填埋气化单元(landfill gasification unit, LFGU)组成。P2G 系统由电解池单元(electrolytic cell unit, ECU)、氢转天然气单元(hydrogen to gas unit, H2GU)、甲烷存储单元(methane storage unit, MSU)组成。所提微电网模型中 P2G 中的 H2GU 可利用 LGPG 中产生的 CO₂ 以降低 P2G 的购气成本, 降低 LGPG 中的碳排放成本。H2GU 在填谷时产生的 CH₄ 可用作 LGPG 中 GT 的燃料, 降低 GT 的购气成本。

当有富余电量时, 通过 ECU 将电能转化为 H₂。H2GU 利用 H₂ 和 LGPU 及 GT 产生的 CO₂ 合成 CH₄ 进行大容量的存储。当电网功率出现功率缺额时, 利用合成的 CH₄ 通过 GT 一方面可提升 LGPG 系统的出力, 另一方面可降低 ECU 的运行。

1.1 LGPG 系统

LGPG 系统主要包括 GT、LGPU、LFGU 三大部分。LFGU 主要是对垃圾进行填埋收集和导出产生的垃圾填埋气(landfill gas, LFG)。LGPU 主要是对 LFG 进行处理, 首先采用活性炭吸附的干法脱硫、脱硅^[8], 随后经过滤器过滤后由风机加压输送至发

收稿日期: 2022-11-12; 修回日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52067020)

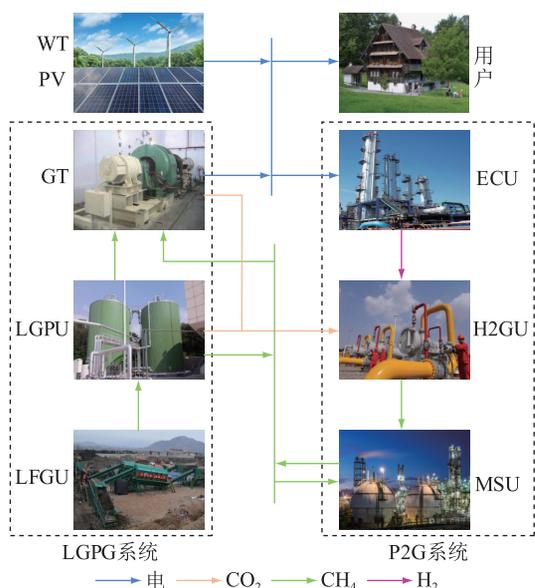


图1 基于LGPG-P2G的孤岛型微电网模型

Fig.1 Island type microgrid model based on LGPG-P2G 电系统,最后采用二级膜提纯工艺,完成对LFG中CH₄和CO₂的有效分离^[9]。分离出的CO₂送入H2GU,CH₄送入MSU或GT。

GT按照“以热定电”的模式运行,其工作耗电量、电功率及产气量的模型^[10]分别如式(1)一式(3)所示。

$$V_{GT} = \frac{H_{GT}}{(1 - \eta_{GT}) \eta_{GT}^r K q} \quad (1)$$

$$P_{GT} = \frac{H_{GT} \eta_{GT}}{(1 - \eta_{GT}) \eta_{GT}^r K} \quad (2)$$

$$G_y = M_y G_0 F e^{-Ft} \quad (3)$$

式中: H_{GT} 为GT的热功率; η_{GT} 为GT的发电效率; η_{GT}^r 为余热回收效率; K 为制热系数; q 为天然气的高热值; M_y 为第 y 年垃圾填埋量; G_0 为单位重量垃圾理论最大产气量; F 为垃圾的产气系数。

1.2 P2G系统

P2G的流程如图2所示。

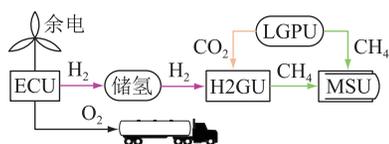


图2 P2G流程

Fig.2 Flow chart of P2G

水在高温、通电和催化剂的条件下分解为H₂和O₂。H₂和LGPU产生的CO₂在高温高压下产生CH₄。P2G系统功率的数学模型^[11-12]的表示方式如式(4)所示。

$$P_{P2G,t} = \eta_{P2G} P_{P2G,t}^{in} \quad (4)$$

式中: η_{P2G} 为P2G装置的转化效率; $P_{P2G,t}^{in}$ 为P2G系统 t 时刻的输入功率。

1.3 光伏发电系统

太阳辐照强度是影响光伏组件出力的主要因素,光伏组件输出功率^[13]如式(5)所示。

$$P_{PV}(t) = \alpha P_{STC} I_t [\rho(T_w(t) - T_{STC}) + 1] / I_{STC} \quad (5)$$

式中: α 为降额因子; P_{STC} 为PV在标准测试情况下的最大测试功率; I_t 为 t 时刻的太阳辐射强度; ρ 为温度系数; $T_w(t)$ 为 t 时刻组件工作温度; T_{STC} 为标准测试情况下组件的工作温度; I_{STC} 为标准测试情况下太阳辐射强度。

1.4 风力发电系统

WT的输出功率主要与风机安装地的风速有关。风机的实际输出功率^[13-14]如式(6)所示。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_i \\ P_{WT_r} \frac{v^3 - v_i^3}{v_r^3 - v_i^3} & v_i \leq v \leq v_r \\ P_{WT_r} & v_r < v \leq v_o \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{WT_r} 为WT的额定输出功率; v 为实际风速; v_i 为切入风速; v_r 为额定风速; v_o 为切出风速。

1.5 储能系统

文中传统微电网模型中的储能单元主要采用蓄电池,蓄电池充、放电功率^[15-16]如式(7)和式(8)所示。

$$P_{ch}(t) = \frac{S_{SOC}(t) - S_{SOC}(t-1)(1-\tau)}{\mu_b \Delta t} \quad (7)$$

$$P_{dis}(t) = \frac{[S_{SOC}(t-1)(1-\tau) - S_{SOC}(t)] \mu_d}{\Delta t} \quad (8)$$

式中: $S_{SOC}(t)$ 、 $S_{SOC}(t-1)$ 分别为蓄电池在 t 时刻、 $t-1$ 时刻的容量; τ 为储能损失系数; μ_b 、 μ_d 分别为储能电池充放电效率。

