

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240569

## 基于状态势博弈的微电网能量管理优化算法研究

曾君<sup>1</sup>, 谭豪杰<sup>1</sup>, 刘俊峰<sup>2</sup>, 曾婧瑶<sup>1</sup>, 陈云<sup>3</sup>, 朱威<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640;  
3. 广东粤电花都天然气热电有限公司, 广东 广州 510820)

**摘要:** 有效的能量管理系统是微电网安全、经济运行的关键技术。综合考虑可再生能源出力和需求侧负荷的灵活性, 提出一种基于状态势博弈理论微电网能量管理方法。首先, 充分考虑用户侧灵活性资源, 将用户负荷分为基础负荷和各柔性负荷, 并对微电网内各主体进行建模。然后, 以微电网内各元件单元作为独立的决策主体, 建立状态势博弈模型。最后, 在博弈外层嵌套遗传算法, 实现可平移负荷和可转移负荷的周期性约束。仿真结果表明: 在保证各主体自主性的前提下, 所提方法在很大程度上提高了可再生能源的消纳水平; 一定程度上提高了用户用电的经济性, 实现了柔性负荷虚拟充放电的功能。与完全势博弈和非博弈方法相比, 所提方法更能体现各主体的平等地位, 同时通过极小化各主体间的通信量实现了各主体之间的隐私保护。

**关键词:** 微电网; 状态势博弈; 能量管理; 柔性负荷; 纳什均衡

### Research on optimization algorithm of microgrid energy management based on a state potential game

ZENG Jun<sup>1</sup>, TAN Haojie<sup>1</sup>, LIU Junfeng<sup>2</sup>, ZENG Jingyao<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>3</sup>, ZHU Wei<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
3. Guangdong Yuedian Huadu Natural Gas Thermal Power Co., Ltd., Guangzhou 510820, China)

**Abstract:** An effective energy management system is a critical technology for the secure and economical operation of microgrids. This paper comprehensively considers the output of renewable energy sources and the flexibility of demand-side loads, and proposes a microgrid energy management method based on a state potential game (SPG). First, user loads are categorized into basic loads and various flexible loads while fully considering the flexible resources on the user side, and models for microgrid entities are developed. Next, an SPG model is established by treating each component unit within the microgrid as an autonomous decision-making entity. Finally, a genetic algorithm is embedded in the outer layer of the SPG to implement periodic constraints on shiftable and transferable loads. Simulation results show that, while ensuring the autonomy of each entity, the proposed method significantly improves the integration of renewable energy and the economic efficiency of electricity consumption for users. Additionally, it enables the virtual charging and discharging of flexible loads. Compared to pure potential games and non-game methods, the proposed method better reflects the equal status of all entities while simultaneously minimizing communication requirements among them to enhance privacy protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62173148 and No. 52377186).

**Key words:** microgrid; state based potential game; energy management; flexible load; Nash equilibrium

## 0 引言

微电网是由分布式电源、储能、能量转换装置、

监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统<sup>[1-2]</sup>。作为分布式电源与大电网之间的重要桥梁, 微电网早在 2010 年就被美国电力科学研究院定义为未来十大关键技术之一。它通过高效地集成分布式能源, 显著提升了可再生能源的渗透率, 是新型能源体系及能源转型中的重要环节<sup>[3]</sup>。

在微电网的关键技术问题中, 经济运行与能量

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62173148, 52377186); 广东省新型电力系统技术创新研究指南项目资助(1689681989109)

管理是微电网实现高效、稳定运行的关键<sup>[4-5]</sup>。早期微电网构成相对简单,利益主体较为单一,能量管理更多关注集中式的经济优化,多使用传统的集中式数学规划方法或智能优化算法,例如用强化区间线性规划<sup>[6]</sup>、随机规划<sup>[7]</sup>、混合整数线性规划<sup>[8]</sup>、遗传算法<sup>[9]</sup>、改进粒子群算法<sup>[10]</sup>、蚁群-强化学习<sup>[11]</sup>等方法进行微电网能量管理。随着技术进步和市场开放,微电网内涵不断得到丰富,构成日趋多样化,且呈现出多主体、开放性态势,这使得微电网的能量管理与优化日趋复杂化,不仅需要处理风光等可再生能源的强不确定性,更需要考虑以下方面: 1) 随着智能化程度提升,负荷侧呈现出多样性与柔性; 2) 决策的分散性与多主体的“自趋利性”; 3) 各主体的随时接入与退出,顶层算法需要支撑即插即用。传统的集中式优化算法已难以满足新时代微电网强不确定性、多主体自趋利性和开放性要求。

博弈论是一种专注于研究多决策主体如何通过优化自身决策来实现利益最大化的理论,被广泛应用于微电网能量管理与优化中<sup>[12-15]</sup>。在博弈论中,势博弈的每个参与者的收益都被映射到一个全局函数上,这个全局函数被称为势函数。通过确定势函数的局部最优,就可以得到势博弈的纳什均衡解。相较于传统博弈方法,势博弈具有有限递增属性(finite improvement property, FIP),保证了纳什均衡解的存在,且由于效用函数与势函数具有一致性,只要势函数设计得当,便可保证个体与全局的一致性<sup>[16]</sup>,为解决均衡解存在性及全局个体利益冲突问题提供了一条有效途径,近年来受到关注,并被应用于微电网优化中<sup>[17-20]</sup>。然而,势博弈过程中需要预设局中人的优先次序,并获取其他局中人决策变量,这影响各决策主体间的平等与隐私,进而影响微电网内各主体参与调度的积极性。

文献[21]引入了辅助分布式决策的状态空间概念,将完全势博弈拓展为状态势博弈(state based potential game, SPG)。SPG在保留势博弈个体决策自主性和自趋利性的基础上,其博弈过程各决策主体具有平等地位,决策过程无须制定局中人的优先次序,增强了决策过程的可信度与实用性,同时以极小的越限估计量作为信息传递参数,有效地保护了各主体隐私。文献[22-23]分别探讨了SPG在储能调频和电力系统分布式经济调度中的实际应用,展示了其解决复杂问题的潜力。文献[24]基于SPG理论,解决了日前需求响应市场中负荷聚合器竞价策略的优化问题。文献[25]基于SPG理论,构建了微电网源-网-荷-储交互优化模型,协调了个体与全局利益。SPG为具备多主体和开放性的新形态的

微电网能量管理与优化提供了一条新的途径与解决方法。

基于以上分析,本文引入SPG理论,提出了一种微电网能量管理与优化方法。首先,充分考虑用户侧灵活性资源,根据不同的用电习惯将用户负荷分为基础负荷和各柔性负荷,对微电网内各主体进行建模,建立各主体的目标函数。然后,在保证微电网个体自主性和自趋利性的基础上,以微电网内各元件单元作为独立的决策主体,建立状态势博弈模型。最后,在博弈外层嵌套遗传算法,实现可平移负荷和可转移负荷的周期性约束,并以一典型的局域微电网进行算例仿真,验证本文所提方法的可行性和有效性。

