

# 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略

冯昌森<sup>1</sup>,沈佳静<sup>1</sup>,赵崇娟<sup>2</sup>,柳昂<sup>3</sup>,文福拴<sup>4</sup>,张有兵<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023;2. 湖州电力设计院有限公司,浙江 湖州 313000;  
3. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司,浙江 湖州 313099;4. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310007)

**摘要:**智慧能源是我国能源侧改革的重心之一,而智慧能源社区是整合大规模产消者的用户级智慧能源系统。在此背景下,提出了一种基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略,能够有效激励智慧能源社区内个体参与者与社区整体协同运行。在计及可再生能源出力不确定性的基础上,建立了智慧能源社区合作博弈模型,并设计了适用于大量参与者的合作博弈模型收益分配方案,显著提高了模型的计算效率和可扩展性。对智慧能源社区算例进行仿真分析,结果验证了所提模型可有效提高社区总收益,基于核仁的收益分配方案有效可行,在实现经济效益最大化的同时促进了可再生能源的就地消纳。

**关键词:**智慧能源社区;合作博弈;弹性负荷;产消者;收益分配;协同运行

**中图分类号:**TM 732;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202102035

## 0 引言

“十三五”以来,智慧能源系统的相关技术是我国能源行业发展的重要方向。基于这一背景,学术界围绕智慧能源社区SEC(Smart Energy Community)、虚拟电厂VPP(Virtual Power Plant)和需求侧能源系统等热点开展了广泛的研究。

智慧能源社区是以智能用户“产消者”为核心,采用信息-物理融合技术搭建能源网络的电力产供销一体化系统<sup>[1]</sup>。虚拟电厂是通过先进信息通信技术和软件系统,实现各类分布式能源的聚合和协调优化,以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统<sup>[2]</sup>。文献[3-4]通过聚合分布式能源对公网稳定输电,在不改变电网结构的情况下产生了更高的社会效益,提高了电网服务效率。需求侧能源系统是通过对区域或用户能源的生产、传输、分配、转换、存储、消费等环节进行协同优化后所形成的能源产供销一体化系统<sup>[5]</sup>。文献[6-7]通过多种能源转换器实现了物理上的能源互联互通,将多种能源高度耦合,实现了能源资源利用率和能源循环效率的提升。相较于虚拟电厂和需求侧能源系统,智慧能源社区更加注重于用户用能结构优化、能源消费结构调整<sup>[8]</sup>等层面的研究。文献[9-10]以终端用户为单元,合理实施用户用能调度,平滑了社区能源负荷曲线的同时提升了电力系统的安全性。因此本文围绕能源社区这一具体对象,对其协同运行策略进行研究。

在智慧能源社区中,弹性负荷(如智能家电设

备、储能系统、电动汽车)是实现用户用能结构优化和提高能效的主要对象。文献[11]将可控负荷建模为可转换负荷、可削减负荷和可转移负荷3类,建立了这3类负荷模型,并将其应用于智慧能源社区的经济调度。文献[12]将负荷侧分为基本负荷、可转移负荷和可转换负荷,建立了以运行成本最小为目标的智慧能源社区热电耦合系统。文献[13]提出了一种基于弹性负荷分时调度的集中式微网能量管理策略,在多种应用场景下实现了对弹性负荷的调度。以上研究表明:负荷侧可控资源具有削峰填谷的能力,能够在一定程度上改善能源社区的负荷特性,并降低运行成本。但上述研究大多以社区整体收益最大或运行成本最低为优化目标,忽略了能源社区内个体的收益,从而无法有效地激励能源社区个体参与整体的协同运行。

为了协调智慧能源社区中产消者之间大量的竞争-合作的决策行为,现有研究主要围绕博弈理论进行分析。从广义上而言,博弈理论可以分为非合作博弈和合作博弈2种。文献[14]基于分布式能源互动交易机制,对能源互联园区中的不同利益主体建立主从博弈交易模型以协调和优化多个主体间的利益。与非合作博弈有所不同,合作博弈模型将多个主体聚合为一个联盟并对联盟效益进行分配,以达到对能源社区调度与控制的目的。文献[15]以可再生能源消纳最大化及园区自身利益最大为目标,建立了微电网群两阶段鲁棒优化模型,但其对联盟总收益的分配缺少定量分析。文献[16]基于合作博弈理论研究了风电场与抽水蓄能电站的联合报价策略,并提出了基于夏普利值和核仁的效益分配方案。文献[17]基于合作博弈理论建立了智慧能源社区的能源管理模型,但没有考虑弹性负荷和可再生能源出力的不确定性,导致该模型的适用性较差。现有

