

引用格式:潘廷哲,金鑫,谈竹奎,等.基于 IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需求响应经济调度优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):222-231.
Citation: PAN Tingzhe, JIN Xin, TAN Zhukui, et al. An economic dispatch optimization approach for demand response in off-grid microgrid based on IGDT-Stackelberg game[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 222-231.

基于 IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网 需求响应经济调度优化方法

潘廷哲^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 谈竹奎³, 王宗义^{1,2}, 刘斌³, 曹望璋^{1,2}

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510530; 2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东 广州 510530;
3. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 针对离网型微电网需求响应中用户最低电费成本的问题, 提出一种基于 IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需求响应经济调度优化方法。首先, 基于信息间隙决策理论求解可再生能源发电功率的不确定区间; 然后, 根据发电侧对策略风险的接受度, 计算可再生能源出力期望; 最后, 利用 Stackelberg 博弈模型管理双侧策略迭代交互, 确定供给侧发电机组最优出力分配, 以减少发电成本。实验结果表明, 本文提出方法可显著降低需求侧日负荷峰谷比, 且与现有方法相比, 在规避光伏机组出力预测偏差风险的基础上使用户用电费用最低。

关键词: 需求响应; 信息间隙决策理论; Stackelberg 博弈; 鲁棒优化; 经济调度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.023 中图分类号: TM73; TK01 文章编号: 1673-9140(2024)06-0222-10

An economic dispatch optimization approach for demand response in off-grid microgrid based on IGDT-Stackelberg game

PAN Tingzhe^{1,2}, JIN Xin^{1,2}, TAN Zhukui³, WANG Zongyi^{1,2},
LIU Bin³, CAO Wangzhang^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510530, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510530, China; 3. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: In view of the minimum electricity cost for users in the demand response of off-grid microgrids, an economic dispatch optimization method for the demand response of off-grid microgrids based on the IGDT-Stackelberg game is proposed. Firstly, the information gap decision theory is used to solve the uncertainty interval of renewable energy generation power. Secondly, the renewable energy output expectation is calculated based on the acceptance of strategy risk on the generation side. Finally, the Stackelberg game model is used to manage the iterative interactions of the two-side strategies to determine the optimal output allocation of the generating units on the supply side, so as to reduce the cost of generation. The experimental results show that the proposed method can significantly reduce the peak-to-valley ratio of daily loads on the demand side and minimize the electricity consumption cost for users compared with the existing methods while circumventing the risk of photovoltaic (PV) unit output prediction bias.

Key words: demand response; information gap decision theory; Stackelberg game; robust optimization; economic dispatch

随着新型电力系统建设的推进, 电气化设备 (distributed generator, DG) 普及率越来越高^[1-2], 微电网 (microgrid, MG)^[3-5] 中分布式发电与用户负荷

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0205300); 南方电网重点科技项目 (GZKJXM20222129, GZKJXM20222168, GZKJXM20222190)

通信作者: 潘廷哲 (1994—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事电力需求侧管理与智能用电方面的研究; E-mail: pantz@csgrid.com.cn

的不确定性相叠加导致负荷峰谷差扩大、发电侧成本增加^[6]。与并网型微电网不同,离网型微电网^[7]脱离与主网的能量互动,内部源荷功率波动性强,不能通过与电网的连接来实现能源的存储和传输,需制定考虑离网型微电网内部能源供需平衡的新型网架内资源总成本优化控制策略,以此提高微电网控制的鲁棒性和提升离网系统内的运行安全。需求响应^[8-9](demand response, DR)可引导电力消费者以降低电力费用为目标调整负荷需求,以更好匹配微电网的需求和供应^[10],且有效弱化用户需求峰值和减少经济成本^[11-13]。

近年来上述问题研究主要聚焦发电侧高比例可再生能源^[14]出力的不确定性^[15-16],文献[17]以风光出力不确定性为基础,探究电力现货市场运行机制,提升合作个体的收益。文献[18]在考虑天气和负荷使用不确定性的情况下,提出鲁棒优化模型,以降低系统峰谷比(peak-to-valley ratio, PVR),减少居民用户电费。文献[19]将信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)的鲁棒模型和模型预测控制相结合,提出综合能源系统双层能量优化调度策略,以降低区域综合能源系统的运行成本。IGDT鲁棒模型因可优化无法用概率或场景表示的不确定性,兼顾稳定发电和减少成本2个目标,增加发电侧机组出力计划的鲁棒性。然而,需求响应策略应更多从市场经济和用户意愿^[20-21]方面考虑,以解决双侧利益追求不同导致的理论研究无法落地的问题。

博弈论可解决上述多方互动问题^[22],文献[23]在多微电网系统中考虑共享储能设备,以系统和用户为参与主体分别构建净收入最大和电费成本最小目标函数,形成互动均衡博弈模型。文献[24]基于博弈论方法研究地理分布式数据中心的DR定价方案,同时考虑本地售电公司间的依赖性和云边数据处理的依赖性,以平抑用户电力需求。文献[25]提出基于回合的博弈论去中心化算法管理用户与电网之间的交互,在满足电力系统约束的前提下降低用户的电费成本。上述研究将博弈论方法应用于需求响应技术中,解决了多方互动协同运行的动态问题,然而当前博弈方法研究对参与者的不确定性因素考虑不充分,参与者相关描述过于理想化,使博弈结果对数据依赖性较强,不确定性因素数据的变化易引起博弈结果的较大偏差。