本文的特色在于: 1) 充分考虑了微网中多主体的平等性以及隐私保护需求,引入了状态势博弈理论,解决了博弈过程中需要制定局中人的优先次序导致的决策不平等性,以越限估计量为信息传递参数,极大地减小通信量的同时实现了微网内各主体的隐私保护; 2) 充分挖掘用户侧灵活性资源,降低储能需求,更大程度实现可再生能源消纳,进而实现微电网内经济性能量管理。

## 1 微电网及其元件模型

### 1.1 微电网结构

本文考虑具有多主体、开放特性的典型分布式微电网,结构如图1所示。

1) 微电网通过公共连接点(point of common coupling, PCC)与上级电网相连,可实现微电网进行离网/并网运行的切换,从而满足不同场景需求。

2) 微电网内部集成了可再生能源发电单元(renewable energy, RE)、用户负荷(load, L)以及储能单元(energy storage, ES)。其中可再生能源发电单元包括光伏阵列(photovoltaic array, PV)和风力发电机(wind turbine, WT),并根据不同的用电习惯将用户负荷细分为:基础负荷 $L_{\text{basic}}$ 、可转移负荷 $L_{\text{shift}}$ 、可平移负荷 $L_{\text{trans}}$ 、可中断负荷 $L_{\text{inter}}$ ,以实现更精细的负荷管理。

3) 微电网内的各单元均配备相应的本地管理器(local manager, LM)和电力电子转换器,从而形成分散且利益主体不同的可控单元。其中电力电子转换器包括传感器(Sen)、控制器(CNTRL)、功率变换器(AC/DC或AC/AC)。各可控单元通过各元件单元的LM与微电网管理器(MG Manager)构建的通信互联网络进行信息交互,实现本地决策和全局协同优化的有机结合,本文的公共信息为博弈参与者的越限估计量。

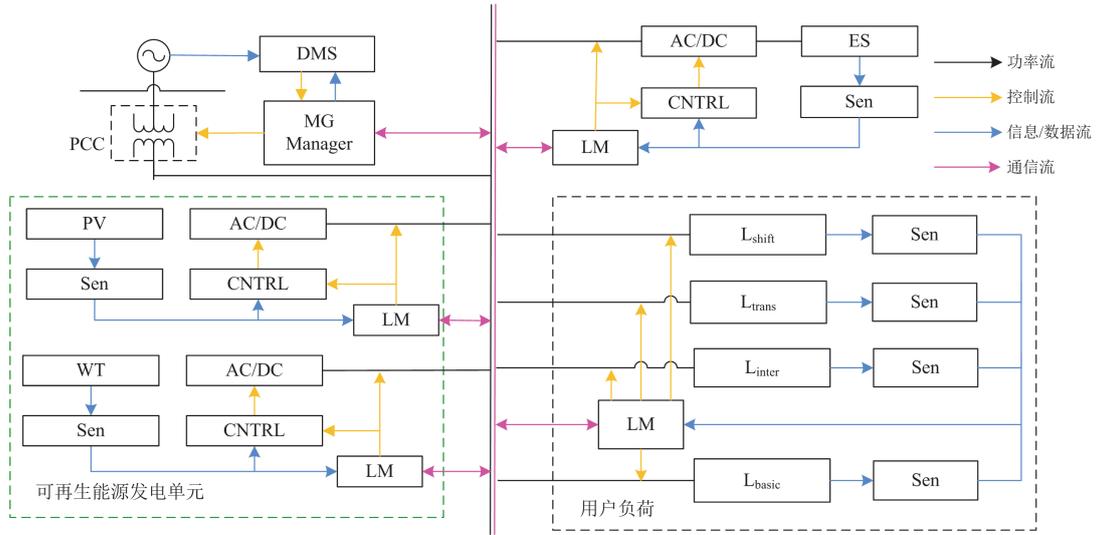


图 1 典型微电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical microgrid structure

## 1.2 元件模型

### 1.2.1 可再生能源发电单元

本文微电网中可再生能源发电单元的收益函数  $C_{RE}$  由售电收益和维修成本构成，定义为

$$C_{RE} = \rho P_{RE} \Delta t - r_{RE} P_{RE} \Delta t \quad (1)$$

式中： $\rho$  为微电网内部实时电价； $P_{RE}$  为可再生能源的输出功率； $r_{RE}$  为可再生能源的单位维修成本； $\Delta t$  为时间间隔，本文设置为 1 h。

同时，可再生能源发电机组在各时段内都应该满足其最大输出功率约束，如式(2)所示。

$$0 \leq P_{RE} \leq P_{RE,max} \quad (2)$$

式中， $P_{RE,max}$  为可再生能源发电机组的最大输出功率。

### 1.2.2 上级电网

为降低微电网与上级电网的交互频率和依赖程度，实现微电网的自给自足，本文仅考虑微电网向上级电网单向购电的模式。在此模式下，上级电网作为微电网的备用电源，微电网根据自身电力需求和内部发电单元的出力情况，决定向上级电网购买电量，其购电成本  $C_{UG}$  定义为

$$C_{UG} = -\rho_{buy} P_{UG} \Delta t \quad (3)$$

式中： $\rho_{buy}$  为向上级电网的购电价格； $P_{UG}$  为向上级电网的购电量。

同时为确保微电网运行的经济性和稳定性，购入的电量被严格控制在最高限制以内，如式(4)所示。

$$0 \leq P_{UG} \leq P_{UG,max} \quad (4)$$

式中， $P_{UG,max}$  为微电网向上级电网购买电量的上限。

### 1.2.3 用户负荷

本文充分考虑用户侧灵活性资源，根据不同的

用电习惯将用户负荷细分为基础负荷以及包括可平移负荷、可转移负荷和可中断负荷的柔性负荷，用户负荷的成本  $C_{LOAD}$  包括用电成本及由于调节用电时段和用电量产生的不舒适度成本，定义如式(5)所示。

$$C_{LOAD} = \rho(P_{basic} + P_{trans} + P_{shift} + P_{inter})\Delta t + \sum_{s \in S} w_s (P_s - P_{s\_sch})^2 \Delta t \quad (5)$$

式中： $P_{basic}$ 、 $P_{trans}$ 、 $P_{shift}$ 、 $P_{inter}$  分别为基础负荷、可平移负荷、可转移负荷和可中断负荷的实际功率； $S$  为柔性负荷的集合， $S = \{L_{trans}, L_{shift}, L_{inter}\}$ ； $w_s$  为柔性负荷  $s$  的不舒适度成本系数； $P_s$ 、 $P_{s\_sch}$  分别为柔性负荷  $s$  的实际出力情况和原计划出力情况。

