

基于信息间隙决策理论鲁棒模型的 户用微电网优化运行

罗宗龙¹, 刘世林^{1,2*}

- (1. 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室(安徽工程大学), 安徽省 芜湖市 241004;
2. 安徽工程大学产业创新技术研究有限公司, 安徽省 芜湖市 241004)

Optimal Operation of Residential Microgrids Based on a Robust Model Using Information Gap Decision Theory

LUO Zonglong¹, LIU Shilin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-End Equipment, Ministry of Education (Anhui Polytechnic University), Wuhu 241004, Anhui Province, China; 2. Anhui Polytechnic University Industrial Innovation Technology Research Co., Ltd., Wuhu 241004, Anhui Province, China)

摘要:【目的】户用微电网是新型电力系统的重要组成部分,其优化运行对提高可再生能源利用率、降低系统的运行成本非常重要。但是,光伏等分布式电源的出力及负荷的强不确定性给户用微电网的优化运行带来很大挑战,为此,提出了一种基于信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)的鲁棒优化运行模型。【方法】首先,充分考虑分时电价的影响,建立以用户成本最低为目标的并网型户用微电网优化运行模型;然后,在该模型基础上,综合考虑光伏、负荷和电动汽车充电等不确定性因素对户用微电网优化运行的影响,构建基于IGDT的鲁棒优化运行模型;最后,采用分层序列法结合熵权法对模型进行求解。【结果】通过蒙特卡洛模拟,验证了IGDT鲁棒模型处理光伏和负荷等不确定性时的有效性和可靠性。【结论】该模型为户用微电网的优化运行提供了一种可行的解决方案,对提高户用微电网的运行经济性和分布式可再生能源的就地消纳率具有重要意义。

关键词: 新能源; 户用微电网; 不确定性; 信息间隙决策理论(IGDT); 分层序列法; 熵权法; 蒙特卡洛模拟; 电动汽车

ABSTRACT: [Objectives] Residential microgrids are an important part of the new-type power system, and their

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004a05020014);
安徽未来技术研究院企业合作项目(2023qyhz32)。

Project Supported by the Key Research and Development Program of Anhui Province (202004a05020014); The Cooperation Project of Anhui Future Technology Research Institute and Enterprise (2023qyhz32).

optimal operation is crucial for improving the utilization efficiency of renewable energy and reducing system operating costs. However, the strong uncertainties in the output of distributed power sources such as photovoltaics, as well as in loads, pose significant challenges to the optimal operation of residential microgrids. Therefore, a robust optimal operation model based on information gap decision theory (IGDT) is proposed. [Methods] Firstly, by fully considering the influence of time-of-use electricity prices, an optimal operation model for grid-connected residential microgrids is established with the objective of minimizing user costs. Then, on the basis of this model, a robust optimal operation model based on IGDT is established by comprehensively considering the influence of uncertain factors such as photovoltaic output, load, and electric vehicle charging on the optimal operation of residential microgrids. Finally, a hierarchical sequencing method combined with the entropy weight method is used to solve the model. [Results] Through Monte Carlo simulations, the effectiveness and reliability of the IGDT-based robust model in addressing uncertainties such as photovoltaic output and load are validated. [Conclusions] This model provides a feasible solution for the optimal operation of residential microgrids. It is of great significance for improving their economic performance and the on-site consumption rate of distributed renewable energy.

KEY WORDS: renewable energy; residential microgrid; uncertainty; information gap decision theory (IGDT); hierarchical sequencing method; entropy weight method; Monte Carlo simulation; electric vehicle

0 引言

面对能源危机和环境污染问题，国家正大力推进电力体制改革，并提出“双碳”目标，在这一背景下，新能源成为我国能源发展的主导方向^[1-5]。而户用微电网则是集成了分布式电源、储能和负荷的一类小型发-配-用电系统^[6]。对户用微电网的优化运行进行管理，可以有效提高光伏等可再生能源渗透率，推进新能源的进一步发展^[7]。

但是，在户用微电网的优化运行过程中，存在很多不确定性因素，如光伏出力和负荷的不确定性等，如何处理这些不确定性因素是户用微电网优化运行的关键^[8]。而且，随着电动汽车的发展，其参与户用微电网的优化运行成为未来发展的必然趋势^[9-10]。电动汽车在户用微电网中扮演着可控负载和移动储能的双重角色，具有削峰填谷、降低用户成本等作用^[11]。然而，电动汽车出行行为具有较大的不确定性^[12-16]，如果对其不确定性不进行处理，可能会导致用电高峰期负荷增加，从而对户用微电网的优化运行产生重大影响^[17]。因此，如何设计考虑户用微电网中光伏出力不确定性、负荷不确定性和电动汽车出行不确定性，实现户用微电网可靠、经济运行是当前亟待解决的问题。

针对此类问题，一般采用随机优化、机会约束规划、区间优化和鲁棒优化等方法。目前，针对这些方法已经有丰富的研究应用成果。文献[18]利用随机优化构建电热气氢综合能源系统调度模型，其中风、光、负荷的不确定性由随机场景刻画，并应用蒙特卡洛模拟生成大量场景后，采用同步回代进行场景削减，从而将随机优化问题转化为确定性优化问题进行求解。文献[19]利用机会约束规划考虑需求响应不确定性和负荷不确定性，将含有不确定变量的功率平衡约束转换为机会约束，并通过不确定变量的概率分布对机会约束进行转化，从而求解机会约束规划调度模型。文献[20]利用区间优化构建电力系统调度模型，在设定源荷预测值及预测误差区间后，基于Benders分解将区间优化问题转化为主问题和子问