为此,本文针对离网型微电网中计及可再生能源不确定性的双侧经济鲁棒调度问题,提出离网型

微电网环境下需求响应优化调度方法。首先使用IGDT的鲁棒性建模对供给侧策略的不确定性因素进行优化,根据发电侧的风险敏感度建立IGDT鲁棒模型,降低可再生能源出力不确定性对供给侧经济调度计划的影响;然后将具有负荷差异性的多个单体用户看成一个拥有相同总负荷种类和总数量的用户集合,并将不愿参与负荷调整的用户负荷看作不可调负荷,以此量化用户意愿;最后需求侧以降低电费为目标,供给侧以平稳发电并节约发电成本为目标,双侧决策进行迭代博弈,基于博弈均衡解制定调度计划,并通过算例对本文提出方法的准确性和有效性进行验证与分析。

1 离网型微电网双侧典型场景建模

为描述供给侧与需求侧的目标函数与约束,对离网型微电网双侧典型场景进行建模,离网型微电网双侧信息交互架构如图1所示。

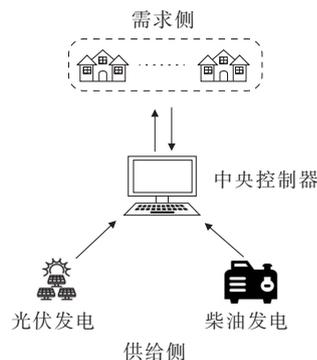


图1 离网型微电网双侧信息交互架构

Figure 1 Information interaction architecture of off-grid microgrid at both sides

图1中,离网型住宅微电网包括用户、分布式发电机、中央控制器(central controller, CC)和可再生能源设备。需求侧用户以住宅为单位,每个用户具备一套电器设备和内置能源管理调度程序(energy management scheduler, EMS)的智能电能表。考虑不同类型设备,包括可中断负荷、可调负荷和不可调负荷,用户根据收到的电价,在家庭局域网内使用EMS控制各设备的运行,智能电能表随后将EMS存储的设备运行时间、能源消耗等信息发送给CC,CC接收到所有用户的需求负荷后,根据系统约束及售电收益确定电价。

1.1 需求侧约束模型

1.1.1 储能系统模型

储能系统(energy storage system, ESS)因可在

电网高峰时放电、低谷时充电减轻电网负荷压力并为用户节省电费支出,故可视作可中断负荷。ESS使用时间、使用功率与ESS荷电状态(state of charge, SOC)有关,且受ESS本身设备参数限制。

ESS约束如下:

$$\begin{cases} S_t = S_{t-1} + \frac{\eta^c P_t^c}{E^{\text{ESS}}} - \frac{P_t^d}{\eta^d E^{\text{ESS}}} \\ S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \\ 0 \leq P_t^c \leq R_t^c U_t \\ 0 \leq P_t^d \leq R_t^d (1 - U_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_t 为 t 时段 ESS 荷电状态的运行状态,由前一时段荷电状态 S_{t-1} , 充、放电效率 η^c 、 η^d , 最大容量 E^{ESS} 和充、放电功率决定,同时 S_t 受 S_{\min} 和 S_{\max} 限定; P_t^c 、 P_t^d 分别为 ESS 在 t 时段充、放电状态的功率; R_t^c 、 R_t^d 分别为 ESS 的充、放电速率,由此来限制 ESS 充、放电功率; U_t 为二元决策变量。 $U_t=1$ 时, ESS 充电; $U_t=0$ 时 ESS 放电。

1.1.2 负荷需求模型

用户 t 时段从电网购入的功率即为负荷需求量,由该时段不可调负荷功率、可调负荷功率和储能的充、放电功率决定,即

$$d_t = \sum_{a \in A_n} P_t^a + \sum_{a \in A_s} P_t^a + U_t P_t^c - (1 - U_t) P_t^d \quad (2)$$

式中, d_t 为 t 时段从微电网购入的功率; P_t^a 为用户的 n 个不可调负荷 t 时段的功率; P_t^s 为 s 个可调负荷在 t 时段的功率; A_n 为不可调负荷的集合; A_s 为可调负荷的集合。

同时,为防止用户尖峰负荷需求引起发电侧巨大波动,设置用户需求阈值为

$$0 \leq d_t \leq P^{\text{peak}} \quad (3)$$

式中, P^{peak} 为聚合器设置的需求阈值。

1.1.3 可调负荷模型

本文微电网所有可调负荷的功率调节范围为 0 到该负荷最大功率,且只在各自运行时段内进行功率调节,以保证可调负荷调节的合理性。其约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^s \leq P_s^{\max}, \quad \forall s \in A_s \\ P_t^s = 0, \quad \forall s \in A_s, \quad \forall t \notin \Gamma_s \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_s^{\max} 为所有可调负荷的最大功率; Γ_s 为可调节负荷的运行时段。

1.2 供给侧约束模型

1.2.1 功率平衡模型

根据双侧能量供给特性,用户每个时段的购电量均需满足用户的需求负荷,即

$$P_t = d_t \quad (5)$$

式中, P_t 为用户侧 t 时段购电量。

1.2.2 发电机组模型

每台柴油发电机的输出功率不违反每台发电机的最小和最大功率限制且受功率上升和功率下降约束限制,约束如下:

$$\begin{cases} P_g^{\min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} \\ P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq r_g^u \\ P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq r_g^d \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_g^{\min} 和 P_g^{\max} 分别代表发电机 g 的最小和最大输出功率; r_g^u 和 r_g^d 分别为发电机 g 的功率上升和功率下降约束。