#### 1) 可平移负荷

将具备一定连续运行时长且功率固定的负荷定义为可平移负荷，如洗衣机、洗碗机等。此类设备一旦开启不可中断，需要按照一定功率运行直至任务完成。根据其用电特性，其策略空间为

$$P_{trans}(t) = -P_{trans,rate} \cdot X_{trans}(t) \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_{trans,start} \leq \alpha_{trans} \leq T_{trans,end} - T_{trans} + 1 \\ T_{trans,start} + T_{trans} \leq \beta_{trans} \leq T_{trans,end} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=\alpha_{trans}}^{\beta_{trans}} y_{trans}(t) = 1 \\ \sum_{t=\alpha_{trans}}^{\beta_{trans}} X_{trans}(t) = T_{trans} \\ \sum_{j=t}^{t+T_{trans}-1} X_{trans}(j) \geq y_{trans}(t) \cdot T_{trans} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{trans}}(t)$  为  $t$  时刻可平移负荷的实际功率;  $P_{\text{trans,rate}}$  为可平移负荷的额定功率;  $X_{\text{trans}}(t)$  为其在  $t$  时刻的工作状态, 为 0-1 变量, 为 0 时待机, 为 1 时工作;  $[T_{\text{trans,start}}, T_{\text{trans,end}}]$  为其可平移时段;  $T_{\text{trans}}$  为其总运行时长;  $[\alpha_{\text{trans}}, \beta_{\text{trans}}]$  为调整后可平移负荷的出力时段;  $y_{\text{trans}}(t)$  为其在  $t$  时刻的启动状态, 为 0-1 变量, 且在整个出力时段中, 只有一个启动时刻。式(8)保证了可平移负荷的连续运行<sup>[22]</sup>。

### 2) 可转移负荷

可转移负荷要求在允许调度区间内总用电量保持不变, 但各时段的用户用电量可灵活调节, 例如电动汽车等充电设备, 其约束条件为

$$-P_{\text{shift,max}} \leq P_{\text{shift}} \leq -P_{\text{shift,min}} \quad (9)$$

$$\sum_{t=\alpha_{\text{shift}}}^{\beta_{\text{shift}}} P_{\text{shift}}(t) = E_{\text{shift}} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{shift}}(t)$  为  $t$  时刻可转移负荷的实际功率;  $P_{\text{shift,max}}$  和  $P_{\text{shift,min}}$  分别为可转移负荷需求的上下限;  $[\alpha_{\text{shift}}, \beta_{\text{shift}}]$  为可转移负荷的可调度时段;  $E_{\text{shift}}$  为可转移负荷的总用电需求。

### 3) 可中断负荷

把在使用过程中功率大小可调节、但使用时段固定的一类负荷定义为可中断负荷, 例如空调, 此类负荷在一定范围内调节, 只需要满足式(11)约束。

$$-P_{\text{inter,max}} \leq P_{\text{inter}} \leq -P_{\text{inter,min}} \quad (11)$$

式中,  $P_{\text{inter,max}}$  和  $P_{\text{inter,min}}$  分别为可中断负荷需求的上下限。

### 4) 基础负荷

用户负荷中出力时段和大小都固定的那部分为基础负荷, 记作  $P_{\text{basic}}$ , 例如冰箱, 此部分负荷不参与调度。

#### 1.2.4 储能

储能的收益函数  $C_{\text{ES}}$  由供电收益或充电成本以及维修成本组成, 定义如式(12)所示。

$$C_{\text{ES}} = \rho P_{\text{ES}} \Delta t - r_{\text{ES}} |P_{\text{ES}}| \Delta t \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{ES}}$  为储能的充放电功率;  $r_{\text{ES}}$  为储能的单位维修成本系数。

储能荷电状态随其充放电功率的变化过程如式(13)所示。

$$S_{\text{soc}}(t+1) = \begin{cases} (1-\delta)S_{\text{soc}}(t) - \frac{P_{\text{ES}}(t)\eta_c}{E_{\text{ES}}}, & P_{\text{ES}}(t) \leq 0 \\ (1-\delta)S_{\text{soc}}(t) - \frac{P_{\text{ES}}(t)}{E_{\text{ES}}\eta_d}, & P_{\text{ES}}(t) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $S_{\text{soc}}(t)$  为储能能在  $t$  时刻的荷电状态;  $\delta$  为储能的自放电率, 一般很小, 但不可忽略;  $E_{\text{ES}}$  为储能

的额定容量;  $P_{\text{ES}}(t)$  为  $t$  时刻储能的充电或放电功率, 当  $P_{\text{ES}}(t) \leq 0$  时表示储能充电, 当  $P_{\text{ES}}(t) > 0$  时表示储能放电;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为储能的充放电效率。

另外, 为防止储能的过充过放, 延长其寿命, 设置其荷电状态的上下限约束以及最大充放电功率, 如式(14)和式(15)所示。

$$0.4 \leq S_{\text{soc}}(t) \leq 0.9 \quad (14)$$

$$-20\%\eta_d E_{\text{ES}} \leq P_{\text{ES}}(t) \leq 20\% \frac{E_{\text{ES}}}{\eta_c} \quad (15)$$

## 2 博弈机制

### 2.1 理论基础

博弈论主要用于研究两个及以上利益相关的决策主体如何通过优化自身决策从而使得自身利益以及全局利益最大化, 其中非合作博弈应用相对广泛。势博弈作为非合作博弈的重要分支, 可分为有序、加权、完全和广义有序势博弈 4 类, 其中完全势博弈应用更加广泛, 包含局中人、收益函数和策略空间三要素。在完全势博弈基础上, 于博弈环境中引入辅助分布式决策的状态空间, 拓展为状态势博弈。状态势博弈包含如下博弈要素:

- 1) 局中人集合  $N$ , 包括所有参与博弈的主体;
- 2) 状态空间集  $X$ , 包括各局中人的策略变量和越限估计量;
- 3) 行动集, 对任意局中人和状态  $x \in X$ , 均有状态相关行动集  $A_i(x)$ ;
- 4) 效益函数, 对任意局中人  $i \in N$ , 状态  $x \in X$  和联合行动集  $a \in A(x) = \prod_{i \in N} A_i(x)$ , 均有状态相关效益函数  $J_i(x, a)$ ;
- 5) 状态转移函数  $f(x, a) \in X$ , 其中,  $x \in X$ ,  $a \in A(x)$ 。

定义 1 具有空行动集 ( $a=0$ ) 的(确定型)状态博弈称作(确定型)状态势博弈, 即存在一个全局势函数  $\Phi: X \times A(x) \rightarrow \mathbb{R}$ , 对任意的  $x \in X$ , 满足以下特性:

- 1) 对任意局中人  $i \in N$ 、行动集  $a \in A(x)$  和  $a'_i \in A_i(x)$ , 均满足式(16)。

$$J_i(x, a'_i, a_{-i}) - J_i(x, a) = \Phi(x, a'_i, a_{-i}) - \Phi(x, a) \quad (16)$$