题进行求解。文献[21]采用两阶段鲁棒优化方法处理光伏与风电机组的不确定性，通过建立盒式不确定集用以描述源侧的不确定性，最后，在给定预测误差后，采用列和约束生成算法对所提调度模型进行求解。然而，无论随机优化还是机会约束规划，都需要知道不确定变量的概率分布，这可能导致模型误差变大而无法反映实际情况；对于区间优化和鲁棒优化而言，这二者都需要知道不确定变量的波动范围，但是一般不确定变量的波动范围却较难准确获得。

相比于上述方法，信息间隙决策理论(information gap decision theory method, IGDT)是一种更为有效、便捷的不确定性处理方法。该方法能够保证在所求解的目标函数不大于预设目标的情况下，通过最大化不确定变量的不确定度，从而规避因不确定性造成的影响。此外，该方法不依赖于不确定变量的概率分布及不确定变量的边界，故能够克服传统不确定性处理方法的缺陷。目前，该方法已在机组组合的优化^[22]以及含风力发电系统的优化调度^[23-24]等场景得到广泛应用，但是该方法在户用微电网优化运行方面的应用还有待进一步研究。

本文针对含光伏、储能、电动汽车和负荷的并网型户用微电网，在考虑峰谷分时电价的基础上，首先建立了以用户费用最小化为目标函数的日前优化运行数学模型；进而构建了IGDT鲁棒优化运行模型，该模型利用IGDT可同时处理光伏出力不确定性、负荷不确定性和电动汽车出行不确定性；最后，通过分层序列法结合熵权法对该模型进行求解，从而制定鲁棒运行方案。

1 户用微电网确定性优化运行模型

1.1 目标函数

目标函数 F 以用户费用最小，可描述如下：

$$F = \min \sum_{t=1}^T [C_b(t) + C_{ev}(t) + C_g(t)] \quad (1)$$

式中： $C_b(t)$ 为 t 时刻储能充放电引起的损耗成本； $C_{ev}(t)$ 为 t 时刻电动汽车充放电引起的损耗成本； $C_g(t)$ 为 t 时刻户用微电网与配电网功率交互引起的购售电成本； T 为调度周期，取值为24 h。

上述各成本变量的数学表达式如下:

$$C_b(t) = K_b [P_b^{\text{dis}}(t)/\eta_b + P_b^{\text{ch}}(t)\eta_b] \Delta t \quad (2)$$

$$C_{\text{ev}}(t) = K_{\text{ev}} [P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t)/\eta_{\text{ev}} + P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t)\eta_{\text{ev}}] \Delta t \quad (3)$$

$$C_g(t) = \lambda(t) [P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)] \Delta t \quad (4)$$

式中: K_b 为储能单位充放电成本系数; $P_b^{\text{ch}}(t)$ 、 $P_b^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻储能的充、放电功率; η_b 为储能的充放电效率; K_{ev} 为电动汽车单位充放电成本系数; $P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻电动汽车的充、放电功率; η_{ev} 为电动汽车的充放电效率; $\lambda(t)$ 为 t 时刻微电网与配电网之间的交易电价; $P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$ 、 $P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)$ 分别为 t 时刻微电网向配电网购、售电的功率; Δt 为时间间隔。

1.2 约束条件

1.2.1 储能

储能运行过程中需满足多种约束条件。储能 $t+1$ 时刻荷电状态与 t 时刻荷电状态间的关系为

$$S_{\text{soc,b}}(t+1) = S_{\text{soc,b}}(t) - \frac{P_b^{\text{dis}}(t+1) \cdot \Delta t}{\eta_b \cdot E_b} + \eta_b \cdot \frac{P_b^{\text{ch}}(t+1) \cdot \Delta t}{E_b} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{soc,b}}(t)$ 、 $S_{\text{soc,b}}(t+1)$ 分别为储能 t 、 $t+1$ 时刻的荷电状态; E_b 为储能容量。

为防止储能过度充电和放电, 设置储能 t 时刻荷电状态的上、下限, 其表达式为

$$S_{\text{soc,b}}^{\text{min}} \leq S_{\text{soc,b}}(t) \leq S_{\text{soc,b}}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中 $S_{\text{soc,b}}^{\text{min}}$ 和 $S_{\text{soc,b}}^{\text{max}}$ 分别为储能荷电状态的最小值和最大值。

储能初始时刻与终止时刻荷电状态相等, 这有利于储能循环调度, 表达式为

$$S_{\text{soc,b}}(0) = S_{\text{soc,b}}(T) \quad (7)$$

储能的充、放电功率约束分别为:

$$0 \leq P_b^{\text{ch}}(t) \leq P_b^{\text{max}} U_{\text{s,b}}(t) \quad (8)$$

$$0 \leq P_b^{\text{dis}}(t) \leq P_b^{\text{max}} [1 - U_{\text{s,b}}(t)] \quad (9)$$

式中: P_b^{max} 为储能的充放电最大功率; $U_{\text{s,b}}(t)$ 为储能 t 时刻充放电状态, 取值为1时表示充电, 取值为0时表示放电。