收稿日期:2020-05-26;修回日期:2020-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777193)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777193)

研究将合作博弈理论应用到微电网的协同运行或发电厂的联合报价策略等领域,建模方面主要有以下2点需要完善:①缺少有效考虑可再生能源不确定性的模型,现有研究大多采用场景法建立不确定性模型,但基于场景法的模型的求解计算量较大;②联盟效益的分配策略有待进一步完善,联盟分配策略一般采用核仁法和夏普利值法实现,但对于含有大量参与者的联盟而言,利用核仁法求解的复杂度呈指数增长,夏普利值法虽然可高效快速求解,但其对非凸博弈模型不适用。

基于上述研究的不足,本文提出了一种基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略,用概率密度函数模拟可再生能源出力的不确定性,并将收益函数的期望作为博弈模型的目标函数,通过分段线性函数近似模拟目标函数的解析式,有效避免了场景法所带来的大量计算过程。在严格证明目标函数为凹函数的基础上,直接求得博弈模型的最优策略。然后,基于核仁的概念,针对含有大量参与者的合作博弈模型,提出了高效快速的收益分配方案,有效避免了传统核仁法存在的求解复杂这一问题,提高了模型的可扩展性。最后,通过算例验证了所提模型的合理性和有效性。

## 1 智慧能源社区模型

### 1.1 能量双向交易模型

本文所构建的智慧能源社区协同运行框架如图1所示,社区内所有用户节点均为产消者,每个产消者装备智能电表。图中, $n_p$ 为智慧能源社区中产消者的数量。为了实现社区与主网之间的功率互动,每个社区装备1台能量路由器<sup>[18]</sup>,对社区整体的能量流进行可靠的调度和控制。其中,产消者拥有的负荷侧可控设备主要包括弹性负荷、电动汽车和储能系统,分布式电源为可再生能源机组,且每个产消者都有相应的基础负荷。

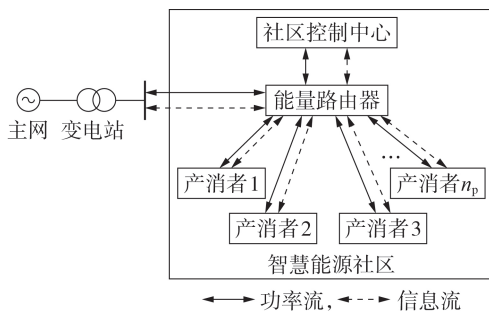


图1 智慧能源社区协同运行框架

Fig.1 Coordinated operation framework of SEC

社区控制中心是一个中立的第三方机构,代表社区内的所有家庭与上级电网进行双边能量交易。当能源社区的功率不足时,由其向上级电网购电;当

社区内部能量过剩时,由其向上级电网售电。基于上述双向交易机制,对社区内由任意数量产消者组成的联盟 $P'$ 而言,其收益函数 $J_t(e_{P'}, c_{P'})$ 包括联盟与电力公司购售电的净收益和用户的效用函数,可表示为:

$$J_t(e_{P'}, c_{P'}) = \lambda_E \left[ \sum_{i \in P'} e_{i,t} - \sum_{j \in P'} c_{j,t} \right]^+ - \lambda_C \left[ \sum_{i \in P'} c_{i,t} - \sum_{j \in P'} e_{j,t} \right]^+ + \sum_{m \in P_C^f} U_{m,t}^f(c_{m,t}^f) + \sum_{n \in P_C^{es}} U_{n,t}^{es}(c_{n,t}^{es}) \quad (1)$$