式中,  $a_{-i}$  表示除局中人  $i$  以外其他局中人的行动变量的集合。此特性要求任意局中人效益函数值的增量和全局势函数的增量完全相等。

- 2) 对任意行动集  $a \in A(x)$  和继发状态  $\vec{x} = f(x, a)$ , 全局势函数  $\Phi$  满足式(17)。

$$\Phi(x, a) = \Phi(\vec{x}, 0) \quad (17)$$

此特性描述了全局势函数沿状态轨迹的变化特性。

定义2 若状态动作 $(x^*, a^*)$ 为静态纳什均衡, 则:

- 1) 在 $x = x^*$ 下, 对任意局中人 $i \in N$ , 均有 $a_i^* \in \arg \min_{a_i \in A_i(x^*)} J_i(x^*, a_i, a_{-i}^*)$ , 其中 $a_{-i}^*$ 表示除局中人 $i$ 以外其他局中人在纳什均衡处的动作变量集合;
- 2) 状态点 $x^*$ 是状态转移函数的一个固定点, 即 $x^* = f(x^*, a^*)$ 。

另外, 状态势博弈属性如下:

- 1) 状态势博弈的全局势函数收敛至最优时, 各局中人的效益函数也收敛至最优。
- 2) 有限序数状态势博弈具有有限改进特性。
- 3) 有限序数状态势博弈具有纯策略的均衡解。

上述3条属性表明, 基于状态势博弈建立的博弈模型纳什均衡必然存在, 因而后续只需要证明所建模型为状态势博弈即可。同时属性1)表明在状态势博弈机制中充分协调各主体利益, 最终实现了全局利益和个体利益的统一。

## 2.2 博弈机制设计

### 2.2.1 问题描述

本文以微电网供给侧和需求侧各单元作为局中人, 建立微电网的状态势博弈模型, 其中收益函数对应各局中人的利益最大化或者成本最小化、各局中人的收益/成本函数用 $C_i$ 表示; 同时要保证微电网系统实时功率平衡约束即全局约束。因此, 本文所研究的分布式微电网能量管理优化问题可表示为

$$\begin{cases} \max_{P_i} \sum_{i \in N} C_i \\ \text{s.t.} \sum_{i \in N} P_i = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_i$ 表示局中人 $i$ 输出或消耗的功率。

### 2.2.2 局中人

将微电网供给侧和需求侧各单元抽象为具有感知其他单元状态和追求自身利益最大化能力的可自主决策自身需求和出力的主体, 将其映射为状态势博弈的局中人, 表示为 $N = \{n_{RE}, n_{UG}, n_{ES}, n_L\}$ , 其中 $n_{RE}$ 、 $n_{UG}$ 、 $n_{ES}$ 、 $n_L$ 分别表示可再生能源局中人、上级电网局中人、储能局中人和用户负荷局中人。各柔性负荷可作为虚拟储能, 和微电网内其他主体协调运行, 参与微电网的能量管理。

### 2.2.3 状态空间

对于微电网内任意局中人 $i \in N$ , 其状态变量包括策略变量 $P_i$ 和越限估计量 $\{\bar{e}_i, \underline{e}_i\}$ 。

#### 1) 策略变量

策略变量 $P_i$ 为局中人 $i$ 的出力情况, 在满足全

局功率平衡约束的同时还应满足自身本地约束条件, 如式(19)所示。

$$P_i \in P_{LC,i} \quad (19)$$

式中,  $P_{LC,i}$ 为各局中人 $i$ 功率变量的策略集。

#### 2) 越限估计量

针对策略型博弈而言, 难点之一在于如何处理系统中的耦合约束条件即全局功率平衡约束。基于此, 状态势博弈在势博弈基础上引入状态空间用以处理上述难题。将全局功率平衡等式约束等效为两不等式约束, 然后引入上、下越限估计量 $\{\bar{e}_i, \underline{e}_i\}$ 量化两不等式的逾越程度, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i \in N} P_i \geq 0 \\ \sum_{i \in N} P_i \leq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{e}_i \sim \sum_{i \in N} P_i - 0 \\ \underline{e}_i \sim 0 - \sum_{i \in N} P_i \end{cases} \quad (20)$$

由此, 将全局约束转换成对各局中人的越限估计量本地约束。

$$\begin{cases} \bar{e}_i = 0, i \in N \\ \underline{e}_i = 0, i \in N \end{cases} \quad (21)$$

### 2.2.4 行动变量

行动变量体现各局中人和其他局中人的通信交互情况以及对自身策略变量的修正情况, 各局中人的行动集 $a_i$ 表示为

$$a_i = \{\hat{P}_i, \hat{e}_{i \rightarrow j}, \hat{\underline{e}}_{i \rightarrow j}\} \quad (22)$$

式中:  $\hat{P}_i$ 为局中人 $i$ 的功率变量 $P_i$ 的修正量;  $j \in N_{-i}$ ,  $N_{-i}$ 表示除局中人 $i$ 以外其他局中人的集合, 即为邻域;  $\hat{e}_{i \rightarrow j}$ 、 $\hat{\underline{e}}_{i \rightarrow j}$ 分别表示局中人 $i$ 传递给局中人 $j$ 的关于两不等式约束的估计, 其将改变局中人的上、下越限估计量。

本文采用如式(23)所示梯度下降法得到行动变量的表达式, 如式(24)所示。

$$a_i(t) = \varepsilon \frac{\partial J_i(x(t), a)}{\partial a_i} \Big|_{x=x(t)} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \hat{P}_i = \varepsilon (C'_i(P_i) - 2\mu[\max(0, \bar{e}_i) + \max(0, \underline{e}_i)]) \\ \hat{e}_{i \rightarrow j} = \varepsilon \cdot 2\mu[\max(0, \bar{e}_i) - \max(0, \bar{e}_j)] \\ \hat{\underline{e}}_{i \rightarrow j} = \varepsilon \cdot 2\mu[\max(0, \underline{e}_i) - \max(0, \underline{e}_j)] \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\varepsilon$ 为迭代步长;  $\mu$ 为罚因子;  $C'_i(P_i)$ 为局中人 $i$ 收益/成本函数关于 $P_i$ 的导函数。

### 2.2.5 转移函数

局中人 $i$ 的继发状态 $\vec{x}$ 包括修正后的策略变量 $\vec{P}_i$ 和修正后的越限估计量 $\{\vec{e}_i, \vec{\underline{e}}_i\}$ 。转移函数如式(25)所示, 该式描述了继发状态和前一状态的关系,

局中人由此更新自身的状态空间, 推进自身及其他局中人的优化。

$$\begin{cases} \vec{P}_i = P_i + \hat{P}_i \\ \vec{e}_i = \bar{e}_i + \hat{P}_i + \sum_{j \in N_{-i}} \hat{e}_{j \rightarrow i} - \sum_{j \in N_{-i}} \hat{e}_{i \rightarrow j} \\ \underline{e}_i = \underline{e}_i - \hat{P}_i + \sum_{j \in N_{-i}} \underline{e}_{j \rightarrow i} - \sum_{j \in N_{-i}} \underline{e}_{i \rightarrow j} \end{cases} \quad (25)$$