1.2.2 电动汽车

电动汽车参与调度的不确定因素比较多, 为便于简化, 故做出以下假设: 电动汽车仅在家中充电; 电动汽车从家出发和到家时间已知; 为方

便后续出行放电功率不确定性分析, 在行驶过程中采用固定功率放电作为其预测值。

电动汽车在运行过程中需满足多种约束条件。电动汽车 $t+1$ 时刻荷电状态与 t 时刻荷电状态间的关系为

$$S_{\text{soc,ev}}(t+1) = S_{\text{soc,ev}}(t) - \frac{P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t+1) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{ev}} \cdot E_{\text{ev}}} + \eta_{\text{ev}} \cdot \frac{P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t+1) \cdot \Delta t}{E_{\text{ev}}} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{soc,ev}}(t)$ 、 $S_{\text{soc,ev}}(t+1)$ 分别为电动汽车 t 、 $t+1$ 时刻的荷电状态; E_{ev} 为电动汽车容量。

为防止电动汽车过度充电和放电, 设置电动汽车 t 时刻荷电状态上、下限, 其表达式为

$$S_{\text{soc,ev}}^{\text{min}} \leq S_{\text{soc,ev}}(t) \leq S_{\text{soc,ev}}^{\text{max}} \quad (11)$$

式中 $S_{\text{soc,ev}}^{\text{min}}$ 和 $S_{\text{soc,ev}}^{\text{max}}$ 分别为电动汽车荷电状态的最小值和最大值。

电动汽车始末时刻荷电状态相等, 这有利于电动汽车循环调度, 其表达式为

$$S_{\text{soc,ev}}(0) = S_{\text{soc,ev}}(T) \quad (12)$$

电动汽车充、放电功率的约束条件分别为:

$$0 \leq P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{max}} U_{\text{s,ev}}(t) \quad (13)$$

$$0 \leq P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{max}} [1 - U_{\text{s,ev}}(t)] \quad (14)$$

式中: $P_{\text{ev}}^{\text{max}}$ 为电动汽车的最大充放电功率; $U_{\text{s,ev}}(t)$ 为电动汽车 t 时刻充放电状态, 取值为1时表示充电, 取值为0时表示放电。

设定电动汽车出行期间按固定功率放电, 有利于简化模型, 其具体表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t) = 0 \\ P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t) = P_{\text{cev}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中 $P_{\text{cev}}(t)$ 为 t 时刻电动汽车出行放电功率, $t \in (t_D, t_A)$, 其中 t_D 为电动汽车从家出发时间, t_A 为电动汽车到家时间。

1.2.3 配电网交互功率

当微电网不能满足内部需求时, 比如不能满足负荷、电动汽车和储能等供电需求时, 需要向配电网购电; 当微电网能满足内部需求时, 微电网可将多余的电能卖给电网, 从而获取收益。

微电网和配电网之间的交互需满足相关的功率平衡约束, 其表达式如下:

$$P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) = P_b^{\text{ch}}(t) + \delta_{\text{ev}}(t) P_{\text{ev}}^{\text{ch}}(t) + P_L(t) - P_b^{\text{dis}}(t) - \delta_{\text{ev}}(t) P_{\text{ev}}^{\text{dis}}(t) - P_{\text{pv}}(t) \quad (16)$$

$$\delta_{ev}(t) = \begin{cases} 0, & t \in (t_D, t_A) \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\delta_{ev}(t)$ 为 t 时刻电动汽车与微电网的连接状态，取值为1时表示连接，取值为0时表示断开； $P_L(t)$ 为 t 时刻负荷的实际值； $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏出力的实际值。

此外，还需满足微电网向配电网的购、售电功率约束，其表达式分别为

$$0 \leq P_{grid}^{buy}(t) \leq U_{s,g}(t) P_{grid}^{max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{grid}^{sell}(t) \leq [1 - U_{s,g}(t)] P_{grid}^{max} \quad (19)$$

式中： P_{grid}^{max} 为微电网和配电网的最大交互功率； $U_{s,g}(t)$ 为 t 时刻微电网向配电网的购售电状态，取值为1时表示购电，取值为0时表示售电。

2 基于IGDT的鲁棒优化运行模型

2.1 IGDT概述

IGDT是一种不确定性处理方法，它强调在满足预设目标的前提下，研究不确定性参数波动所造成的影响。根据预设目标相比于确定性优化调度目标往正方向还是负方向偏离，其影响分为悲观和乐观2个方面，并对应风险回避(鲁棒)模型和风险投机(机会)模型^[25]。

为推导IGDT优化模型处理不确定性的形式，首先，考虑如下优化模型：

$$\begin{cases} \min F(X, d) \\ \text{s.t. } H(X, d) = 0 \\ G(X, d) \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中： X 为不确定参数； d 为决策变量； $F(X, d)$ 为目标函数； $H(X, d)$ 和 $G(X, d)$ 分别为等式约束和不等式约束。

在IGDT理论中，不确定参数 X 的波动范围是用集合定义的。该集合可描述为

$$\begin{cases} X \in U(\alpha, \tilde{X}) \\ U(\alpha, \tilde{X}) = \left\{ X: \left| \frac{X - \tilde{X}}{\tilde{X}} \right| \leq \alpha \right\} \end{cases} \quad (21)$$

式中： U 为不确定参数 X 所属的集合； α 为不确定参数 X 的波动幅度； \tilde{X} 为不确定参数 X 的预测值。

在应用IGDT处理不确定性时，一般采用鲁棒模型。这是因为，采用该模型得出的方案具有

鲁棒性，对不确定参数的波动有更好的抗干扰性。该鲁棒模型为

$$\begin{cases} \max \alpha \\ \text{s.t. } \max_X F(X, d) \leq F_c \\ F_c = (1 + \beta_c) F_0 \\ H(X, d) = 0 \\ G(X, d) \leq 0 \\ \forall X \in U(\alpha, \tilde{X}) \end{cases} \quad (22)$$