2 微电网模型全生命周期经济性分析

成本-收益分析法是对投资项目的预测成本和预测收益进行综合比较,以判断方案是否具有经济可行性^[17]。文中所提微电网的成本、收益如图3所示。

为准确分析传统微电网模型和基于LGPG的微电网模型的经济性,文中引入了全生命周期理论对微电网成本和收益进行分析。全生命周期的成本和收益主要指2种微电网模型中的所有设备从设备购买到设备报废的整个生命周期中的各项支出和收益的总费用。

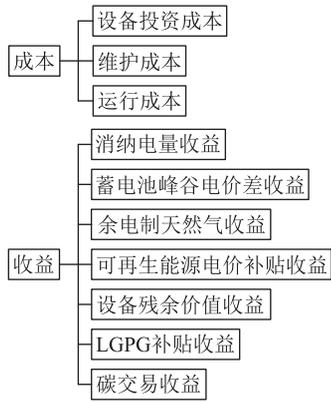


图3 微电网模型的成本和收益

Fig.3 Cost and benefit of microgrid model

微电网的设备生命周期长达 20 a 左右,为避免资金的时间价值对经济性的影响,文中引入经济学中的净现值(net present value, NPV)分析法对全生命周期的成本与收益进行分析。将各年的现金流折算为现值,再与最初的成本求差得 NPV^[18],如式(9)所示。

$$NPV = \sum_{y=0}^T \frac{I_0(y) - E_0(y)}{(1 + \eta)^y} \quad (9)$$

式中: T 为全寿命周期年限; η 为折现率; $I_0(y)$ 为第 y 年项目的现金流入; $E_0(y)$ 为第 y 年项目的现金流出。

2.1 微电网模型成本分析

2.1.1 设备投资成本

微电网的总设备投资成本折算到第一年的现值可用式(10)进行表示。

$$E_k = \sum_{a=1}^n K_a P_a (1 + \delta) + \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^g \frac{E_a P_a (1 + \delta)}{(1 + \eta)^{t_a b}} \quad (10)$$

式中: n 为微电网中的设备数; K_a 为第 a 个设备的单位功率投资成本; P_a 为第 a 个设备装机容量; δ 为安装过程中相应的电力电子装置占该设备成本的比例; t_a 为第 a 个设备的使用寿命; b 为第 a 个设备的重置次数; g 为重置总数。

2.1.2 维护成本

微电网维护成本一般正比于装机容量^[19],因此微电网的维护成本如式(11)所示。

$$E_w = \sum_{a=1}^n J_a P_a \quad (11)$$

式中: J_a 为第 a 个设备的单位容量维护成本。

2.1.3 运行成本

传统微电网模型中运行成本主要包括储能单元的运行成本及 GT 的购气费用。基于 LGPG-P2G 的微电网模型运行成本主要包括垃圾转运填埋过

程中的费用。传统微电网结构运行成本如式(12)所示,基于 LGPG-P2G 的微电网模型运行成本如式(13)所示。

$$E_b = I_b \mu_b P_{ch} + \frac{I_b P_{dis}}{\mu_d} + I_{gt} P_{gt} \quad (12)$$

式中: I_b 为蓄电池单位运行成本; P_{ch} 、 P_{dis} 分别为蓄电池充电功率、放电功率; I_{gt} 为 GT 单位出力成本; P_{gt} 为 GT 出力总和。

$$E_l = I_y M_y \quad (13)$$

式中: I_y 为第 y 年扣除垃圾处理补贴后每吨垃圾的填埋处理费。

2.2 微电网模型收益分析

2.2.1 消纳电量收益

分布式电源生产出来的电能首先可用于满足系统的用户侧需求。传统微电网模型和基于 LGPG-P2G 的微电网均采用峰谷电价机制的相关规定来计算消纳电量收益。消纳电量收益的计算如式(14)所示。

$$I_g = a_k P_k + a_v P_v + a_f P_f \quad (14)$$

式中: a_k 、 a_v 、 a_f 分别为峰时、谷时、平时电价; P_k 、 P_v 、 P_f 为对应的峰时、谷时、平时的负荷用电量。

2.2.2 蓄电池峰谷电价差收益

传统微电网模型中蓄电池在负荷高峰时放出电能,在负荷低谷时吸收电能。根据峰谷电价机制相关规律,负荷高峰时期电价较高,负荷低谷时期电价较低。因此,蓄电池利用峰谷电价差可获得一定收益。传统微电网模型中蓄电池峰谷电价差收益,如式(15)所示。

$$I_{kv} = (a_k - a_v) P_{re} \mu_b \mu_d \quad (15)$$

式中: P_{re} 为微电网电量余量总和。

2.2.3 余电制天然气收益

当电量充足时 P2G 系统将余电转换为 CH_4 ,以提高微电网的经济性。基于 LGPG-P2G 的微电网模型中制备天然气所得的收益 I_{se} 如式(16)所示。

$$I_{se} = P_{re} m \mu_p \beta - a_v P_{re} \quad (16)$$

式中: m 为余电制天然气的单位能耗; μ_p 为 P2G 的效率; β 为市场单位天然气售价。

2.2.4 可再生能源电价补贴收益

传统微电网模型和基于 LGPG-P2G 的微电网模型中可再生能源发电补贴收益为补贴电价与纳入补贴计划的可再生能源对应发电总量的乘积,如式(17)所示。

$$I_{ng} = \sigma P_{all} \quad (17)$$

式中: σ 为政府补贴电价; P_{all} 为系统中纳入补贴计划的新能源对应发电总量。

2.2.5 设备残余价值

残值是指设备的全寿命周期结束后,对其进行处理所得到的收益。微电网中的太阳能电池板、GT和蓄电池等在寿命结束后都可以回收变卖,产生不同数量的残值收入。设备残余价值折算到第一年的现值 I_{rv} ,如式(18)所示。

$$I_{rv} = \sum_{y=1}^T \frac{\sum_{a=1}^n K_a P_a \alpha_a}{(1 + \eta)^y} \quad (18)$$

式中: α_a 为第 a 个设备单位残余价值。

2.2.6 LGPG 补贴

目前国家对 LGPG 有多项支持政策,主要有税收政策补贴、贷款补贴等。LGPG 补贴折算到第一年的现值 I_c ,如式(19)所示。

$$I_c = \sum_{y=1}^T \frac{P_{all} \gamma + I_{se} \gamma_1}{(1 + \eta)^y} + E_k \gamma_2 \delta \quad (19)$$