### 2.2.6 效益函数

为使系统内全局利益与个体利益达到统一, 采用添加外罚函数的方式处理全局约束, 即把罚函数添加到各局中人的收益函数中去。值得注意的是, 状态势博弈中全局约束已经转化为针对各局中人越限估计量的本地约束, 因此在构造罚函数的时候, 各局中人罚函数由自身越限估计量体现。局中人  $i$  的效益函数  $J_i(x, a)$  及全局势函数  $\Phi(x, a)$  表达如式(26)所示。

$$\begin{cases} J_i(x, a) = C_i - \mu([\max(0, \bar{e}_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}_i)]^2) \\ \Phi(x, a) = \sum_{i \in N} C_i - \mu \sum_{i \in N} [\max(0, \bar{e}_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}_i)]^2 \end{cases} \quad (26)$$

### 2.2.7 纳什均衡存在证明

全局势函数的增量  $\Delta\Phi$  如式(27)所示。

$$\Delta\Phi = \Phi(a'_i, a_{-i}) - \Phi(a_i, a_{-i}) =$$

$$\begin{aligned} & C'_i - \mu([\max(0, \bar{e}'_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}'_i)]^2) + \\ & \sum_{j, j \in N_{-i}} C_j - \mu \sum_{j, j \in N_{-i}} [\max(0, \bar{e}_j)]^2 + [\max(0, \underline{e}_j)]^2 - \\ & \{C_i - \mu([\max(0, \bar{e}_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}_i)]^2) + \\ & \sum_{j, j \in N_{-i}} C_j - \mu \sum_{j, j \in N_{-i}} [\max(0, \bar{e}_j)]^2 + [\max(0, \underline{e}_j)]^2\} = \\ & C'_i - \mu([\max(0, \bar{e}'_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}'_i)]^2) - \\ & \{C_i - \mu([\max(0, \bar{e}_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}_i)]^2)\} \end{aligned} \quad (27)$$

式中:  $a'_i$  为区别于  $a_i$  的行动变量;  $C'_i$  为局中人  $i$  在行动变量为  $a'_i$  时对应的局中人  $i$  的收益函数。

局中人  $i$  效益函数的增量  $\Delta J$  如式(28)所示。

$$\Delta J = J_i(a'_i, a_{-i}) - J_i(a_i, a_{-i}) =$$

$$\begin{aligned} & C'_i - \mu([\max(0, \bar{e}'_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}'_i)]^2) - \\ & \{C_i - \mu([\max(0, \bar{e}_i)]^2 + [\max(0, \underline{e}_i)]^2)\} \end{aligned} \quad (28)$$

由此可得,  $\Delta J = \Delta\Phi$ , 单个局中人因自身策略偏差而产生的效益函数变化量和导致的全局势函数变化量完全相同, 以上根据定义 1 证明了该博弈为状态势博弈, 具备状态势博弈的全部属性。综上, 本文建立的模型纳什均衡一定存在。

## 3 优化流程分析

状态势博弈作为势博弈的拓展, 也是一种非合作博弈, 它保留了势博弈独特的定义和有限改进属性。分析微电网各主体的特性, 可见可平移负荷和可转移负荷的约束不只包含各时刻内的上下限约束, 还包括周期性功率约束, 如式(8)和式(10)所示, 状态势博弈过程难以处理此类约束。因此, 本文在状态势博弈外层引入遗传算法来处理此类约束, 本文整体优化流程如下。

1) 遗传算法的参数设置和种群初始化: 设置种群数量  $m$ 、迭代次数  $K$ 、交叉率等基础数据; 种群个体为一个满足可平移负荷和可转移负荷约束的负荷出力方案; 为提高供给侧收益、降低用户需求侧的成本以实现微电网经济性能量管理, 适应度函数设置为各主体经济收益(+)和成本(-)的代数和。

2) 开始进化: 初始种群即父代经交叉变异产生新的个体即子代, 在不同可平移负荷和可转移负荷的方案下分别进行博弈, 得到微网内其他主体的出力情况, 选择适应度函数值即微电网系统总收益前  $m$  的几个方案作为下一次迭代的父代。

3) 新的父代经交叉变异得到下一子代, 继续博弈种群内所有个体方案, 重复步骤 2), 直到完成 200 次迭代。

在博弈过程中, 各主体以平等的地位进行具有隐私性的决策, 状态势博弈指导遗传算法的搜索方向。博弈部分优化流程如下。

1) 初始化状态空间, 设置博弈开始时各局中人决策变量、越限估计量和其他初始化参数, 设定收敛条件。

2) 基于梯度下降法制定的决策变量修正规则来更新各局中人的决策变量。

3) 基于决策变量, 根据状态转移函数更新各局中人的状态空间模型。

4) 通过各局中人的效益函数模型判断各局中人更新后的状态空间模型是否达到纳什均衡, 若各局中人更新后的状态空间模型达到纳什均衡, 则执行下一步; 否则重复步骤继续更新决策变量、状态空间直至达到纳什均衡。

5) 判断微电网的总功率是否达到平衡, 若微电网的总功率达到平衡, 则执行下一时刻的博弈; 否则增大罚因子, 继续更新决策变量和状态空间直至功率达到平衡。至此, 此时刻的博弈结束。