2 基于 IGDT 的供给侧经济调度

为实现供给侧经济鲁棒性调度,本文构建基于发电成本的不同情况的电价计算规则,利用 IGDT 建立可再生能源发电鲁棒模型,以规划发电侧发电计划。

2.1 电价计算

中央控制器根据发电成本与发电量制定电价,并传输给用户,用户根据电价使用 EMS 来控制设备的用电时间与能耗,以实现电费成本最低的目标。发电成本的计算式为

$$C_t^{\text{ss}} = \sum_{g \in G} a_g (P_{g,t})^2 + b_g (P_{g,t}) + c_g + \sum_{g \in G} C_g^{\text{M}} P_{g,t} \Delta t + C_{\text{pv}}^{\text{M}} P_t^{\text{pv}} \Delta t \quad (7)$$

式中, C_t^{ss} 为发电成本; a_g 、 b_g 、 c_g 分别为发电机组 g 的成本系数; C_g^{M} 和 C_{pv}^{M} 分别为柴油发电机组 g 和光伏发电机组的单位发电维护成本。

基于发电成本与发用电量关系设置不同的电价计算规则,引导用户进行负荷调整。电价计算式为

$$C_t = \begin{cases} \frac{C_t^{\text{ss}}}{\sum_{g \in G} P_{g,t} \Delta t + P_t^{\text{pv}} \Delta t}, & P_t \leq \sum_{g \in G} P_{g,t} + P_t^{\text{pv}} \\ \frac{C_t^{\text{ss}}}{d_t \Delta t}, & P_t \geq \sum_{g \in G} P_{g,t} + P_t^{\text{pv}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, G 为发电机组的集合,由柴油发电机组与光伏发电机组组成; $P_{g,t}$ 为柴油发电机组 g 在 t 时段的输出功率; P_t^{pv} 为 t 时段供给侧光伏发电功率。若 t 时刻的购电量小于微电网中的所有发电量,则 t 时刻的电价为发电成本除以所有发电量。此时用户的电价较低,可引导用户将负荷转移到这个时段,总发电量与负荷需求量的差值为发电侧的低成本余量

空间,即用户提升该数值的用电量不会造成更多的发电成本;若购电量大于供给侧发电量,该时刻电价为发电成本除以用户负荷用电量。

2.2 基于 IGDT 的鲁棒模型

首先,基于 IGDT 对供给侧可再生能源发电功率缺额随机性的概率分布进行建模,获得不确定性因素的最大波动范围,然后,采用基于概率的置信性,计算结果定义功率与缺额的最大误差范围^[26]。可再生能源功率缺额的概率分布如图 2 所示, $1-\epsilon$ 为不确定性置信度。 $U(\tilde{u}, \epsilon)$ 为置信不确定区间, u^d 和 u^u 分别为 $U(\tilde{u}, \epsilon)$ 的下界和上界,以最大化置信水平为目标,得到基于概率的 IGDT 鲁棒模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max 1 - \epsilon = P \{ u^d(\tilde{u}, \epsilon) \leq u \leq u^u(\tilde{u}, \epsilon) \} \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_u f(X, u) \leq f_c \\ f_c = (1 + \sigma) f_0 \\ h(X, u) = 0, g(X, u) \geq 0 \end{array} \right. \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \epsilon \leq 1 \\ u \in U(\tilde{u}, \epsilon) = \{ u^d(\tilde{u}, \epsilon) \leq u \leq u^u(\tilde{u}, \epsilon) \} \\ f = \min_X C_i^{ss} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, P 为概率; f 为发电侧的最小发电成本; f_0 为光伏发电取预测值时,目标函数 f 的值; f_c 为引入不确定性因素后的最大目标值; σ 为风险接受度。

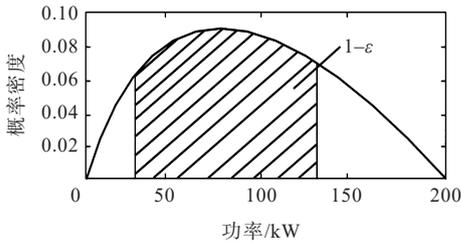


图 2 可再生能源功率缺额的概率分布

Figure 2 Probability distribution of renewable energy power deficit

3 IGDT-Stackelberg 博弈双侧经济优化调度

本文在使用 IGDT 对离网型微电网可再生能源发电的不确定性进行鲁棒建模的基础上,提出新型离网模式微电网需求响应的 IGDT-Stackelberg 优化调度方法,据此解决双侧能源孤立调度导致现有需求响应方案未能实现用户最低电费成本的问题。

3.1 双侧能源互动目标函数

需求侧用户根据接收到的电价信息,以用能费用最小为目标,调整电器设备运行时间与能源消

耗。用户的目标为每日费用最少,由每日电费与 ESS 维护费用组成。设 Φ 为需求侧用户的集合, $|\Phi|=h$ 为用户数量, A 为一套电器设备的集合,将一天划分为 24 个相等的时段,其中 $\Gamma = \{1, 2, \dots, 24\}$ 。构建用户目标函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C_h = \sum_{t \in \Gamma} C_t P_t \Delta t + \\ \sum_{t \in \Gamma} C_{Ess}^M (U_t P_t^c + (1 - U_t) P_t^d) \Delta t \\ \text{s.t. 式(1)、(3)、(4)、(8)} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中, C_h 为用户 h 每日费用; C_{Ess}^M 为 ESS 的单位充放电维护成本; U_t 为二进制决策变量,如果用户在 t 时段内充电, U_t 等于 1, 否则为 0; Δt 为 t 时段内用电时间。通过文 1.1 中对用户侧负荷的建模可知,用户目标函数的决策变量为连续实变量,可用混合整数线性规划求解方法进行求解。