式中: γ 为定额税率; γ_1 为税率; γ_2 为贷款补贴; δ 为贷款比例。

2.3 计及碳利用的碳交易收益

文中采用基准线法确定各发电系统的碳排放配额。通过将发电装置的实际产能与政府规定的基准值相乘,得到系统各单元的碳排放配额,如式(20)所示。

$$D = \sum_{a=1}^n \lambda_a Q_a \quad (20)$$

式中: λ_a 为第 a 个设备单位供电量碳排放配额,由国家发改委发布的“区域电网基准线排放因子”确定; Q_a 为第 a 个设备的供电量。

典型微电网和基于 LGPG-P2G 的微电网中各发电设备实际碳排放如式(21)所示。

$$f_{ap} = \sum_{a=1}^n \partial_a Q_a \quad (21)$$

式中: ∂_a 为第 a 个设备的发电量碳排放强度。

当企业产生的碳排放低于初始配额时,可将剩余配额拿到碳交易市场进行出售。反之则要购买超额部分的配额。典型微电网碳交易收益为 I_{co} ,如式(22)所示。

$$I_{co} = U_p (D - f_{ap}) \quad (22)$$

式中: U_p 为碳交易价格。

基于 LGPG-P2G 的微电网模型中计及碳利用的碳交易收益如式(23)所示。

$$I_{er} = U_p (D - f_{ap} + Q_{P2G,t}) \quad (23)$$

式中: $Q_{P2G,t}$ 为 H2GU 消耗的 CO_2 。

2.4 约束条件

各电源容量及出力约束如式(24)所示。

$$\begin{cases} 0 < P_a \leq P_a^{\max} \\ P_s^{\min} \leq P_s \leq P_s^{\max} \\ P_{WT} + P_{PV} + P_{dis} + P_{GT} = P_{load} \\ P_{WT} + P_{PV} + P_{GT} = P_{load} + P_{gas} \end{cases} \quad (24)$$

式中: P_a^{\max} 为对应分布式电源所允许的最大装机容量; P_s 为 WT、PV、GT 和蓄电池的功率; P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别为出力的最低功率限制和最大功率限制; P_{WT} 、 P_{PV} 、 P_{GT} 、 P_{dis} 、 P_{load} 、 P_{gas} 分别为单位时刻 WT 出力、PV 出力、GT 出力、储能电池出力、本地消纳电量及 P2G 系统消纳电量。

蓄电池约束如式(25)所示。

$$\begin{cases} P_{ch}^{\min} \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch}^{\max} \\ P_{dis}^{\min} \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{\max} \\ P_{ch}(t) P_{dis}(t) = 0 \\ S_{SOC}^{\min} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别为 t 时刻的充电功率和放电功率; P_{ch}^{\min} 、 P_{ch}^{\max} 分别为最小充电功率和最大充电功率; P_{dis}^{\min} 、 P_{dis}^{\max} 分别为最小放电功率和最大放电功率; S_{SOC}^{\min} 、 S_{SOC}^{\max} 分别为蓄电池的最小剩余容量和最大剩余容量。

P2G 约束如式(26)所示。

$$0 \leq P_{P2G} \leq P_{P2G}^{\max} \quad (26)$$

式中: P_{P2G}^{\max} 为 P2G 设备的最大功率。

2.5 应用罚函数思想的 AMPSO 求解

考虑 LGPG 补贴的逐渐降低及碳交易的全面实施,碳交易有望提高微电网经济性。为充分证明所提基于 LGPG-P2G 的微电网模型的优越性,文中共设 4 种场景以对比分析基于 LGPG-P2G 的微电网模型与典型微电网的经济性。

场景一:典型微电网^[20]结构下考虑 2.1 节、2.2 节成本收益;场景二:基于 LGPG-P2G 的微电网模型考虑 2.1 节、2.2 节成本收益;场景三:在场景一的基础上考虑文中碳交易收益;场景四:在场景二的基础上计及碳利用的碳收益但不考虑 LGPG 补贴收益。

场景一、场景二、场景三、场景四的年现金流入及目标函数分别如式(27)一式(30)所示。

$$\begin{cases} I_1 = I_{lg} + I_{kv} + I_{ng} \\ f_1 = \sum_{y=1}^T \frac{I_0 - E_w - E_b}{(1 + \eta)^y} - E_k + I_{rv} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} I_2 = I_{lg} + I_{se} + I_{ng} \\ f_2 = \sum_{y=1}^T \frac{I_0 - E_w - E_L}{(1 + \eta)^y} - E_k + I_{rv} + I_c \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} I_3 = I_{lg} + I_{kv} + I_{ng} + I_{co} \\ f_3 = \sum_{y=1}^T \frac{I_0 - E_w - E_b}{(1 + \eta)^y} - E_k + I_{rv} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} I_4 = I_{lg} + I_{se} + I_{ng} + I_{er} \\ f_4 = \sum_{y=1}^T \frac{I_0 - E_w - E_L}{(1 + \eta)^y} - E_k + I_{rv} \end{cases} \quad (30)$$

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是一种基于群体搜索的算法^[21], 建立在模拟鸟群社会的基础上。该算法的优势在于其算法流程简单, 容易实现且无过多须要调节的参数。文中采用的 AMPSO 算法在 PSO 算法中加入了变异环节。通过设置变异概率随机数使粒子群有一定几率改变自身位置, 向全局最优位置运动, 降低了早熟收敛对算法优化性能的影响。粒子群算法的具体流程如图 4 所示。

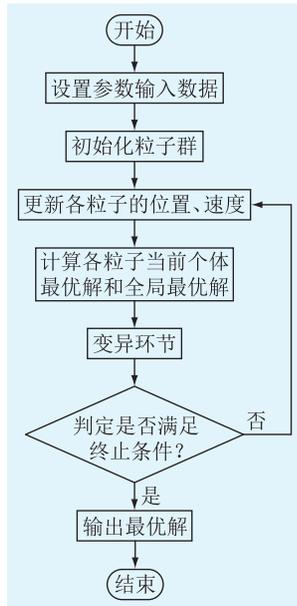


图 4 AMPSO 算法流程

Fig.4 AMPSO algorithm flow chart

算法优化流程如下:

(1) 参数设置。个体学习因子和群体学习因子均取 1.4, 惯性权重为 0.8, 种群规模为 500。生成粒子群的位置矩阵 $\mathbf{p}_x(k)$ 和速度矩阵 $\mathbf{p}_v(k)$ 。

(2) 初始化个体极值和全局极值。

(3) 粒子群迭代。根据式 (31) 更新粒子群算法的速度和位置。

$$\begin{cases} \mathbf{p}_v(k+1) = w\mathbf{p}_v(k) + c_1r(\mathbf{P}_{id} - \mathbf{p}_v) + \\ \quad c_2r(\mathbf{P}_{gd} - \mathbf{p}_v) \\ \mathbf{p}_x(k+1) = \mathbf{p}_x(k) + \mathbf{p}_v(k) \end{cases} \quad (31)$$

式中: $\mathbf{p}_v(k)$ 、 $\mathbf{p}_x(k)$ 分别为第 k 次迭代时粒子的速度矩阵与位置矩阵; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为个体

学习因子和群体学习因子; \mathbf{P}_{id} 为第 i 个变量的个体最优解; \mathbf{P}_{gd} 为粒子的全局最优解; r 为 0~1 之间的随机数。

(4) 自适应变异。产生一个服从正态分布的随机数 r , 如果 r 小于变异率 p , 则进行变异, 变异率 p 取 0.8^[22]。当满足变异条件时使第 j 个粒子的位置 $p_{x,j}(k)$ 按式 (32) 进行变异, 以达到跳出局部最优的目的。

$$p_{x,j}(k) = x_{\min} + r(x_{\max} - x_{\min}) \quad (32)$$

式中: x_{\min} 、 x_{\max} 分别为粒子运动边界的最小值与最大值。

(5) 循环结束。当满足迭代终止条件时, 结束迭代, 输出粒子群群体最优位置及适应度值。

文中使用上述 AMPSO 算法对目标函数 f 进行求解。计算机配置为: CPU 为 AMD Ryzen 53500U, 主频为 2.10 GHz, 8 G RAM, 操作系统为 Windows 10 64 位操作系统, 计算环境为 Matlab 2019(b)。以微电网全寿命周期的收益的最大值或达到迭代次数为终止条件。PV、WT、GT、蓄电池和 P2G 的装机容量为目标函数中的自变量。

AMPSO 算法在粒子群迭代过程中使用了罚函数的思想对约束条件进行处理。罚函数是根据约束条件的特点构造一个惩罚函数。在求解过程中对那些企图违反约束条件的目标点进行惩罚。离约束条件越远惩罚越大。

$$f_{\max} = f + p_u(b) \quad (33)$$

式中: f 为微电网全寿命周期的收益, 是目标函数; p_u 为惩罚因子; b 为约束条件。在粒子群迭代过程中, 当目标函数为求最大值时, 不满足约束条件时则惩罚因子为一个很小的数, 使得 f_{\max} 较小以促使下一次迭代时粒子向最大值附近移动。

3 算例分析

3.1 算例数据

文中以西北某地区一年的气象数据和当地居民一年实际用电量为基础, 采用 AMPSO 算法进行微电网容量配置优化, 数据采样间隔为 1 h, 全年 8 760 h 的逐时负荷曲线、逐时风速曲线和逐时太阳辐射强度曲线分别如图 5—图 7 所示。

运行成本和维护成本以年为单位进行核算, 后期投资成本及收益则均根据 NPV 折算到首年。微电网全生命周期为 20 a。LGPG 中填埋场的投资成本数据尚未有具体的数据, 文中关于 LGPG 中填埋场的投资成本按照文献[23]进行估算, 相关成本如表 1 所示。设备折现率为 8%, 定额税率为 0.000 4

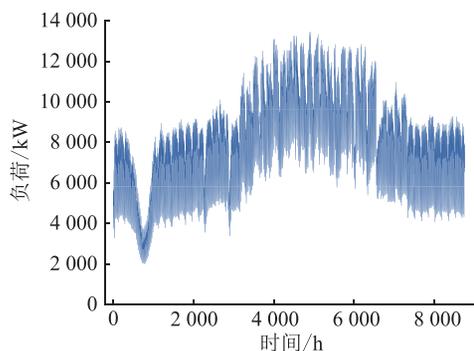


图5 全年逐时负荷曲线

Fig.5 Annual hourly load curve

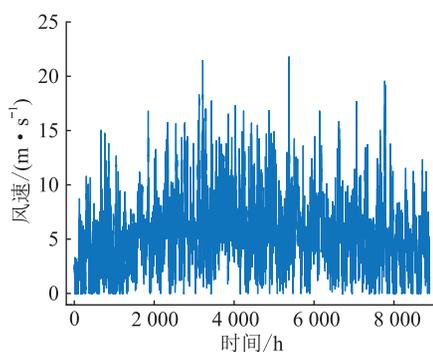


图6 全年逐时风速曲线

Fig.6 Annual hourly wind speed curve

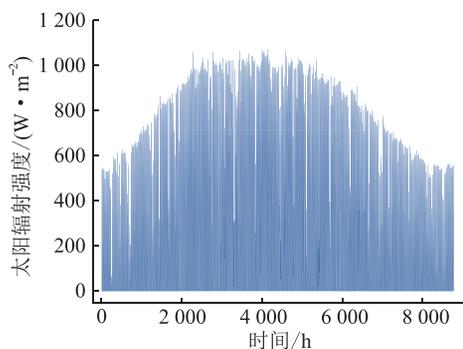


图7 全年逐时太阳辐射强度曲线

Fig.7 Annual hourly solar radiation intensity curve

元/(kW·h), 贷款补贴为 2%, 贷款比例为 50%, 天然气的售价取 1.4 元/m³, 碳交易价格取 150 元/t, 垃圾处理量为 1 500 t/d, 政府补贴电价取 0.08 元/(kW·h), 单位供电量的碳排放配额取 0.346 7 t/(MW·h), 单位分布式电源额定容量、电量分别为 1 kW、1 kW·h, 各分布式电源所允许接入最大容量均为 10 MW。上述部分数据来自于文献[18, 24-26]。微电网各设备对应的参数、分时电价、各发电设备碳排放强度^[27-29] 分别如表 1—表 3 所示。此外, 蓄电池单位容量设备投资成本为 0.108 0 万元/(kW·h), 维护成本为 30 元/(kW·h), 设备寿命为 10 a。