式中： F_0 为不确定参数 X 取预测值 \tilde{X} 时式(20)的目标函数值； β_c 为偏差因子，表示式(22)的预期成本 F_c 高于 F_0 的偏差程度。

式(22)的意义在于：在该模型取得的决策值 d 对于任意扰动(即 $\forall X \in U(\alpha, \tilde{X})$)都能保证 $F(X, d)$ 不高于 F_c 。

2.2 IGDT鲁棒优化运行模型

选取光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率为不确定参数，根据式(21)，其波动范围如下：

$$U[\alpha_{pv}, \tilde{P}_{pv}(t)] = \{P_{pv}(t) \in [(1 - \alpha_{pv})\tilde{P}_{pv}(t), (1 + \alpha_{pv})\tilde{P}_{pv}(t)]\} \quad (23)$$

$$U[\alpha_L, \tilde{P}_L(t)] = \{P_L(t) \in [(1 - \alpha_L)\tilde{P}_L(t), (1 + \alpha_L)\tilde{P}_L(t)]\} \quad (24)$$

$$U[\alpha_{cev}, \tilde{P}_{cev}(t)] = \{P_{cev}(t) \in [(1 - \alpha_{cev})\tilde{P}_{cev}(t), (1 + \alpha_{cev})\tilde{P}_{cev}(t)]\} \quad (25)$$

式中： $\tilde{P}_{pv}(t)$ 、 $\tilde{P}_L(t)$ 、 $\tilde{P}_{cev}(t)$ 分别是光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率的预测值； α_{pv} 、 α_L 、 α_{cev} 为相应的不确定度。

当光伏出力实际值低于预测值，负荷实际值比预测值大，以及电动汽车出行放电功率实际值比预测值大时，微电网运行成本必然会增加。当光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率实际值分别为式(26)–(28)时，微电网调度成本最大。

$$P_{pv}(t) = (1 - \alpha_{pv})\tilde{P}_{pv}(t) \quad (26)$$

$$P_L(t) = (1 + \alpha_L)\tilde{P}_L(t) \quad (27)$$

$$P_{cev}(t) = (1 + \alpha_{cev})\tilde{P}_{cev}(t) \quad (28)$$

此时IGDT鲁棒模型中的 $\max F$ 将退化为 F ，即式(1)。

设 β_{ci} 为不确定的光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率造成的预计成本偏差。若光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率直接取预测值时，将确定性优化运行模型得到的最小成本记为 F_0 ，

根据式(22)假定不确定参数波动时, 预设调度成本 F_c 为 $(1 + \beta_{c1})F_0$ 。

综上所述, IGDT鲁棒优化运行模型为

$$\begin{cases} \max(\alpha_{pv}, \alpha_L, \alpha_{ev}) \\ \text{s.t. } F \leq (1 + \beta_{c1})F_0 \\ \alpha_{pv}, \alpha_L, \alpha_{ev} \geq 0 \\ \text{式(5)—(19)} \\ \text{式(26)—(28)} \end{cases} \quad (29)$$

该模型得到的决策解对于光伏出力、负荷及电动汽车出行放电功率不确定性具有很好的鲁棒性、经济性, 即当光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率在一定区间任意波动时, 决策解都能保证成本不高于 $(1 + \beta_{c1})F_0$ 。光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率波动区间分别如式(23)—(25)所描述。

2.3 模型求解

多目标问题的求解方法有很多, 如线性加权法、分层序列法和启发式算法等。本文采用分层序列法来求解 IGDT鲁棒优化运行模型, 同时为了减少目标数量, 将目标 α_{pv} 和 α_L 利用线性加权法转化成单目标。具体求解步骤如下。

1) 采用线性加权法处理目标 α_{pv} 和 α_L 。为了消除不确定度的权重带来的主观性, 采用熵权法^[26-27]来计算权重。选择光伏不确定度和负荷不确定度为评估指标, 指标数值使用预测值进行代替, 其中光伏预测值越大, 越有利于日前调度, 故其不确定度为正向指标; 而负荷预测值越小, 越有利于日前运行, 故其不确定度为负向指标。分别对正向指标和负向指标进行标准化处理, 其表达式如下:

$$\hat{X}_{i,t} = \frac{\tilde{X}_{i,t} - R_{1,i}}{R_{2,i} - R_{1,i}} \quad (30)$$

$$\hat{X}_{i,t} = \frac{R_{2,i} - \tilde{X}_{i,t}}{R_{2,i} - R_{1,i}} \quad (31)$$

$$R_{1,i} = \min \{ \tilde{X}_{i,1}, \tilde{X}_{i,2}, \dots, \tilde{X}_{i,T} \} \quad (32)$$

$$R_{2,i} = \max \{ \tilde{X}_{i,1}, \tilde{X}_{i,2}, \dots, \tilde{X}_{i,T} \} \quad (33)$$

式中: $\hat{X}_{i,t}$ 为第 i 个指标在第 t 个方案中标准化后的值; $\tilde{X}_{i,t}$ 为第 i 个指标在第 t 个方案中未标准化的值; $R_{1,i}$ 为所有方案中指标 i 的最小值; $R_{2,i}$ 为所有方案中指标 i 的最大值。

数据标准化后, 按如下公式计算相应指标的权重:

$$\begin{cases} p_{i,t} = \frac{\hat{X}_{i,t}}{\sum_{t=1}^T \hat{X}_{i,t}} \\ E_i = -\ln(T)^{-1} \sum_{t=1}^T p_{i,t} \ln p_{i,t} \\ w_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum_{i=1}^k E_i} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $p_{i,t}$ 为第 i 个指标在第 t 个方案的值占该指标的比重; E_i 为第 i 个指标的熵值; w_i 为第 i 个指标的权重; k 为指标数量。