供给侧要在满足用户负荷需求、系统约束^[27]和充分利用可再生能源的情况下,安排 DG 的最佳输出功率,减少发电成本,构建供给侧目标函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max E_{ss} = \sum_{t \in \Gamma} C_t P_t \Delta t - \sum_{t \in \Gamma} C_t^{ss} \\ \text{s.t. 式(5)、(6)、(8)} \end{array} \right. \quad (11)$$

式中, E_{ss} 为供给侧的收益。

3.2 Stackelberg 博弈模型

Stackelberg 博弈模型由领导者 (leader) 和跟随者 (follower) 组成,领导者首先做出决策,跟随者根据领导者的策略做出决策,领导者根据跟随者的策略更新自己的决策,直至达到 Stackelberg 均衡 (Stackelberg equilibrium, SE)。以往研究通常将供给侧作为领导者,需求侧作为跟随者,符合 Stackelberg 博弈 $1-N (N \geq 1)$ 的特性,但却忽视了用户的负荷需求在博弈中先于一切,由此本文构建双侧决策信息交互流程如图 3 所示。

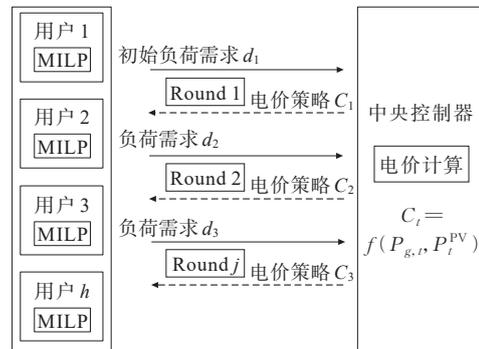


图 3 双侧决策信息交互流程

Figure 3 Decision-making information interaction process at both sides

由图3可知,需求侧用户群体的负荷用电量与负荷数量属于线性关系,因此可将所有具有负荷差异性的个体用户看成一个拥有相同总负荷种类和总数量的用户集合 Φ ,该集合的需求负荷策略即为所有用户需求负荷之和。该方式只计算层面的累加,不会导致用户间用电信息的交互,充分保护用户的个人/家庭隐私,且以集合用户的形式输出需求负荷,可进一步增强单用户信息在发电侧的隐私性,发电侧的电价制定规则也同样不会向用户透露。该博弈属于信息不对称博弈,因此形成了典型1-1 Stackelberg 博弈模型。本文所提方法预设博弈参与者们的决策制定均为理性,且会相互影响;不同参与者决策始终以各自收益为目标,没有用户会做出非理性决策以增加用电成本。

用户的负荷需求以总负荷曲线的形式发送给发电侧,微电网不会知晓单个用户具体负荷信息。同时,用户不会知晓电价计算规则以及DG和光伏发电的成本系数,由此本文所提方法可有效保护双隐私的隐私信息。

3.3 算法实现流程

本文提出的基于IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需求响应经济优化调度实现方法流程图如图4所示,其实现流程如下:

1) 将可再生能源不确定性变量的预测值代入,并根据决策者对风险接受度设置 σ ,计算IGDT鲁棒模型的可再生能源出力期望值;

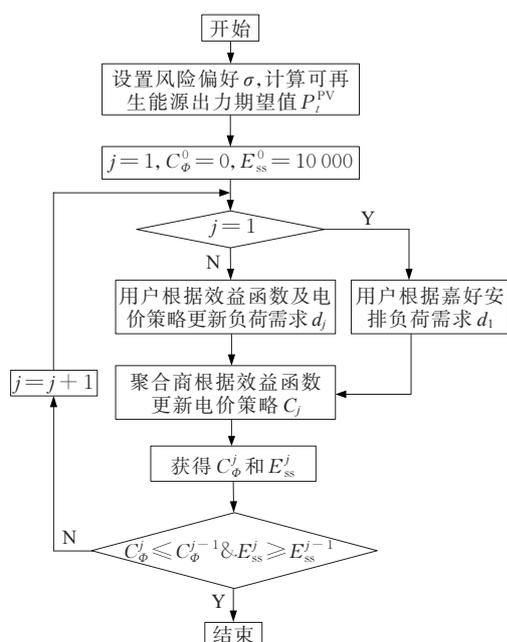


图4 本文方法实现流程

Figure 4 Implementation flowchart of proposed method

2) 用户在不知道供给侧发布的电价信息的情况下,根据自己的用电习惯,自由安排一天的负荷用能 d_1 ;

3) 中央控制器在收到用户的需求负荷后,根据发电侧的效用函数制定最优的电价策略 C_1 并计算该策略下的收益,并将 C_1 返还给用户;

4) 用户根据自己的效益函数,在电价策略 C_1 下更新负荷策略 d_1 ,并计算该策略下的电费 C_Φ^1 ;

5) 重复步骤3)到步骤4),直至领导者与跟随者都能在当前条件下执行其最优策略,任何决策者都不会因为策略的改变而获得更多收益,即 Stackelberg 均衡状态。

4 算例分析

通过构建离网型微电网中发电侧与用户侧仿真场景,验证本文提出的基于IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需求响应经济调度优化方法的准确性和有效性,案例设置如表1所示。

表1 案例设置

Table 1 Case setting

案例	用户数量	光伏	储能	Stackelberg 博弈	IGDT	传统鲁棒优化
1	150	✓	✓	✓	✓	×
2	150	×	✓	✓	×	×
3	150	✓	×	✓	✓	×
4	180	✓	✓	✓	✓	×
5	150	✓	✓	✓	×	×
6	150	✓	✓	✓	×	✓
7	150	✓	✓	×	✓	×
8	120	×	×	×	×	×
9	150	×	×	×	×	×
10	180	×	×	×	×	×