其中, $[z]^+ = \max\{z, 0\}$ ;  $e_{P'}, c_{P'}$ 分别为联盟 $P'$ 中可再生能源的输出功率、产消者的负荷功率;  $e_{i,t}$ 为时段 $t$ 产消者 $i$ 的可再生能源机组的输出功率;  $c_{j,t}$ 为时段 $t$ 产消者 $j$ 的负荷功率,且有 $c_{j,t} = c_{j,t}^b + c_{j,t}^f + c_{j,t}^{es} + c_{j,t}^{ev}$ ,  $c_{j,t}^b$ 为时段 $t$ 产消者 $j$ 的基础负荷功率,  $c_{j,t}^f$ 为时段 $t$ 产消者 $j$ 的弹性负荷功率,  $c_{j,t}^{es}$ 、 $c_{j,t}^{ev}$ 分别为产消者 $j$ 的储能系统和电动汽车在时段 $t$ 的充放电功率(取值为负表示放电,取值为正表示充电);  $U_{m,t}^f(c_{m,t}^f)$ 、 $U_{n,t}^{es}(c_{n,t}^{es})$ 分别为时段 $t$ 联盟中弹性负荷 $m$ 、储能系统 $n$ 的效用函数;  $P_C^f$ 、 $P_C^{es}$ 分别为联盟内的弹性负荷集合、储能系统集合;  $c_{m,t}^f$ 为时段 $t$ 弹性负荷 $m$ 的功率;  $c_{n,t}^{es}$ 为时段 $t$ 储能系统 $n$ 的功率;  $\lambda_E$ 、 $\lambda_C$ 分别为智慧能源社区与上级电网之间的售电电价、购电电价。由于可再生能源机组出力 $e_{i,t}$ 为不确定性变量,本文将效益函数的期望作为目标函数,如式(2)所示。

$$\psi(e_{P'}, c_{P'}) = \max \left\{ E \left[ \sum_{t \in T_T} J_t(e_{P'}, c_{P'}) \right] \right\} \quad (2)$$

其中, $E[\cdot]$ 为数学期望;  $T_T = \{1, 2, \dots, T\}$ 为优化时段集合,  $T$ 为优化时段总数。

### 1.2 可控设备模型

智慧能源社区中的可控设备包括弹性负荷、储能系统和电动汽车3类,分别对其进行建模。

#### 1.2.1 弹性负荷

对于任意弹性负荷 $m \in P_C^f$ ,其必须满足如下约束:

$$c_{m,t}^{\min} \leq c_{m,t}^f \leq c_{m,t}^{\max} \quad \forall t \in T_T \quad (3)$$

$$-R_m^D \leq c_{m,t}^f - c_{m,t-1}^f \leq R_m^U \quad \forall t \in T_T \setminus \{1\} \quad (4)$$

$$\Delta T \sum_{t \in T_T} c_{m,t}^f = E_m^f \quad (5)$$

其中, $c_{m,t}^{\min}$ 、 $c_{m,t}^{\max}$ 分别为时段 $t$ 弹性负荷 $m$ 的最小、最大功率;  $R_m^U$ 、 $R_m^D$ 分别为弹性负荷 $m$ 的爬坡功率、滑坡功率限制;  $\Delta T$ 为优化时段时间间隔,本文取值为1h;  $E_m^f$ 为弹性负荷 $m$ 在优化周期内的能耗约束。

弹性负荷的效用函数一般用单增的凹函数<sup>[19]</sup>模拟,其具体含义为:消费者总是期望消耗更多的电能直到达到最大的满意度,而消费者的满意度总是随着电能消耗的增加逐渐饱和,对应着一个递减的边际效益。因此,本文从线性递减的边际效益出发,

采用一个单增的二次函数对其进行模拟。在任意时段  $t \in T_T$ , 对于任意弹性负荷  $m \in P_C^f$ , 其效用函数可表示为:

$$U_{m,t}^f(c_{m,t}^f) = \begin{cases} \zeta_m c_{m,t}^f - v_m (c_{m,t}^f)^2 & 0 \leq c_{m,t}^f \leq \zeta_m / (2v_m) \\ \zeta_m^2 / (4v_m) & c_{m,t}^f > \zeta_m / (2v_m) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\zeta_m$ 、 $v_m$  分别为弹性负荷  $m$  效用函数的一次系数、二次系数, 且满足  $v_m > 0$ ,  $\zeta_m \geq 0$ ;  $\zeta_m^2 / (4v_m)$  为用户对弹性负荷  $m$  的最高用电效用。当弹性负荷  $m$  的功率在  $[0, \zeta_m / (2v_m)]$  范围内时, 用户的边际效用随着功率的增加而减少; 当弹性负荷  $m$  的功率大于  $\zeta_m / (2v_m)$  时, 弹性负荷  $m$  的效用将保持在  $\zeta_m^2 / (4v_m)$  这一水平。