根据权重, 计算出光伏不确定度和负荷不确定度在光伏和负荷总不确定度中所占的比例, 其表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha_{pv} = w_{pv} \alpha \\ \alpha_L = w_L \alpha \end{cases} \quad (35)$$

式中: w_{pv} 为光伏的不确定度权重; w_L 为负荷的不确定度权重。

此时, IGDT鲁棒优化运行模型如下:

$$\begin{cases} \max[\alpha, \alpha_{ev}] \\ \text{s.t. } F \leq (1 + \beta_{c1})F_0 \\ \alpha_{pv} = w_{pv} \alpha \\ \alpha_L = w_L \alpha \\ \alpha, \alpha_{ev} \geq 0 \\ \text{式(5)—(19)} \\ \text{式(26)—(28)} \end{cases} \quad (36)$$

2) 利用分层序列法^[28]处理式(36)。首先指定优先级(目标函数求解顺序), 随后求解第1个目标函数, 该目标函数模型如下:

$$\begin{cases} \max \alpha \\ \text{s.t. } F \leq (1 + \beta_{c1}')F_0 \\ \alpha_{pv} = w_{pv} \alpha \\ \alpha_L = w_L \alpha \\ \alpha, \alpha_{ev} \geq 0 \\ \text{式(5)—(19)} \\ \text{式(26)—(28)} \end{cases} \quad (37)$$

式中: β_{c1}' 为不确定的光伏出力和负荷造成的预计成本偏差, $\beta_{c1}' < \beta_{c1}$ 。

最后, 求解第2个目标函数, 其模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \alpha_{ev} \\ \text{s.t. } F \leq (1 + \beta_{cl}) F_0 \\ \alpha_{pv} = w_{pv} \alpha \\ \alpha_L = w_L \alpha \\ \alpha^* \leq \alpha \\ \alpha_{ev} \geq 0 \\ \text{式(5)—(19)} \\ \text{式(26)—(28)} \end{array} \right. \quad (38)$$

式中 α^* 是式(37)目标函数的最优值。此时式(38)得到的解即为最终的运行方案。

3 算例分析

3.1 参数设置

为验证所提模型的合理性与有效性，本文基于MATLAB 2022b利用Yalmip工具箱进行建模，并通过调用gurobi求解器进行求解。以某户用微电网为研究对象，其运行周期为24 h，将运行时段分为24个，每一运行时段为1 h。

本文光伏组件额定出力为3.5 kW。采用蒙特卡洛分别模拟生成大量光伏出力和负荷的场景，然后通过同步回代削减法进行场景削减，最后选择概率最大的样本作为预测值。光伏出力、负荷场景削减集分别如图1、2所示，其中 p_j 为削减后第 j 个场景的概率， $j=1, 2, \dots, 5$ 。

本文联络线交互功率最大为50 kW，储能参数设置如下： $P_b^{\max}=6$ kW， $E_b=20$ kW·h， $\eta_b=0.95$ ， $K_b=0.07$ 元/(kW·h)， $S_{\text{soc},b}^{\max}=0.9$ ， $S_{\text{soc},b}^{\min}=0.2$ ， $S_{\text{soc},b}(0)=0.5$ 。电动汽车参数设置如下： $P_{\text{ev}}^{\max}=12$ kW， $E_{\text{ev}}=70$ kW·h， $\eta_{\text{ev}}=0.95$ ， $K_{\text{ev}}=0.1$ 元/(kW·h)， $S_{\text{soc},\text{ev}}^{\max}=0.9$ ， $S_{\text{soc},\text{ev}}^{\min}=0.3$ ， $S_{\text{soc},\text{ev}}(0)=0.5$ 。配电网与户用微电网进行功率交换

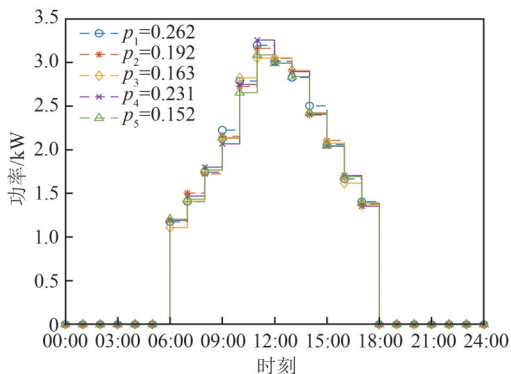


图1 光伏出力场景削减集

Fig. 1 Photovoltaic output scenario reduction set

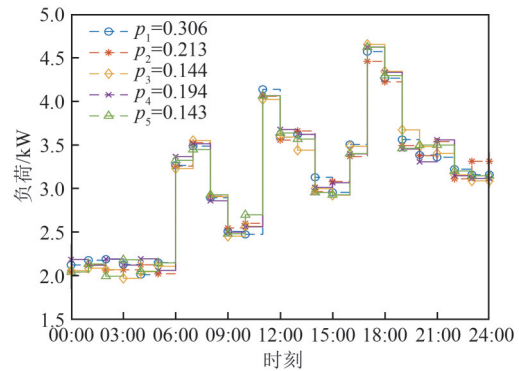


图2 负荷场景削减集

Fig. 2 Load scenario reduction set

的日前交易电价设置如下：06:00—09:00、11:00—14:00、17:00—22:00时间段电价为0.65元/(kW·h)，其余时间段电价为0.31元/(kW·h)。电动汽车08:00从家出发，11:00到家，这段时间的放电功率预测值取7 kW，总偏差因子 β_c 取0.15，偏差因子 β_c' 取0.1。