表 1 设备参数

Table 1 Equipment parameters

设备名称	单位容量设备投资成本/(万元·kW ⁻¹)	维护成本/(元·kW ⁻¹)	设备寿命/a
PV	0.450 0	96	25
WT	0.538 4	108	20
LGPG	0.487 3	533	25
GT	0.268 0	77	25
P2G	0.560 0	280	20

表 2 峰谷电价

Table 2 Peak-valley price

时间	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰时(10:00—13:00、19:30—00:30)	0.657 5
谷时(00:30—08:30)	0.174 0
平时(08:30—10:00、13:00—19:30)	0.415 7

表 3 各种发电类型碳排放相关数据

Table 3 Data on carbon emissions of various power generation types

发电类型	CO ₂ 排放率/[t·(MW·h) ⁻¹]
GT	0.4
PV	0
WT	0

3.2 综合效益分析

运用 AMPSO 算法对所建模型进行求解, 得到微电网各单元容量的最优配置。不同场景下微电网模型容量配置如表 4 所示。

表 4 微电网结构容量配置

Table 4 Microgrid structure capacity configuration

场景	光伏/kW	风机/kW	GT/kW	LGPG/kW	P2G/kW	蓄电池/(kW·h)
一	3 193	5 394	7 255		0	6 118
二	3 010	5 342		8 043	1 363	0
三	3 173	5 382	7 232		0	6 108
四	2 984	5 333		8 033	1 343	0

根据 2.1 节—2.3 节成本收益计算公式对具体算例最优配置下各成本收益进行对比分析, 4 种运行场景下的具体成本效益如图 8—图 12 所示。

由图 8—图 10 可知, 在相同的运行负荷情况下, 场景二相对于场景一投资成本增加了 10.31%, 年维护成本增加 390.49 万元, 年运行成本降低了 16.14%; 场景四投资成本相对场景一增加 9.64%, 年维护成本增加了 389.58 万元, 而年运行成本降低了 19.18%, 但是场景二的总盈利额仍高于场景一, 场景四的总盈利额仍高于场景三。场景四相对于场景二总投资成本降低了 29.22 万元、年运行成本和年维护成本分别降低了 64.34 万元和 1.44 万元。

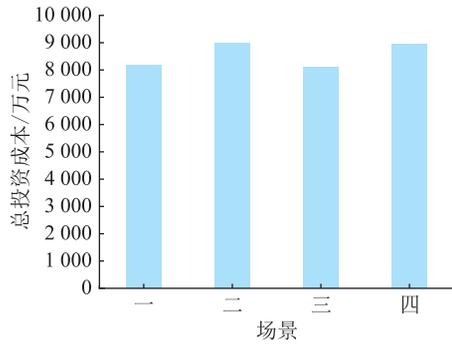


图 8 4 种场景总投资成本

Fig.8 Total investment cost of four scenarios

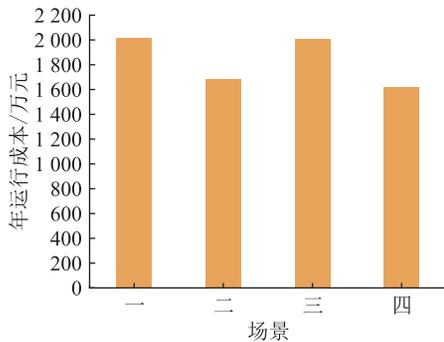


图 9 4 种场景年运行成本

Fig.9 Annual operating cost of four scenarios

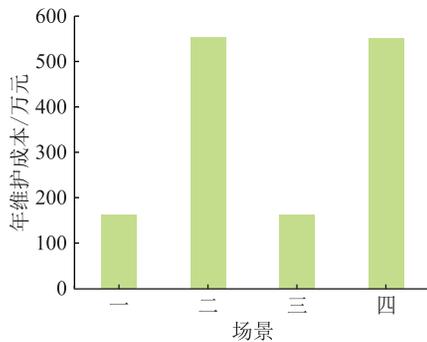


图 10 4 种场景年维护成本

Fig.10 Annual maintenance cost of four scenarios

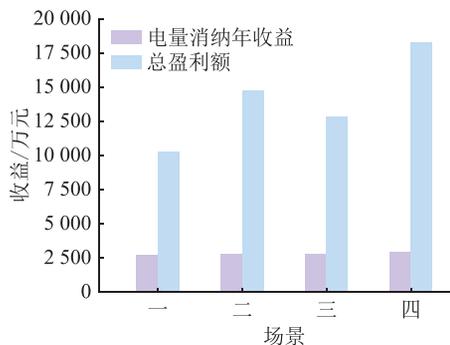


图 11 4 种场景总盈利与电能消纳收益

Fig.11 Total profit and electric energy consumption income in four scenarios

根据 2.1 节成本计算公式及表 4 数据,场景二、四中运行成本降低的主要原因在于:首先场景二、四中

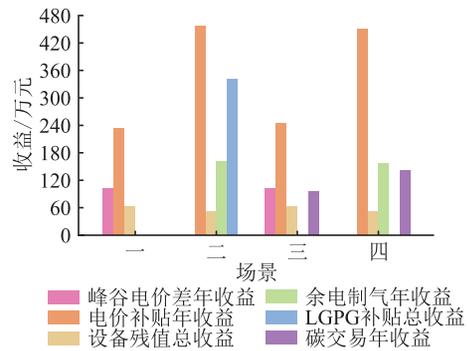


图 12 4 种场景各项收益对比

Fig.12 Comparison of various benefits in four scenarios

LGPG 作为生物质能发电技术可获得一定的电价补贴,然后所提基于 LGPG-P2G 的微电网模型中 LGPG 与 P2G 进行了优势互补,P2G 中的 H2GU 吸收了 GT 和 LGPU 产生的 CO₂,降低了 P2G 系统的购气成本且 LGPU 产生的 LFG 降低了 GT 的购气成本。