部分产消者也可以提供中断负荷服务, 中断负荷模型也可以用式(3)和式(4)表示。

### 1.2.2 储能系统

对于任意储能系统  $n \in P_C^s$ , 其必须满足如下约束:

$$c_{n,t}^{s,dechmax} \leq c_{n,t}^{s,de} \leq c_{n,t}^{s,dechmin} \quad \forall t \in T_T \quad (7)$$

$$S_{n,t+1}^{es} = S_{n,t}^{es} + [c_{n,t}^{s,de} \eta_n^{ch} / E_n^{es} - [-c_{n,t}^{s,de}]^+ / (E_n^{es} \eta_n^{dech})] \quad \forall t \in T_T \setminus \{T\} \quad (8)$$

$$S_{min}^{es} \leq S_{n,t}^{es} \leq S_{max}^{es} \quad \forall t \in T_T \quad (9)$$

$$S_{n,0}^{es} = S_{n,T}^{es} \quad (10)$$

其中,  $c_{n,t}^{s,dechmax}$ 、 $c_{n,t}^{s,dechmin}$  分别为储能系统  $n$  的最大放电功率、最大充电功率;  $S_{n,t}^{es}$  为时段  $t$  储能系统  $n$  的荷电状态;  $S_{n,0}^{es}$ 、 $S_{n,T}^{es}$  分别为储能系统  $n$  的初始荷电状态、最终荷电状态;  $\eta_n^{ch}$ 、 $\eta_n^{dech}$  分别为储能系统  $n$  的充电效率、放电效率;  $S_{max}^{es}$ 、 $S_{min}^{es}$  分别为储能系统荷电状态的上、下限;  $E_n^{es}$  为储能系统  $n$  的额定容量。

储能系统经过多次充放电过程后会造自身的寿命损耗。因此, 本文定义其效用函数(收益函数)<sup>[17]</sup>为其寿命损耗成本, 如式(11)所示。

$$U_{n,t}^s(c_{n,t}^{s,de}) = -\lambda_d |c_{n,t}^{s,de}| \quad (11)$$

其中,  $\lambda_d \geq 0$  为储能系统的单位寿命损耗成本。显然, 储能系统的寿命损耗成本函数为凹函数。

### 1.2.3 电动汽车

假设社区内的电动汽车集合为  $P_C^{ev}$ 。对于能源社区内的任意电动汽车  $q \in P_C^{ev}$ , 其动态充放电模型可描述<sup>[14]</sup>为:

$$S_{q,t+1}^{ev} = S_{q,t}^{ev} + [c_{q,t}^{ev} \eta_q^{ech} / E_q^{ev} - [-c_{q,t}^{ev}]^+ / (E_q^{ev} \eta_q^{edch})] \quad \forall t \in T^{ev} \setminus \{t_q^{dep}\} \quad (12)$$

其中,  $c_{q,t}^{ev}$  为时段  $t$  电动汽车  $q$  的功率;  $T^{ev} \in [t_q^{arr}, t_q^{dep}]$ ,  $t_q^{arr}$  为电动汽车  $q$  接入充电站的时刻,  $t_q^{dep}$  为电动汽车  $q$  离开充电站的时刻;  $S_{q,t}^{ev}$  为时段  $t$  电动汽车  $q$  的荷电状态;  $\eta_q^{ech}$ 、 $\eta_q^{edch}$  分别为电动汽车  $q$  的充电、放电效率;  $E_q^{ev}$  为电动汽车  $q$  的电池容量。电动汽车需要满足如下运行约束条件:

$$c_{q,min}^{ev} \leq c_{q,t}^{ev} \leq c_{q,max}^{ev} \quad (13)$$

$$S_{min}^{ev} \leq S_{q,t}^{ev} \leq S_{max}^{ev} \quad (14)$$

$$S_{q,dep}^{ev} \geq S_{q,exp}^{ev} \quad (15)$$

$$c_{min}^{ev,c} \leq \sum_{q \in P_C^{ev}} c_{q,t}^{ev,c} \leq c_{max}^{ev,c} \quad (16)$$