4.1 算例介绍

本文算例中用户侧各电器设备参数见参考文献[28-31],建立的离网型居民微电网的用能场景如图5所示。

由图5可知,预设的系统发电量在某些时段会大于需求负荷,因为某些时段用户负荷需求增长与降低速度较快,而按本文式(6),发电侧机组的功率爬坡约束使该时刻发电量无法快速变化以匹配用户负荷需求,产生额外发电成本,而供给侧通过制定不同时段电价,引导用户将负荷调整系统最小发电量之上,避免额外的成本浪费。为验证本文提出基于IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需

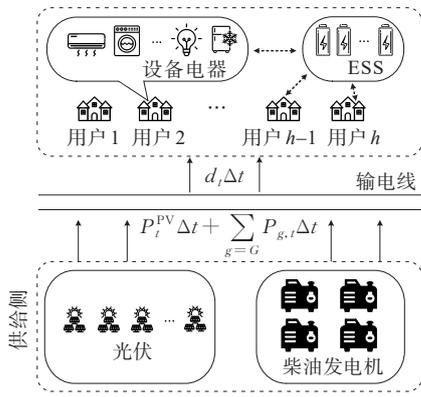


图 5 离网型微电网双侧模拟场景

Figure 5 Simulation scenario of both sides of off-grid microgrid

求响应经济调度优化方法的有效性与其优越性,本文设置 10 种案例如表 1 所示,其中:案例 1~4 分别为考虑全要素、不考虑光伏发电、需求侧用户不考虑使用储能及考虑 180 个用户下的本方法表现,案例 5 为不考虑不确定因素预测误差的影响,案例 6 为使用传统鲁棒优化调度方法中的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法与遗传算法(genetic algorithm, GA),案例 7 为不考虑双侧信息互动的博弈均衡解,案例 8~10 中未采取任何需求响应调度方法且用户数量不同,该 3 项案例中需求侧用户不使用储能设备、发电侧不使用光伏发电。

4.2 系统约束验证

为验证系统约束式(6)对发电侧的成本影响,分别对案例 8~10 中 120 个用户、150 个用户和 180 个用户的实时发电功率与爬坡量所占最大约束的实时比例以及案例 9 中总发电量与负荷需求曲线的关系进行验证,案例 8~10 中用户实时发电功率与爬坡量所占最大约束的比例仿真实验结果如图 6 所示,案例 9 中的总发电量与负荷需求仿真实验结果如图 7 所示。其中,时段 0 表示 00:00—01:00,时段 23 表示 23:00—00:00(后续图 8~10 设置相同)。

由图 6 可知,在非高峰时段,为满足系统最小发电量约束,实时发电量保持在最大发电量的 30%。在高峰以及平峰时段,发电量增减速度在 50% 以下。然而,在迎峰及入谷阶段,发电量增减速度均超过 50%,且随着用户数量的增加,发电量改变速度也在增加。这是由于功率的升降约束,使发电量提前一个时段上升(或延迟一个时段下降),导致如图 7 中案例 9 的供给侧在某些非最小发电的阶段,出现发电量大于需求负荷的情况。根据式(8),此时电价会上升,以弥补供给侧的额外发电成本,同

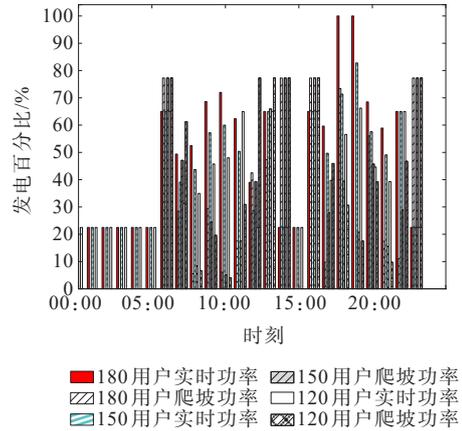


图 6 实时发电功率与爬坡量所占最大约束的比例

Figure 6 Ratios of real-time generating power and amount of climb to maximum constraint

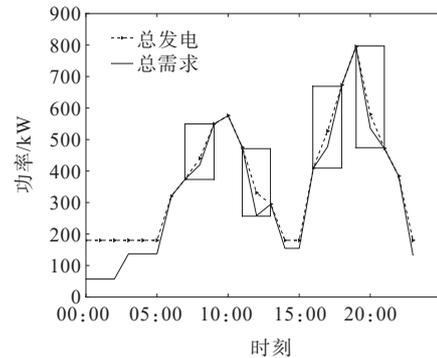


图 7 案例 9 中的总发电量与负荷需求

Figure 7 Total generation and load demand in case 9

样会引起用户的电费上涨。电价的制定不仅应满足发电-用电约束,还要能够反映出发电-用电中的供给两侧的利益目标。供需双侧有各自形成竞争性的目标,需要双侧采取共同策略来面对挑战。据此,需建立结合两侧的综合模型,并在此基础上进行优化,以解决供需双侧的经济调度问题。

4.3 案例验证和对比

为验证本文所提基于 IGDT-Stackelberg 博弈的离网型微电网需求响应经济调度优化方法对发电平稳性的改进,设置如表 1 所示的案例 1。案例 1 中,发电侧使用光伏联合柴油发电机组进行发电,用户侧使用储能配合负荷调整,仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在时段 0~5 内,柴油发电机组需满足最小发电约束,发电量超过需求负荷,此时系统处于低成本低电价状态,ESS 处于充电状态。光伏发电阶段,发电机组各时段发电平稳,由光伏发电和 ESS 放电共同满足第一个用电高峰的需求负荷。晚高峰阶段柴油发电机组出力增加,与 ESS 共同满足需求负荷。