由图 11 可知,4 种场景在图 5 负荷的情况下,场景二的全生命周期总盈利额相对于场景一增加了 43.49%,场景四的全生命周期总盈利额相对于场景三增加了 42.56%。对比场景三与场景四,即使不考虑国家对 LGPG 的补贴,场景四的全生命周期经济性仍远高于场景三。造成上述结果的主要原因在于:场景四在碳交易背景下将 LGPG 和 P2G 系统进行了优势互补,P2G 中的 H2GU 使用了 LGPU 和 GT 产生的 CO₂,既降低了 P2G 单元的购气成本又降低了 GT 的碳排放,使得所提新型微电网模型经济性更好。场景三相对于场景一,系统的全生命周期盈利额增加了 25.02%。场景四相对于场景二,系统的全生命周期盈利额增加了 24.21%。因此碳交易的实施将提高微电网经济性、促进微电网发展。

由图 12 可知,场景四相对于场景三碳交易年收益增长了 48.52%,收益的增加得益于 P2G 中 H2GU 消耗了 LGPG 中产生的部分 CO₂;场景二获得了更多的补贴收益,包括电价补贴收益和 LGPG 补贴收益;场景二、四中余电制天然气的收益均高于场景中峰谷电价差收益。电价补贴收益的大幅增加得益于场景二的 GT 使用了 LFG 作为燃料,该发电方式既降低了 GT 和余电制天然气的购气成本又增加了电价补贴收益。

3.3 最优配置下的调度方案

场景三的容量配置结果相对于场景一更优,场景四的容量配置结果相对于场景二更优,因此文中使用 Cplex 求解器对场景三、四配置方案下的四季典型日进行了优化调度。调度周期为 24 h,此时年

现金流入及目标函数,如式(34)、式(35)所示。调度结果如图13和图14所示。

$$\begin{cases} I_5 = I_{lg} + I_{kv} + I_{ng} + I_{co} \\ f_5 = I_0 - E_w - E_b \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} I_6 = I_{lg} + I_{se} + I_{ng} + I_{er} \\ f_6 = I_0 - E_w - E_L \end{cases} \quad (35)$$

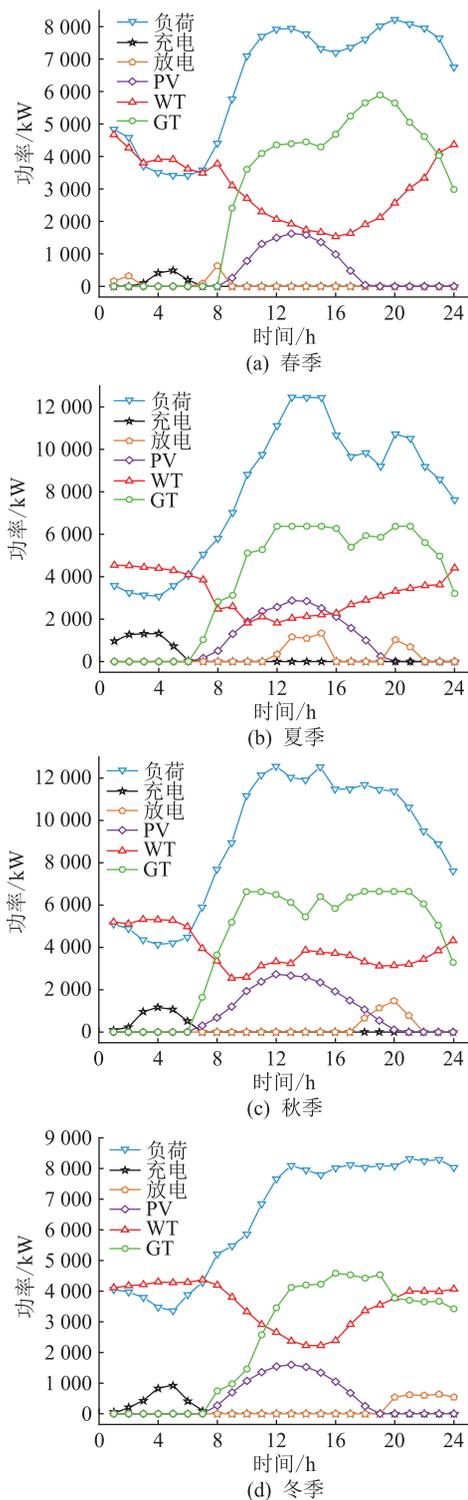


图13 传统微电网模型四季典型日各单元出力最优配置
Fig.13 Optimal allocation of output of each unit on typical days in four seasons in traditional microgrid model

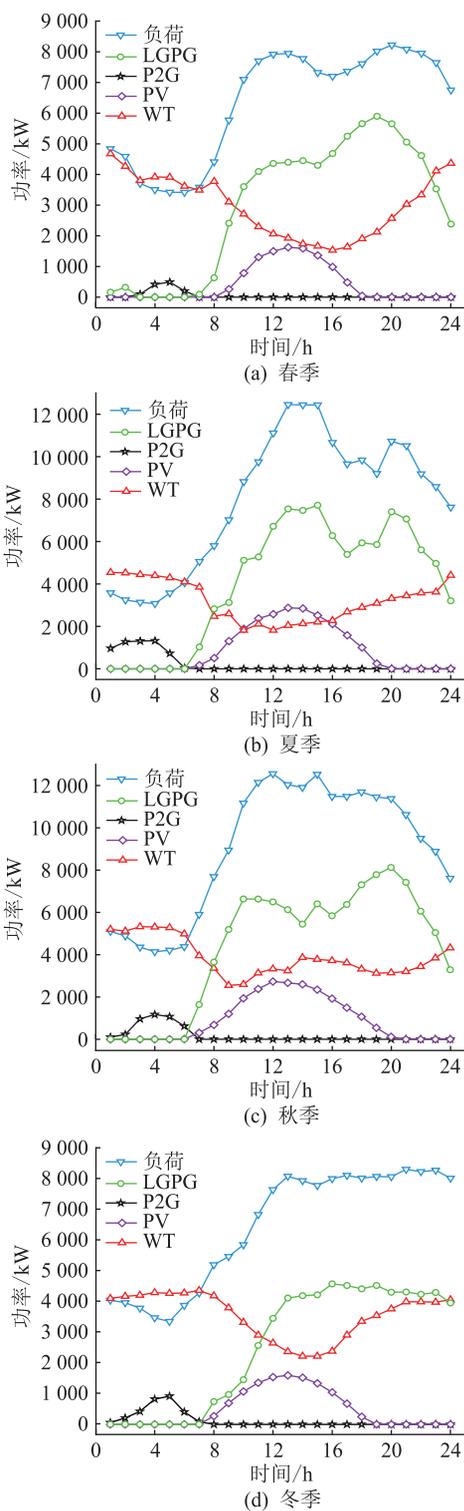


图14 基于LGPG-P2G的微电网四季典型日各单元出力最优配置
Fig.14 Optimal output configuration of each unit in typical day of four seasons based on LGPG-P2G microgrid model