3.2 IGDT鲁棒优化运行结果分析

考虑光伏出力、负荷和电动汽车出行不确定性，将光伏出力和负荷的预测值作为输入，并利用熵权法计算光伏和负荷不确定度的权重，计算结果分别为0.426 6和0.573 4。

利用分层序列法求出光伏和负荷总不确定度为0.092，电动汽车出行放电功率不确定度 α_{ev} 为0.089，基于IGDT鲁棒优化运行模型，根据式(35)得到光伏不确定度 α_{pv} 为0.039，负荷不确定度 α_L 为0.053。

图3—5分别为负荷、光伏出力和电动汽车出行放电功率的波动区间示意图。当光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率实际值在图3—5相应

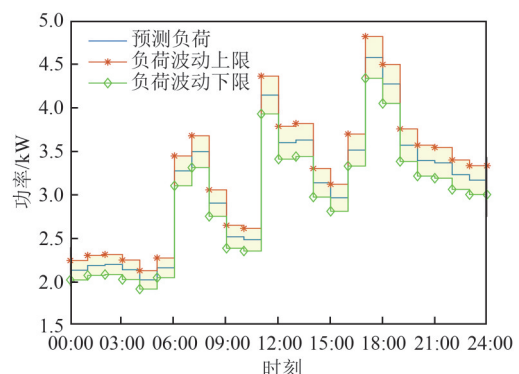


图3 负荷波动区间

Fig. 3 Load fluctuation interval

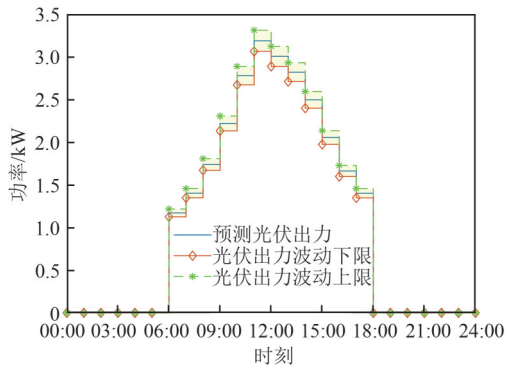


图4 光伏出力波动区间

Fig. 4 Photovoltaic output fluctuation interval

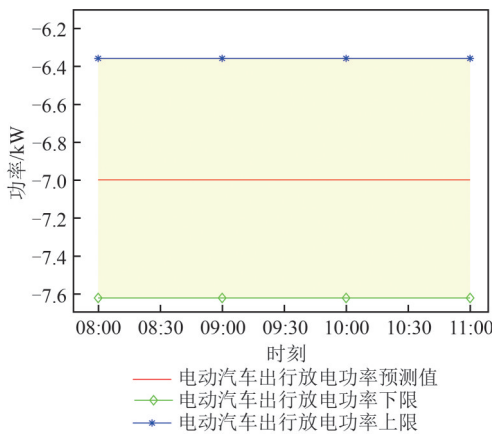


图5 电动汽车出行放电功率波动区间

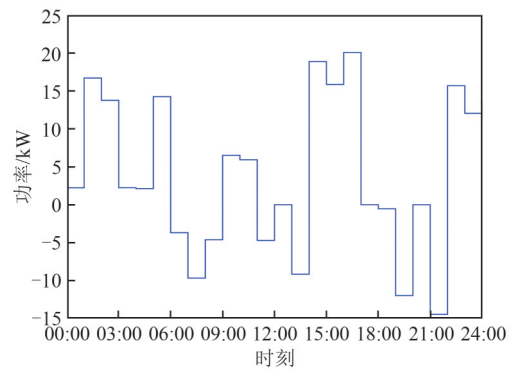
Fig. 5 Fluctuation interval of electric vehicle discharge power during travel

的黄色区域范围内任意波动时，系统都能保证其实际用电费用不高于预设成本，这表明 IGDT 鲁棒优化运行得出的方案具有鲁棒性。

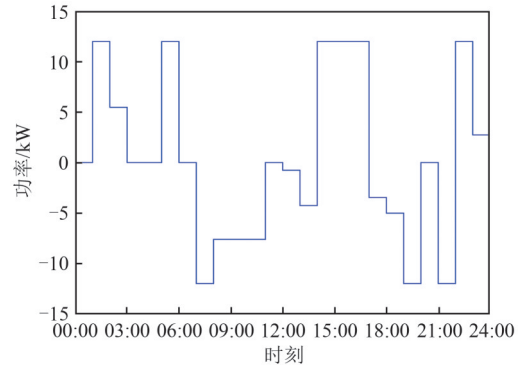
此外，当负荷、光伏出力和电动汽车出行放电功率取最恶劣的情景时，基于 IGDT 鲁棒模型的户用微电网优化运行方案如图6所示。图6(a)中微电网向配电网购电功率取值为正时，表示微电网向配电网购电；取值为负时则表示微电网向配电网售电。图6(b)中电动汽车在家充放电功率取值为正时表示充电，取值为负时则表示放电。图6(c)中储能充放电功率取值为正时表示充电，取值为负时则表示放电。在 00:00—06:00、18:00—24:00，光伏输出功率为0，户用微电网的负荷由储能、电动汽车和配电网提供，其余时段则由储能、电动汽车、配电网和光伏提供。