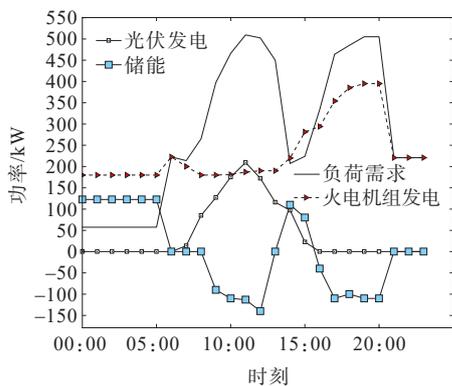


图8 案例1仿真结果

Figure 8 Simulation results for case 1

为说明光伏发电对于供给侧平稳发电的作用,设置如表1所示的案例2。在案例2中,需求侧使用ESS进行负荷调整,但供给侧发电仅包含柴油发电机组出力,未使用光伏发电,案例2仿真结果如图9所示。

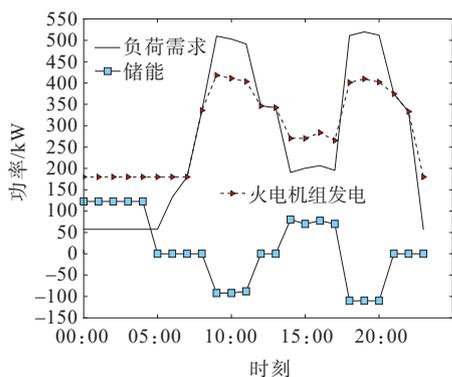


图9 案例2仿真结果

Figure 9 Simulation results for case 2

由图9可知,用户根据电价,在低谷(即低电价)时段对ESS进行充电,充分利用廉价电力,在高峰(即高电价)时段使用ESS放电,以维持负荷需求并减少电费。然而,由于约束式(1),ESS所能提供的功率、运行时间及最大供电量有限,为满足用户需求负荷,柴油发电机组的发电量跟随高峰时段的需求负荷同步增加。

为说明储能系统对需求侧用户负荷调整以及供给侧平稳发电的作用,设置如表1所示的案例3。在案例3中,用户侧不使用ESS,供给侧使用光伏作为可再生能源,其仿真结果如图10所示。

由图10可知,在需求负荷大于最低发电量的时段,使用所有的太阳能发电,因为光伏发电的费用远低于柴油,从而尽可能地降低发电成本。相比于图9中的案例2,案例3在时段0~5中浪费了更多的

DG的最小发电量。在时段17~20,为匹配需求负荷,柴油发电机组产生较大功率高峰。在时段7~14,案例3对光伏的充分利用降低了发电成本,但由于光伏本身的波动性,使DG的发电不能保持稳定,从而产生连续的波动。

上述实验结果验证了光伏与ESS在双侧能量管理调度中的重要性,以及本文所提方法的有效性。为了验证所提方法在平稳发电与降低成本方面的优越性,进行对比实验,博弈迭代过程如图11所示,其中,案例6分别考虑了PSO算法和GA。

由图11可知,本文所搭建模型应用在各案例中均能成功收敛,且随着供给侧与需求侧交替更新电价策略与负荷策略,用户电费成本在每次迭代中出现波动,但总体呈下降趋势,并且在第15次博弈左右之后达到均衡。用户电费成本与PVR结果如表2所示。

由表2可知,将案例1与其他方案中用户电费和PVR进行比较。

1) 案例1中最优成本 $f_0=820$ 美元,设定偏差因子 $\sigma=5\%$,加上鲁棒性成本后的电费为 $f_c=f_0 \times (1+5\%)=861$,同时PVR为2.22,达到了所有案例中的最低。

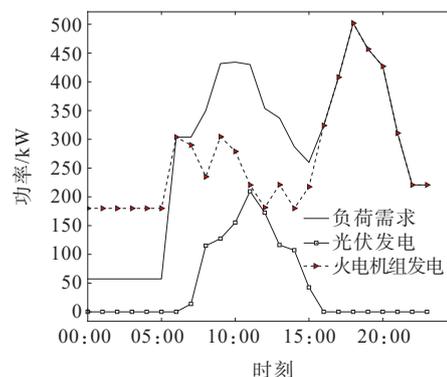


图10 案例3仿真结果

Figure 10 Simulation results for case 3

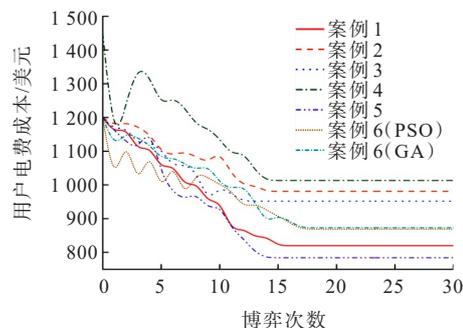


图11 博弈迭代过程

Figure 11 Iterative process of game

表2 各案例经济与PVR对比

Table 2 Comparison of economics and PVR by case

案例	电费/美元	PVR
1	820	2.22
2	981(+19.6%)	2.32
3	952(+16.1%)	2.78
4	1013(+23.5%)	3.14
5	784(-4.4%)	2.22
6	PSO 869(+6.0%)	2.22
	GA 873(+6.5%)	