由图13可知,风电的最大出力约为5300kW、光伏的最大出力约为3100kW、GT出力最大约为7000kW、蓄电池在夏季1h—5h吸收电能最多约为6000kW·h,上述四季典型日最大出力结果符合表4容量配置结果。图13(b)和图13(c)夜间风电

余量较多,此时在满足负荷需求的同时由储能电池吸收电能,在负荷高峰、电价高峰时蓄电池供电获得一定收益,如图 13(b)中 12 h—15 h、19 h—21 h 蓄电池将负荷低谷时吸收的电能释放,在保障系统功率平衡的同时获得一定的收益。

由图 14 可得,风电出力最大值约为 5 300 kW、光伏出力最大值约为 2 900 kW、LGPG 出力最大约为 8 000 kW、P2G 的最大功率约为 1 300 kW,上述四季典型日最大出力结果符合表 4 的容量配置结果。由图 14 可知,在夜间 1 h—6 h 时段风电余量最大可达 1 300 kW,而此时处于负荷低谷时,P2G 将多余电能转换为 CH_4 作为 LGPG 的燃料,降低 LGPG 的运行成本;在负荷高峰而风电等清洁能源供应不足时依靠 LGPG 出力可控的特点增加出力满足系统功率平衡。

4 结论

文中通过在传统微电网模型中利用 LGPG 和 P2G 进行优势互补,提出了基于 LGPG-P2G 的孤岛型微电网模型,通过对所提模型求解得出了以下结论:

(1) 最优容量配置下所提基于 LGPG-P2G 的微电网模型比传统微电网模型全生命周期收益增加了 42.56%,因此其经济性更好,更具发展潜力。

(2) 在碳交易中,场景三相对于场景四碳交易年收益增加了 48.52%,因此基于 LGPG-P2G 的微电网模型与传统微电网模型相比可获得更多的碳交易收益。

(3) 场景三相对于场景一的全寿命周期盈利额增加了 25.02%;场景四相对于场景二的全寿命周期盈利额增加了 24.21%。因此碳交易的全面实施对基于 LGPG-P2G 的微电网模型和传统微电网模型的经济性都有一定的提高。

该模型适用于可再生能源丰富的西北地区或土地资源短缺的岛屿,在填埋场上铺设光伏板等可再生能源设备,提高资源利用率和发电量。孤岛型微电网一般采用就地消纳,故文中未考虑网损收益。未来可深入探讨网损收益对两种微电网结构经济性的影响。

参考文献:

[1] 孙海霞,朱立位,韩钰倩,等. 基于非合作博弈的微网混合储能容量配置方法[J]. 全球能源互联网,2021,4(5):454-463. SUN Haixia,ZHU Liwei,HAN Yuchuan,et al. Capacity configuration method of hybrid energy storage system in microgrids based on a non-cooperative game model[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2021,4(5):454-463.

[2] 杨力俊,潘伟,田闻旭. 计及需求响应和风光不确定性的微电网多目标优化模型[J]. 电力需求侧管理,2022,24(3):1-8. YANG Lijun,PAN Wei,TIAN Wenxu. Multi-objective optimization model of microgrid considering demand response and uncertainty of wind power and photovoltaic[J]. Power Demand Side Management,2022,24(3):1-8.

[3] 李彦哲,郭小嘉,董海鹰,等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(6):123-128. LI Yanzhe,GUO Xiaojia,DONG Haiying,et al. Optimal capacity configuration of wind/PV/storage hybrid energy storage system in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(6):123-128.

[4] 陈景文,肖妍,莫瑞瑞,等. 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(10):59-66. CHEN Jingwen,XIAO Yan,MO Ruirui,et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction[J]. Power System Protection and Control,2021,49(10):59-66.

[5] 唐文东. 并网型风/光/储微电网容量优化配置与经济优化运行研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2021. TANG Wendong. Research on optimal capacity configuration and optimal economic operation of grid-connected wind/photovoltaic/storage microgrid[D]. Xiangtan: Xiangtan University,2021.

[6] 孟凡斌,周静,张霄,等. 基于改进 FPA-LHS 算法的并网型微电网容量优化配置研究[J]. 智慧电力,2021,49(10):45-51. MENG Fanbin,ZHOU Jing,ZHANG Xiao,et al. Optimal capacity configuration of grid-connected microgrid based on improved FPA-LHS algorithm[J]. Smart Power,2021,49(10):45-51.

[7] 杨丽君,黄凯婷,孔晓磊,等. 考虑柔性负荷的并网型微电网系统容量优化配置[J]. 太阳能学报,2021,42(2):309-316. YANG Lijun,HUANG Kaiting,KONG Xiaolei,et al. Capacity optimization configuration of grid-connected microgrid system considering flexible load[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2021,42(2):309-316.

[8] 贾云辉,张峰. 考虑分布式风电接入下的区域综合能源系统多元储能双层优化配置研究[J]. 可再生能源,2019,37(10):1524-1532. JIA Yunhui,ZHANG Feng. A bi-level optimal configuration of multiple storage in regional integrated energy system with distribution wind power inclusion[J]. Renewable Energy Resources,2019,37(10):1524-1532.

[9] 黄浚东. 垃圾填埋场填埋气提纯利用的探讨[J]. 资源节约与环保,2021(7):90-91. HUANG Jundong. Discussion on purification and utilization of landfill gas in landfill site[J]. Resources Economization & Environmental Protection,2021(7):90-91.