6) 进入下一时刻, 重复博弈部分 1)~5) 的步骤, 直至整个调度周期结束。至此, 完成一次完整的微电网能量管理。

优化流程如图 2 所示。

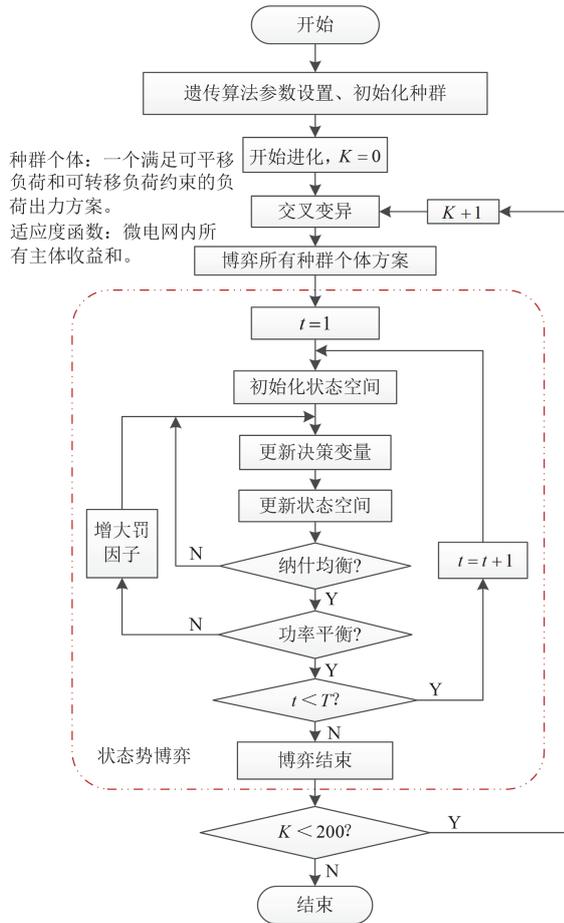


图 2 优化流程图

Fig. 2 Flow chart of optimization

## 4 算例仿真及分析

### 4.1 场景描述

本文采用的微电网系统结构如图 1 所示，由可再生能源机组、储能设备和各种用户负荷组成，通过公共连接点和上级电网相连。为验证本文所提能量管理优化方法的可行性，本文以某局域微电网为研究对象，进行周期为 24 h 的日前优化。本文充分考虑可再生能源出力及需求侧灵活性资源，用户柔性负荷以可自主决策主体的身份参与微电网能量管理。其中，微电网用户负荷中基础负荷为用户在各时段固定使用的电量，此部分为不可调节负荷。可再生能源发电机组和用户负荷的预测以及各柔性负荷原计划出力情况如图 3 所示，可以看出 04:00—07:00 和 09:00—14:00 时段可再生能源出力富余，若不进行优化，此时段多余的可再生能源资源将会浪费；16:00—24:00 和 00:00—03:00 时段可再生能源出力不足以满足用户负荷需求，若不进行优化，

此时段用户的用电需求将无法得到满足。

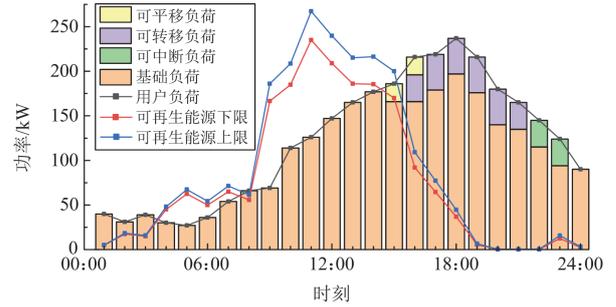


图 3 可再生能源及用户负荷预测

Fig. 3 Renewable energy and user load forecasting

本文充分考虑需求侧灵活性资源，根据用户负荷需求的实际情况，将柔性负荷划分为可中断负荷、可转移负荷和可平移负荷，各柔性负荷根据用户的调度意愿选择出力时段及用电量。柔性负荷相关参数见表 1。实际储能参数见表 2。微电网内各设备维护成本是微电网运营中不可忽视的一部分，设备维护成本系数见表 3。

表 1 柔性负荷相关参数

Table 1 Flexible load relevant parameters

柔性负荷类型	原计划出力时段	原计划出力功率/kW	调度时段	不舒适度成本系数
可转移	16:00—21:00	(30,40,40,40,40,30)	10:00—23:00	0.015
	15:00—16:00	(20,20)	09:00—16:00	
可中断	22:00—23:00	(30,30)	22:00—23:00	0.010

表 2 实际储能参数

Table 2 Actual energy storage parameters

参数	数值
额定容量/kW	800
自放电效率/%	0.01
充电效率/%	90
放电效率/%	90

表 3 设备维护成本系数

Table 3 Equipment maintenance cost coefficients

设备类型	维护成本系数/(元/kWh)
可再生能源机组	0.0300
实际储能	0.1832

### 4.2 优化结果分析

本文仿真在 Matlab R2018b 编程环境下进行。通过实验仿真，外层遗传算法部分进化曲线如图 4 所示，可以看出在经过 25 次迭代之后，遗传算法部分适应度函数值不再增加，整体优化达到收敛。

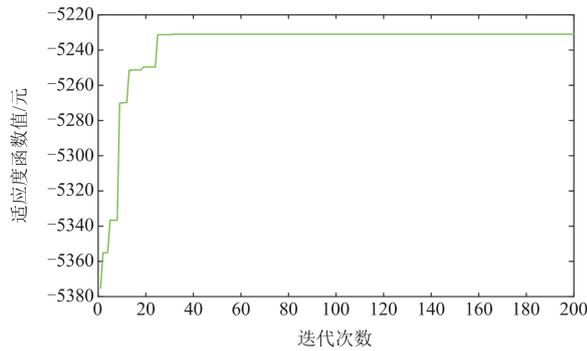


图4 进化曲线

Fig. 4 Evolutionary curve

各局中人博弈优化出力情况如图5所示。整体上04:00—13:00时段可再生能源的出力富余,基本可满足用户的负荷需求;04:00—07:00时段和09:00—12:00时段可再生能源供给用户负荷消耗后还有剩余,储能将此剩余部分进行存储,此时段储能处于充电状态;01:00—03:00、14:00—24:00时段可再生能源出力不足以满足用户需求,其中储能在14:00—18:00时段释放电量,当储能电量耗尽时即18:00—24:00、01:00—03:00时段向上级电网购电来满足用户负荷需求。在整个优化过程中,上级电网充当备用电源,仅在风光不足且储能电量无法满足负荷需求时出力,由此减少微电网与上级电网的交互。

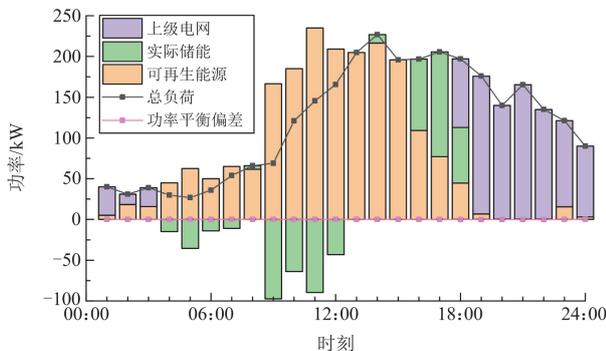


图5 各局中人博弈优化出力情况

Fig. 5 Optimal power of every unit through game

微电网内实际储能的荷电状态变化情况如图6所示。储能存储04:00—07:00、09:00—12:00时段可再生能源出力富余的电能,供08:00以及14:00—18:00时段可再生能源出力不足时段优先使用,减少了可再生能源的弃风光量,同时其荷电状态始终保持在0.4~0.9之间,说明本文所提优化方法有效防止了储能的过充过放。上述结果分析充分表明了本文所提方法的可行性。