2) 案例2未考虑可再生能源发电的低成本性,导致用户的电费增加了19.6%。在发电量一样的情况下,柴油发电成本高于光伏发电成本,从而使需求侧电费增加。

3) 案例3中需求侧未利用ESS的充、放电(低电价时充电,高电价时放电)来调节电费成本,负荷调整不够灵活。发电侧未能充分利用白天廉价的大量光伏发电,而在晚高峰时使用高成本的柴油,导致用户侧用电成本增加了16.1%。

4) 案例4相较于案例1,用户增加了20%,但电费却增加了23.5%。这因为更多的用户在高峰时段的需求负荷超过了发电侧的极限,造成发电侧发电成本进一步增加,用户的电费也随之增加。

5) 案例5在模型中对供需双侧进行建模,考虑决策之间的互相影响。然而,文献[25]中直接使用光伏发电的历史数据进行直接计算,忽略了可再生能源发电的不确定性。该方案虽然将用户电费降至更低,但对光伏数据的敏感性过强。一旦光伏实际出力与预测值产生偏差,就会引起发电功率的波动。同时根据式(8),用户电费随着各时刻光伏出力的偏差比例同步增加。

6) 案例6分别考虑使用PSO和GA进行鲁棒优化,相对所提方法,用户成本分别增加6.0%和6.5%。

7) 案例7考虑使用IGDT进行鲁棒优化,但未使用Stackelberg博弈进行双侧策略信息的互动,用户电费尚未通过博弈迭代达到最优,比最低电费增加9.4%。

综上所述,本文所提模型在降低PVR方面与现有方法表现相同,案例8中出现的爬坡问题在案例1~6中均未出现。但在经济性方面,本文所提方法表现优于现有方法,且具有更高的鲁棒性。通过案例1~4对比可知,储能系统、光伏发电与更多用户的参与可减少发电机产生的峰值功率,从而降低发电成本。

5 结语

针对离网型微电网需求响应双侧能量管理策略鲁棒性优化问题,本文提出了基于IGDT优化Stackelberg博弈的离网型微电网经济调度优化方法。实验结果表明:

1) 本文建立的博弈模型在光伏发电不确定的情况下,为发电机组提供了具有鲁棒性的经济性出力计划,有效规避了预测误差给发电侧带来的额外成本;

2) 本文建立的双侧能源互动模型中,ESS通过在需求侧充、放电缓解发电侧的发电压力,供给侧通过利用可再生能源节省发电成本;

3) 相比现有方法,本文提出方法可在保持供给侧发电曲线平稳的前提下,使用户电费成本达到更低。

综上所述,本文提出的基于IGDT优化Stackelberg博弈的离网型微电网经济调度优化方法有助于在降低发电侧峰谷率的情况下,降低电价,为用户减少电费,能够为工业园区、综合能源系统、大电网等拓展性场景的需求响应策略的制定提供参考。

参考文献:

- [1] 陈倩,王维庆,王海云.计及需求响应和混合博弈含多微网主动配电网协调优化[J].电力系统自动化,2023,47(9):99-109.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Coordinated optimization of active distribution network with multiple microgrids considering demand response and mixed game[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(9):99-109.
- [2] 孟球,肖居承,洪居华,等.计及需求响应不确定性的节点负荷准线:概念与模型[J].电力系统自动化,2023,47(13):28-39.
MENG Yan, XIAO Jucheng, HONG Juhua, et al. Nodal customer directrix load considering demand response uncertainty:concept and model[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(13):28-39.
- [3] 程杉,陈诺,徐建宇,等.考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J].电力工程技术,2023,42(2):40-47+57.
CHENG Shan, CHEN Nuo, XU Jianyu, et al. Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 40-47+57.
- [4] 陈倩,王维庆,王海云.计及需求响应和混合博弈含多微