[10] 陈付山,孙海燕,梁小平. 城市生活垃圾发电项目可行性研究工作要点浅析[J]. 可再生能源,2013,31(4):123-128. CHEN Fushan,SUN Haiyan,LIANG Xiaoping. Initial analysis

- on main points of generation projects by municipal wastes in feasibility study [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(4):123-128.
- [11] 张承鑫,白尚旻,赵冠雄,等. 含电转气的冷热电联供型微电网多目标优化调度[J]. *吉林电力*, 2021, 49(2):28-32.
ZHANG Chengxin, BAI Shangmin, ZHAO Guanxiong, et al. Multi-objective optimal scheduling of combined cooling heating and power generation microgrid containing power to gas [J]. *Jilin Electric Power*, 2021, 49(2):28-32.
- [12] 梁喆,李梅,周孟然. 含 P2G 和混合电储能的矿山综合能源系统多目标优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10):122-129.
LIANG Zhe, LI Mei, ZHOU Mengran. Multi-objective optimal dispatch of mining area integrated energy system with P2G and hybrid electric energy storage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10):122-129.
- [13] 张文杰,吴杰康,赵俊浩,等. 考虑源-荷不确定性的水风柴微电网优化配置[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(2):117-126.
ZHANG Wenjie, WU Jiekang, ZHAO Junhao, et al. Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(2):117-126.
- [14] 宋扬,石勇,刘宝泉,等. 基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2):163-170.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatch of microgrid based on reverse mutation sparrow search algorithm [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2):163-170.
- [15] LI J H, WANG S, YE L, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1):1-14.
- [16] 李坚,吴亮红,张红强,等. 基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18):137-145.
LI Jian, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, et al. Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18):137-145.
- [17] 李蕊. 基于不同商业运营模式的分布式电源/微电网综合效益评价方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(6):1748-1758.
LI Rui. Comprehensive benefit evaluation method of distributed generation/microgrid projects based on different business models [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(6):1748-1758.
- [18] 梁惠施,程林,苏剑. 微网的成本效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(S1):38-44.
LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(S1):38-44.
- [19] 张长云,黄景光,李振兴,等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1):108-116.
ZHANG Changyun, HUANG Jingguang, LI Zhenxing, et al. Optimal configuration of wind-hydrogen-storage hybrid microgrid capacity in polar environment [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1):108-116.
- [20] 陈健,赵波,王成山,等. 不同自平衡能力并网型微电网优化配置分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(21):1-6, 18.
CHEN Jian, ZHAO Bo, WANG Chengshan, et al. Optimal sizing analysis on grid-connected microgrid with different self-balancing capabilities [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(21):1-6, 18.
- [21] 杨轶凡,江道灼,阮闯,等. 基于变异粒子群算法的微电网能量管理策略[J]. *电子技术*, 2018, 47(11):38-43.
YANG Yifan, JIANG Daozhuo, RUAN Chuang, et al. Microgrid group energy management strategy based on variant particle swarm optimization [J]. *Electronic Technology*, 2018, 47(11):38-43.
- [22] 黄继红,苏守宝,马艳,等. 自适应变异粒子群优化算法[J]. *皖西学院学报*, 2010, 26(2):27-30.
HUANG Jihong, SU Shoubao, MA Yan, et al. Particle swarm optimization algorithm with adaptive mutation [J]. *Journal of West Anhui University*, 2010, 26(2):27-30.
- [23] 王松. 垃圾填埋气发电项目经济风险评价:以张家港东沙项目为例[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
WANG Song. Economic risk evaluation for landfill gas power generation project—taking Zhangjiagang Dongsha Project as an example [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [24] 杨欢红,谢明洋,黄文焘,等. 含废物处理的城市综合能源系统低碳经济运行策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(9):3545-3552.
YANG Huanhong, XIE Mingyang, HUANG Wentao, et al. Low-carbon economic operation of urban integrated energy system including waste treatment [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9):3545-3552.
- [25] 滕云,孙鹏,张明理,等. 基于农村新型产业结构的“能源-环境-经济”鲁棒优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2):614-631.
TENG Yun, SUN Peng, ZHANG Mingli, et al. Robust optimization model of "energy-environment-economy" based on the new rural industrial structure [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2):614-631.
- [26] 张旋洲,杨晖,何青松,等. 北京市安定生活垃圾卫生填埋场填埋气收集制天然气工程应用[J]. *环境卫生工程*, 2017, 25(5):81-83, 87.
ZHANG Xuanzhou, YANG Hui, HE Qingsong, et al. Application of landfill gas collection to make natural gas in Beijing Anding domestic waste sanitary landfill site [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2017, 25(5):81-83, 87.
- [27] 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):4650-4660.
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):4650-4660.
- [28] 龚晓琴,王进,王珑,等. 含电转气的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 76-83.
- GONG Xiaoqin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low-carbon economic operation for integrated electricity and natural-gas energy system with power-to-gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):76-83.
- [29] 刘伟佳,文福拴,薛禹胜,等. 电转气技术的成本特征与运营经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24):1-11.
- LIU Weijia, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cost charac-

teristics and economic analysis of power-to-gas technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24):1-11.

作者简介:



冯帅

冯帅(1997),男,硕士在读,研究方向为微电网优化方法(E-mail:563968964@qq.com);
袁至(1984),男,博士,副教授,研究方向为可再生能源发电与并网控制;
王维庆(1959),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统微机保护、风力发电控制等。

Optimization and configuration of microgrid capacity based on LGPG-P2G in the context of carbon trading

FENG Shuai, YUAN Zhi, WANG Weiqing, HE Shan

(Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: The optimization of capacity allocation of traditional microgrid has limited effect on improving economic efficiency. To solve this problem, a microgrid model based on the coupling of landfill gas power generation (LGPG) and power to gas (P2G) is proposed to improve economic efficiency. Considering the influence of carbon trading and the time value of capital on the optimal allocation of capacity, the full life cycle theory and net present value analysis method in economics are introduced. Then the mutation particle swarm optimization algorithm is used to obtain the optimal allocation of capacity in four scenarios for maximizing the benefit of the whole life cycle. The optimal operation scheme is obtained by Cplex under the optimal allocation of capacity of the traditional microgrid model and the proposed microgrid model. The simulation results show that the economic efficiency of proposed microgrid model based on LGPG-P2G is higher than that of traditional microgrid model under the background of carbon trading.

Keywords: microgrid; landfill gas power generation (LGPG); power to gas (P2G); carbon trading; net present value analysis; capacity configuration

(编辑 李栋)