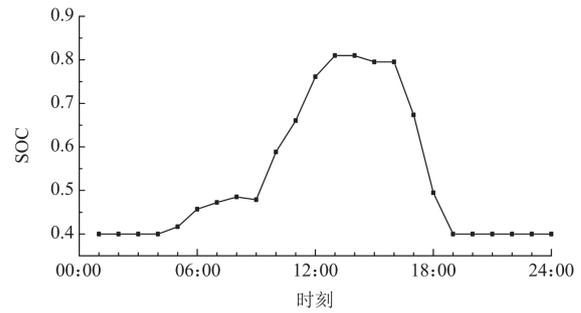


图6 储能设备荷电状态

Fig. 6 State of charge of the energy storage

可再生能源的消纳情况如图7所示,可以看到在04:00—07:00、09:00—15:00时段有少部分可再生能源资源仍被浪费,此处做如下说明:状态势博弈理论上可以实现可再生能源的完全消纳,前提是需要具备容量足够大的储能设备,考虑到大容量储能的装机成本会更大,直接让这小部分的可再生能源资源浪费损失的收益比配备更大容量储能的成本要更小,且大容量储能闲置率较高,因而本文不再额外增加微电网内储能设备容量。本文在储能容量固定的基础上最大限度地提高了可再生能源的消纳水平,弃风光量仅为139.14 kW,可再生能源消纳率高达93.48%。

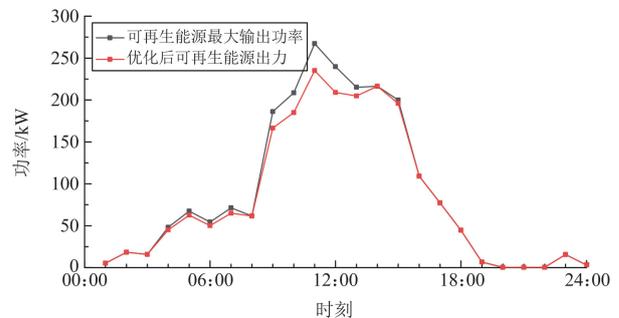


图7 可再生能源消纳情况

Fig. 7 Consumption of renewable energy

优化前后用户负荷对比如图8所示,可以看到优化后10:00—15:00时段用户负荷需求增加,16:00—23:00时段用户负荷需求减少。微电网内实时电价分3个梯度,其中15:00—22:00为高电价时段,优化后高电价时段的负荷需求有所降低,中电价时段负荷需求相对提高,在一定程度上减少了用户的用电成本。本文的用户负荷由不可调节的基础负荷和具有一定灵活性的柔性负荷组成。本文所提的优化方法在电价激励下,柔性负荷完成了从高电价时段向偏低电价时段的转移,用户一天的用电成本降低了202.24元,有效降低了用电成本。

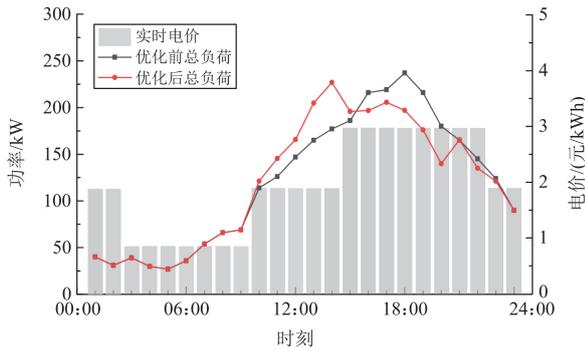


图 8 优化前后用户负荷对比

Fig. 8 Comparison of user load before and after optimization

柔性负荷虚拟“充放电”情况如图 9 所示: 1) 可平移负荷平移至 13:00—14:00 时段, 此时段吸收正功率, 相当于充电; 原时段 15:00—16:00 吸收负功率, 相当于放电。2) 可中断负荷原时段 22:00—23:00 吸收负功率, 相当于放电。3) 可转移负荷部分转移至 10:00—16:00 时段及 23:00, 此时段吸收正功率, 相当于充电; 17:00—20:00 时段吸收负功率, 相当于放电。从整体上看柔性负荷在电价偏低时段吸收正功率, 呈现充电特性; 高电价时段吸收负功率, 呈现放电特性。综上, 各柔性负荷虚拟地完成了储能“充放电”的功能。

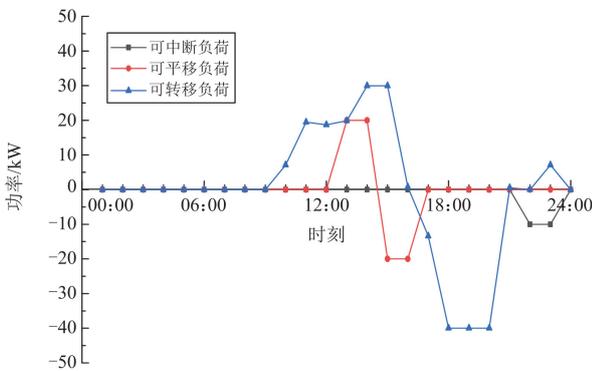


图 9 柔性负荷虚拟“充放电”情况

Fig. 9 Virtual charging and discharging of flexible loads

### 4.3 优越性分析

#### 4.3.1 平等性

在完全势博弈中, 各局中人按照提前制定好的先后顺序进行优化。为保证需求侧舒适度和可再生能源利用率, 通常考虑以下两种优化顺序: ① 可再生能源→用户负荷→储能→上级电网; ② 用户负荷→可再生能源→储能→上级电网。完全势博弈根据以上两种顺序进行优化的结果如表 4 所示, 可再生能源优先时, 其风光收益高于用户负荷优先时,

相应的弃风光量更少, 向上级电网的购电费用更低, 因此顺序①优于顺序②。设置优化顺序的行为将影响处于优化后端个体参与调度的积极性, 而本文所提优化方法不需要设置局中人优化顺序, 体现了各主体的平等地位。

表 4 基于不同方法的优化结果对比  
Table 4 Comparison of optimization results based on different methods

优化方法	风光收益/元	弃风光量/kW	购电费用/元
完全势博弈顺序①	3418.00	336.52	3000.42
完全势博弈顺序②	2990.78	587.80	3345.12
状态势博弈	3692.28	139.14	2530.27
改进粒子群算法	3274.50	386.81	2985.78

#### 4.3.2 经济性

采用不同方法的优化结果如表 4 所示。本文所提方法与完全势博弈方法(顺序①)相比, 弃风光量减少了 197.38 kW, 降幅达 58.65%, 可再生能源消纳率提升了 9.26%; 风光收益增加了 274.28 元, 增幅为 8.02%; 购电费用减少了 470.15 元, 降幅为 15.67%。本文所提方法与改进粒子群算法相比, 弃风光量减少了 247.67 kW, 降幅达 64.03%, 可再生能源消纳率提升了 11.61%; 风光收益增加了 417.78 元, 增幅为 12.76%; 购电费用减少了 455.51 元, 降幅为 15.26%。由此验证了本文所提方法在促进可再生能源消纳及提升微电网的经济性上具有更优的效果。

#### 4.3.3 隐私性

本文已将全局功率约束转换成对各局中人的越限估计量本地约束, 即式(21)。在状态势博弈中, 以各局中人的上、下越限估计量为通信量, 各时刻根据制定的状态势博弈机制进行优化, 表 5 展示了在 24:00 博弈过程中各局中人的上、下越限估计量, 各上、下越限估计量即通信量极小(趋近于 0), 由此实现了各局中人之间的隐私保护。