从图6(a)可以看出，由于谷时段电价低，微电网向配电网购电以满足负荷、储能充电和电动

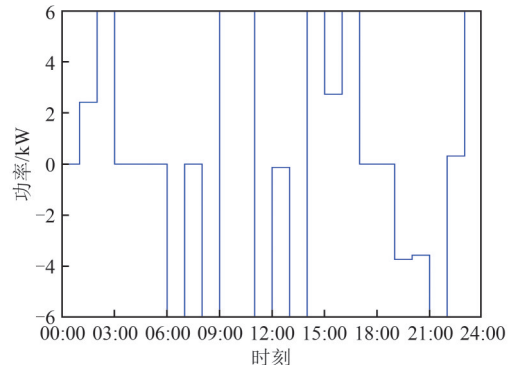
汽车充电的需求，而峰时段电价高，微电网向配电网售电，以降低用户成本。另外，从图6(b)、(c)可以看出，在峰谷分时电价机制下，电动汽车在 01:00—03:00、05:00—06:00、14:00—17:00 和 22:00—24:00 进行充电，在 07:00—08:00、12:00—14:00、17:00—20:00 和 21:00—22:00 进行放电，即在谷时段将电能存储起来，在峰时段将电能售出，实现削峰填谷。类似地，储能能在 01:00—03:00、09:00—11:00、14:00—17:00 和



(a) 微电网购电功率



(b) 电动汽车充放电功率



(c) 储能充放电功率

图6 基于IGDT鲁棒模型的户用微电网优化运行方案
Fig. 6 Optimal operation scheme of residential microgrid based on IGDT robust model

22:00—24:00 进行充电，在 06:00—07:00、08:00—09:00、11:00—12:00、13:00—14:00、19:00—22:00 进行放电，也是在谷时段将电能存储起来，在峰时段将电能售出，实现削峰填谷。

3.3 鲁棒性验证

为进一步验证 IGDT 鲁棒优化运行得出的方案具有鲁棒性，分别在光伏出力、负荷和电动汽车充放电功率对应的 $[(1 - \alpha_{pv})\tilde{P}_{pv}, \tilde{P}_{pv}]$ 、 $[\tilde{P}_L(t), (1 + \alpha_L)\tilde{P}_L(t)]$ 、 $[\tilde{P}_{cev}(t), (1 + \alpha_{cev})\tilde{P}_{cev}(t)]$ 区间上，采用均匀分布的蒙特卡洛模拟(即样本通过均匀随机数抽取获得)，经独立抽样 500 次后，将所得样本一一对应组合，最终形成 500 个场景。模拟场景费用与 IGDT 鲁棒模型费用对比如图 7 所示，可以看出，模拟场景费用均不大于 IGDT 鲁棒模型费用，即不大于预设成本，从而验证了 IGDT 鲁棒优化运行方案对光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率不确定性具有鲁棒性。

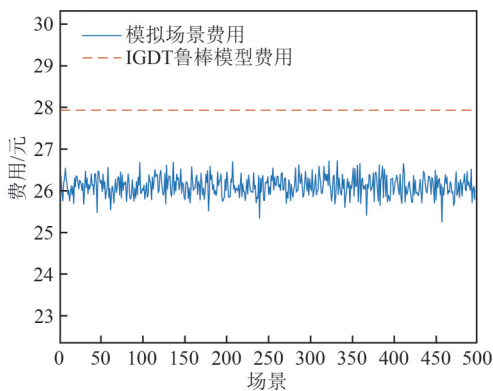


图7 模拟场景费用与IGDT鲁棒模型费用对比

Fig.7 Cost comparison between simulation scenarios and IGDT robust model

4 结论

针对户用微电网，基于 IGDT 鲁棒优化方法建立了考虑光伏出力、负荷和电动汽车出行放电功率三者不确定性的鲁棒优化运行模型，得出以下结论：

1) 所得出的方案能够保证光伏实际出力、负荷实际大小和电动汽车出行实际放电功率在其波动区间内时，户用微电网的成本不会超过预设成本，即能够得到具有鲁棒性的优化运行方案，从

而为决策者提供决策基础。

2) 利用分层序列法结合熵权法能够有效求解具有多目标的 IGDT 鲁棒优化运行模型，这有助于其应用于实际的电力系统优化场景中。

参考文献

- [1] 朱凯, 张艳红. “双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 65-72.
ZHU K, ZHANG Y H. Research on application of hydrogen in power industry under “double carbon” circumstance[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 65-72.
- [2] 黄斌, 赵伟, 廖力达, 等. 政策视角下光伏全产业链的地区差异性分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 179-188.
HUANG B, ZHAO W, LIAO L D, et al. Analysis on regional difference of the whole PV industry chain from the perspective of policy[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 179-188.
- [3] 刘哲, 唐成鹏, 周青, 等. 新型电力系统建设环境下的“西电东送”发展研究[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 26-33.
LIU Z, TANG C P, ZHOU Q, et al. Research on development of west-to-east power transmission under the environment of new power system construction[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 26-33.
- [4] 尚勇, 王喆, 严欢, 等. “双碳”背景下陕西新型电力系统研究探索[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 20-27.
SHANG Y, WANG Z, YAN H, et al. Research exploration of Shaanxi new type power system in the background of “dual carbon” [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 20-27.
- [5] 梁晨, 牛皓玮, 刘达, 等. 政府激励背景下企业绿色交易策略行为演化研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 23-29.
LIANG C, NIU H W, LIU D, et al. Green trading strategy behavior evolution of enterprise under background of government incentives[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 23-29.
- [6] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022.
LIU Y X, GUO L, WANG C S. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022.