- 网主动配电网协调优化[J]. 电力系统自动化,2023,47(9):99-109.
- CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Coordinated optimization of active distribution network with multiple microgrids considering demand response and mixed game[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(9):99-109.
- [5] 郭国栋,徐倩雯,龚雁峰. 考虑需求响应的互联交直流混合微电网的分布式经济调度模型[J]. 电测与仪表,2023,60(5):116-125+153.
- GUO Guodong, XU Qianwen, GONG Yanfeng. A distributed economic dispatching model for networked hybrid AC/DC microgrids considering demand response [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60 (5):116-125+153.
- [6] 张泽华,宋桂英,张晓璐,等. 考虑恒功率负载的直流微电网稳定性与鲁棒性控制策略[J]. 电工技术学报,2023,38(16):4391-4405.
- ZHANG Zehua, SONG Guiying, ZHANG Xiaolu, et al. Stability and robustness control strategy of DC microgrid considering constant power load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (16):4391-4405.
- [7] 刘小龙,李欣然,孟娅,等. 离网状态储能/燃气机分层协调频率控制策略[J]. 电工技术学报,2023,38(17):4800-4810.
- LIU Xiaolong, LI Xinran, MENG Ya, et al. Hierarchical coordination frequency control strategy of battery energy storage/gas turbine under off-grid state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(17):4800-4810.
- [8] 衣秀清,顾洁,刘书琪. 考虑需求响应的配电网弹性提升优化[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(4):29-37.
- YI Xiuqing, GU Jie, LIU Shuqi. Optimization of distribution network resilience enhancement considering demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(4):29-37.
- [9] 孙毅,贾孟扬,陆俊,等. 计及用户需求响应的智能用电互动潜力分析[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(4):43-50.
- SUN Yi, JIA Mengyang, LU Jun, et al. Analysis on interactive potential of intelligent power utilization considering user demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(4):43-50.
- [10] JIBRAN M, NASIR H A, QURESHI F A, et al. A demand response-based solution to overloading in underdeveloped distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(5):4059-4067.
- [11] 徐成司,董树锋,华一波,等. 基于改进一致性算法的工业园区分布式综合需求响应[J]. 电工技术学报,2022,37(20):5175-5187.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, HUA Yibo, et al. Distributed integrated demand response of industrial park based on improved consensus algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (20):5175-5187.
- [12] 曾博,徐富强,刘一贤,等. 综合考虑经济-环境-社会因素的多能耦合系统高维多目标规划[J]. 电工技术学报, 2021,36(7):1434-1445.
- ZENG Bo, XU Fuqiang, LIU Yixian, et al. High-dimensional multiobjective optimization for multi-energy coupled system planning with consideration of economic, environmental and social factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (7):1434-1445.
- [13] 周俊宇,李伟,花洁,等. 考虑需求侧可控负荷的含储能社区综合能源系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023,38(2):114-123.
- ZHOU Junyu, LI Wei, HUA Jie, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system with energy storage considering demand-side controllable load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2):114-123.
- [14] 曾小青,唐超雯. 分时电价环境下计及新能源消纳的虚拟电厂优化调度研究[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(3):24-34.
- ZENG Xiaoqing, TANG Chaowen. Research on optimization of virtual power plants dispatch by considering the consumption of new energy under time-of-use electricity price environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(3):24-34.
- [15] 陈灏,田琳,盛剑胜,等. 考虑风险规避和需求响应的电力市场可再生能源综合交易决策研究[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(1):27-34.
- CHEN Hao, TIAN Lin, SHENG Jiansheng, et al. Research on comprehensive trading decision of renewable energy in power market considering the risk aversion and demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(1):27-34.
- [16] 潘华,姚正,黄玲玲,等. 考虑分布式电源及需求响应不确定性的园区综合能源系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):94-105.
- PAN Hua, YAO Zheng, HUANG Lingling, et al. Economic dispatch of park integrated energy system considering the uncertainty of distribution generation and demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):94-105.
- [17] 刘蓉晖,王乐凯,孙改平,等. 考虑不确定性的风-光-储合作联盟参与含需求响应的主辅联合市场的竞价交易模型[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(11):96-107.
- LIU Ronghui, WANG Lekai, SUN Gaiping, et al. Bidding transaction model of wind-solar-storage cooperative alliance participating in the main and auxiliary joint market with demand response considering uncertainty[J].

- Power System Protection and Control,2023,51(11):96-107.
- [18] DIEKERHOF M, PETERSEN F, MONTI A. Hierarchical distributed robust optimization for demand response services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):6018-6029.
- [19] 孔德政,张靖,何宇,等.区域综合能源系统IGDT-MPC双层能量优化调度[J].电网技术,2022,46(10):3970-3979. KONG Dezheng, ZHANG Jing, HE Yu, et al. IGDT-MPC bi-layer energy optimal scheduling of regional integrated energy system[J]. Power System Technology, 2022, 46 (10):3970-3979.
- [20] 胡志勇,郭雪丽,王爽,等.考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J].电力系统保护与控制, 2023,51(15):109-119. HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. Power System Protection and Control,2023,51(15):109-119.
- [21] 李咸善,周晓岚,姚俊伟,等.考虑车主多模式需求响应模糊意愿的优化调度策略[J].电力系统保护与控制, 2023,51(2):89-101. LI Xianshan, ZHOU Xiaolan, YAO Junwei, et al. Optimal dispatch strategy considering fuzzy intention of multi-mode demand response of vehicle owners[J]. Power System Protection and Control,2023,51(2):89-101.
- [22] 王再闯,陈来军,李笑竹,等.基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化[J].电工技术学报, 2022,37(23):5922-5932. WANG Zaichuang, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Capacity optimization of distributed PV and shared energy storage of prosumer community based on cooperative game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(23):5922-5932.
- [23] 徐艳春,刘海权,孙思涵,等.计及需求响应和共享储能的多微网系统双层优化调度[J].电力自动化设备,2023, 43(6):18-26. XU Yanchun, LIU Haiquan, SUN Sihan, et al. Bi-level optimal scheduling of multi-microgrid system considering demand response and shared energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 18-26.
- [24] TRAN N H, TRAN D H, REN S L, et al. How geo-distributed data centers do demand response: a game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(2):937-947.
- [25] AZZAM S M, ELSHABRAWY T, ASHOUR M. A bi-level framework for supply and demand side energy management in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(1):220-231.
- [26] GUO N X, WANG Y N, YAN G F. A double-sided non-cooperative game in electricity market with demand response and parameterization of supply functions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,126:106565.
- [27] 周燕,刘卫民,陈帆,等.不同光伏渗透率下考虑需求响应的配电网储能双层规划[J].高压电器,2024,60(10): 64-77. ZHOU Yan, LIU Weimin, CHEN Fan, et al. Bi-level planning of energy storage in distribution network considering demand response under different penetration rates of photovoltaic[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60 (10):64-77.
- [28] HUANG G Q, YANG J J, WEI C J. Cost-effective and comfort-aware electricity scheduling for home energy management system[C]//2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-SocialCom-SustainCom). Atlanta, USA. IEEE,2016:453-460.
- [29] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M, et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(2):925-933.
- [30] JOO I Y, CHOI D H. Distributed optimization framework for energy management of multiple smart homes with distributed energy resources[J]. IEEE Access, 2017, 5: 15551-15560.
- [31] ZHANG Y, GATSIS N, GIANNAKIS G B. Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(4):944-953.