表 5 各局中于人于 24:00 的越限估计量

Table 5 Over-limit estimators for each unit at 24:00

局中人	上越限估计量/kW	下越限估计量/kW
可再生能源	0.001 770 379	0.005 313 371
储能	0.001 770 385	-0.028 555 78
用户负荷	0.001 770 379	0.005 313 371
上级电网	-0.018 179 318	0.010 554 128

## 5 结论

本文基于状态势博弈理论, 构建了一个考虑用户灵活性资源的微电网能量管理模型, 在满足自身约束以及功率平衡约束的基础上, 以微电网内各主体最大经济性为目标进行优化, 实现了各主体的平

等性,且有效地保护了各主体间的隐私,具有较强的实际应用价值。根据算例仿真结果,可得到以下结论。

1) 本文所提基于状态势博弈的能量管理优化方法,不需要制定局中人优先次序,各主体具有平等的地位,同时利用动作变量更新各局中人的状态空间,实现各主体间通信量的极小化,最大限度地实现了隐私保护。

2) 柔性负荷作为需求侧的灵活性资源,在优化过程中具有储能的“充放电”功能,参与微电网的能量管理具有和实际储能一样的功能,能够有效地提高可再生能源的消纳水平,减少弃风光量。

3) 微电网内部的分时电价机制激励用户减少高电价时段的用电量,转移到电价偏低时段用电,降低了用户用电成本,实现了微电网的经济性优化调度。

本文所提方法有效提升了可再生能源的消纳水平,对优化我国能源结构、推动能源绿色低碳转型具有重要的理论意义和实践价值。本文局限于单微电网内部优化,由于单微电网调节程度有限,少部分富余风光仍未得到完全消纳,未来的研究将充分利用多微电网之间的互补优势,达到经济效益以及可再生能源消纳的最大化。

## 参考文献

- [1] 王成山,王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.  
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [2] KESAVAN P K, SUBRAMANIAM U, ALMAKHLES D J, et al. Modelling and coordinated control of grid connected photovoltaic, wind turbine driven PMSG, and energy storage device for a hybrid DC/AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 154-167.
- [3] 张丹,王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458.  
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451-458.
- [4] BATTULA A R, VUDDANTI S, SALKUTI S R. Review of energy management system approaches in microgrids[J]. Energies, 2021, 14(17): 5459.
- [5] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3077-3093.  
SANG Bo, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Energy management system research of multi-microgrid: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3077-3093.
- [6] 闫梦阳,李华强,王俊翔,等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.  
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [7] KHEIRKHAH A R, ALMEIDA C F M, KAGAN N, et al. Optimal probabilistic allocation of photovoltaic distributed generation: proposing a scenario-based stochastic programming model[J]. Energies, 2023, 16(21): 7261.
- [8] SIDDIIQUE A B, GABBAR H A. Adaptive mixed-integer linear programming-based energy management system of fast charging station with nuclear-renewable hybrid energy system[J]. Energies, 2023, 16(2): 685.
- [9] TORKAN R, ILINCA A, GHORBANZADH M. A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids[J]. Renewable Energy, 2022, 197: 852-863.
- [10] 于飞,葛思伟,李梅航,等. 工业园区微网调度研究与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 179-187.  
YU Fei, GE Siwei, LI Meihang, et al. Research on and simulation of microgrid scheduling in an industrial park[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 179-187.
- [11] 刘惕乾. 基于电价激励的社区微电网优化调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.  
LIU Tiqian. Research on optimal dispatching of community microgrid based on electricity price incentive[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [12] 刘晓峰,高丙团,李扬. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2704-2711.  
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711.
- [13] 田海东,何山,艾纯玉,等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 29-41.  
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 29-41.
- [14] 邱明石,陈俊儒,刘牧阳,等. 考虑纳网系统和微网运营商电价机制的主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统

- 保护与控制, 2024, 52(19): 15-34.
- QIU Mingshi, CHEN Junru, LIU Muyang, et al. A master-slave game optimization scheduling strategy considering the electricity pricing mechanism of nanogrid systems and microgrid operators[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 15-34.
- [15] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
- ZHAO Min, SHEN Chen, LIU Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [16] MONDERER D, SHAPLEY L S. Potential games[J]. Games and Economic Behavior, 1996, 14(1): 124-143.
- [17] 曾君, 王侨侨, 刘俊峰, 等. 一种基于势博弈的微电网分布式运行优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7024-7433.
- ZENG Jun, WANG Qiaoqiao, LIU Junfeng, et al. An operation optimization algorithm of microgrid based on potential game[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7024-7433.
- [18] LIU W, XU H, WANG X C, et al. Optimal dispatch strategy of virtual power plants using potential game theory[J]. Energy Report, 2022, 8: 1069-1079.
- [19] 王侨侨, 曾君, 刘俊峰, 等. 面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1421-1432.
- WANG Qiaoqiao, ZENG Jun, LIU Junfeng, et al. A distributed multi-objective optimization algorithm for resource-storage-load interaction of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1421-1432.
- [20] 刘俊峰, 罗燕, 侯媛媛, 等. 考虑广义储能的微电网主动能量管理优化算法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 245-255.
- LIU Junfeng, LUO Yan, HOU Yuanyuan, et al. Research on optimization algorithm of active microgrid energy management considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 245-255.
- [21] MARDEN J R. State based on potential games[J]. Automatic, 2012, 48(12): 3075-3088.
- [22] 曾君, 胡家健, 徐铭康, 等. 储能汇聚参与辅助调频服务的协同优化算法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1051-1060.
- ZENG Jun, HU Jiajian, XU Mingkang, et al. Collaborative optimization algorithm for aggregating energy storage in frequency modulation service[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(7): 1051-1060.
- [23] 梁易乐, 刘锋, 梅生伟. 基于状态势博弈的电力系统分布式经济调度方法[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(3): 413-425.
- LIANG Yile, LIU Feng, MEI Shengwei. A state-based potential game approach for distributed economic dispatch[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(3): 413-425.
- [24] LIU X F, TANG D F, HE Q M. A state-based potential game-theoretic approach for massive residential consumers participating in demand response[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 1193-1203.
- [25] LI B, OUYANG W N, WANG T L, et al. Optimal regulation of source-grid-load-storage interaction based on state based potential game[C]// 2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), December 23-25, 2022, Guangzhou, China: 607-612.

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-11-03

作者简介:

曾君(1979—), 女, 博士, 教授, 研究方向为微电网能量管理及优化、可再生能源发电系统中的电力电子及控制技术; E-mail: junzeng@scut.edu.cn

谭豪杰(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网能量管理及优化; E-mail: 2273224822@qq.com

刘俊峰(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为高频微电网关键技术、电力电子及其控制技术。E-mail: aujfliu@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)