- [7] SOLANKI B V, RAGHURAJAN A, BHATTACHARYA K, et al. Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(4): 1739-1748.
- [8] 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 M F, WU Y, LI Y L, 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.
- [9] 孙韩, 陈宗海, 武骥. 计及电动汽车不确定性的家庭微电网实时能量调度策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2544-2551.
SUN H, CHEN Z H, WU J. Online energy dispatch strategy for residential microgrid considering uncertainty of electric vehicle[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2544-2551.
- [10] 江晨, 杨俊杰, 邓正臣. 电动汽车和能量云在家庭微电网中的协同调度研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(3): 42-49.
JIANG C, YANG J J, DENG Z C. Research on synergetic scheduling of electric vehicles and energy cloud in residential microgrids[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(3): 42-49.
- [11] 段小宇, 胡泽春, 崔岩, 等. 长时间尺度下的电动汽车有序充放电调度[J]. *电网技术*, 2018, 42(12): 4037-4044.
DUAN X Y, HU Z C, CUI Y, et al. Optimal charging and discharging strategy for electric vehicles in large timescales[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(12): 4037-4044.
- [12] 陈腾生, 杨汝泉, 隋坤明, 等. 考虑用户决策不确定性的电动汽车充电站用户参与度优化方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(4): 128-137.
CHEN T S, YANG R Q, SUI K M, et al. Optimization of user participation in electric vehicle charging stations considering uncertainty of user decision [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(4): 128-137.
- [13] 沈筱琦, 方鑫, 谭林林, 等. 基于居民出行模拟的电动汽车负荷时空分布预测[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 130-139.
SHEN X Q, FANG X, TAN L L, et al. Prediction of spatio-temporal distribution of electric vehicle load based on residential travel simulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 130-139.
- [14] 庞松岭, 赵雨楠, 张瑞恩, 等. 市场环境计及用户响应的电动汽车充电站优化运行策略[J]. *电力建设*, 2024, 45(10): 59-68.
PANG S L, ZHAO Y N, ZHANG R E, et al. The optimal operation strategy of electric vehicle charging stations considering user response in market environment[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10): 59-68.
- [15] 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.
ZHU S J, YU S Y, WANG G, et al. Research on charging station planning of EV based on CVaR[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(7): 13-18.
- [16] 贺瑜环, 杨秀媛, 陈麒宇, 等. 电动汽车智能充放电控制与应用综述[J]. *发电技术*, 2021, 42(2): 180-192.
HE Y H, YANG X Y, CHEN Q Y, et al. Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(2): 180-192.
- [17] MURATORI M. Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(3): 193-201.
- [18] 邓钰龙, 李春燕, 邵常政, 等. 电热气氢综合能源系统随机优化调度[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(11): 522-529.
DENG Y L, LI C Y, SHAO C Z, et al. Stochastic optimal scheduling of integrated electric-heat-gas-hydrogen energy system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(11): 522-529.
- [19] CAO Y T, ZHANG N, YANG L X. Optimal scheduling of electricity-gas integrated energy system based on relevant opportunity planning[C]//2022 First International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent Energy (ICCSIE). Shenyang, China: IEEE, 2023: 1-4.
- [20] 宋晓芳, 周海强, 薛峰, 等. 计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(7): 212-220.
SONG X F, ZHOU H Q, XUE F, et al. Interval optimal dispatching method of power system considering source-load uncertainty and frequency security[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(7): 212-220.
- [21] 马跃, 孟润泉, 魏斌, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的微电网两阶段鲁棒优化调度[J]. *电力系统保护与控制*

- 制, 2023, 51(10): 22-33.
- MA Y, MENG R Q, WEI B, et al. Two-stage robust optimal scheduling of a microgrid with a stepped carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 22-33.
- [22] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 基于信息间隙决策理论的多源联合优化机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3431-3440.
- WANG C Q, WEI H, WU S Y. Multi-power combined unit commitment based on information gap decision theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3431-3440.
- [23] ZUO L Y, WANG S S, SUN Y, et al. Robustness assessment of wind power generation considering rigorous security constraints for power system: a hybrid RLO-IGDT approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 10(2): 518-529.
- [24] DOLATABADI A, JADIDBONAB M, MOHAMMADI-IVATLOO B. Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: a hybrid stochastic/IGDT approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 438-448.
- [25] HUANG C, XIE Y S, LIU Y L, et al. Energy management of co-phase traction power supply system considering PV and hybrid energy access based on information gap decision theory[C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chengdu, China: IEEE, 2020: 238-244.
- [26] 唐学军, 谭忠富, 李智威, 等. 基于AHP-熵权法的配电网设备资产运检成本优化配置模型[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 166-172.
- TANG X J, TAN Z F, LI Z W, et al. AHP-entropy weight method based optimal allocation of operation and maintenance cost of distribution network equipment assets[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 166-172.
- [27] 韩一鸣, 徐鹏飞, 宫建锋, 等. 基于用户侧需求的电网发展经营综合评价体系研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 636-644.
- HAN Y M, XU P F, GONG J F, et al. Research on comprehensive evaluation system of power grid development and operation based on user demand[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 636-644.
- [28] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3689-3695.
- ZHAN K Q, HU Z C, SONG Y H, et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3689-3695.

收稿日期: 2024-06-21。

修回日期: 2024-09-03。

作者简介:



罗宗龙

罗宗龙(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, 2634849422@qq.com;



刘世林

刘世林(1978), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为分布式综合能源系统、微电网优化与控制、储能技术等, 本文通信作者, sl.liu@ahpu.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)