其中,  $c_{q,max}^{ev}$ 、 $c_{q,min}^{ev}$  分别为电动汽车  $q$  电池的最大、最小充电功率;  $c_{max}^{ev,c}$ 、 $c_{min}^{ev,c}$  分别为充电桩的最大、最小充电功率;  $S_{min}^{ev}$ 、 $S_{max}^{ev}$  分别为电动汽车电池荷电状态的下限、上限;  $S_{q,exp}^{ev}$  为电动汽车  $q$  在离开充电桩时的最低荷电状态要求;  $S_{q,dep}^{ev}$  为电动汽车  $q$  离开充电桩时的荷电状态。

本文假设智慧能源社区内所有产消者的地理位置接近, 由配电系统中的同一条馈线供电, 因此无需考虑配电系统的潮流方程约束。

## 2 智慧能源社区协同运行模型

### 2.1 合作博弈模型理论

定义  $P = \{1, 2, \dots, N\}$  为博弈模型的参与者集合, 即大联盟,  $N$  为参与者数量。参与者可以任意组成联盟, 用大联盟  $P$  的子集  $P'$  表示。所有可能的联盟集合用  $\Omega^P$  表示。

合作博弈模型可以用一个有序对  $(P, v)$  表示, 其中  $v: \Omega^P \rightarrow \mathbf{R}$  为价值函数。将每一个联盟  $P'$  映射到一个实数, 用  $v(P')$  表示, 其含义为联盟的成本或收益。本文所提模型为收益博弈模型, 联盟的价值函数包括与上级电力市场进行能源交易带来的收益以及弹性负荷和储能系统的运行成本。

对于任意联盟  $P' \in \Omega^P$ , 其价值函数以及相应的决策空间可以用式(17)表示。

$$\begin{cases} \psi(e_{P'}, c_{P'}) = \max \left\{ E \left[ \sum_{t \in T_T} J_t(e_{P'}, c_{P'}) \right] \right\} \\ \text{s.t. 式 (3)—(5)、(7)—(10)、(12)—(16)} \end{cases} \quad (17)$$

需要指出的是, 对于较为成熟的电力市场而言, 在不考虑政府对可再生能源供应商发放补贴的情况下, 为了避免产消者套利情况的发生, 产消者向电网售电的电价必然不高于购电电价, 因此有  $\lambda_E \leq \lambda_C$ 。在这种情况下, 产消者显然有较强的意愿参与合作博弈以获得更高的利益。

### 2.2 智慧能源社区合作博弈模型

为了推导得到式(17)所示目标函数的解析式, 首先定义  $f(\gamma)$  为:

$$f(\gamma) = E \left( \lambda_E \left[ \sum_{i \in P'} e_{i,t} - \sum_{j \in P'} c_{j,t} \right]^+ \right) - E \left( \lambda_C \left[ \sum_{j \in P'} c_{j,t} - \sum_{i \in P'} e_{i,t} \right]^+ \right) \quad (18)$$

其中,  $\gamma = \sum_{j \in P'} c_{j,t}$  为产消者的负荷功率。由于产消者装设了储能系统, 当储能系统处于放电状态时, 产消者的负荷功率  $\gamma$  可能为负数。可再生能源机组出力的不确定性可以用预测值以及预测误差进行模拟,



其中预测误差为随机变量。定义 $\rho(\xi)$ 为随机变量 $\xi = \sum_{i \in P'} e_{i,t}$ 的概率密度函数,其期望为 $\mu$ ,即 $\mu$ 为可再生能源机组出力的预测值。此时, $f(\gamma)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} f(\gamma) &= \lambda_E \int_{\gamma}^{+\infty} (\xi - \gamma) \rho(\xi) d\xi - \lambda_C \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi = \\ &= \lambda_E \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \gamma) \rho(\xi) d\xi + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi = \\ &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (19)$$

化简可得:

$$f(\gamma) = \begin{cases} \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi & \gamma \geq 0 \\ \lambda_E (\mu - \gamma) & \gamma < 0 \end{cases} \quad (20)$$

假设智慧能源社区中可再生能源机组的功率预测误差独立同分布,由中心极限定理可得其概率分布函数 $\rho(\xi)$ 近似服从期望为 $\mu$ 、方差为 $\delta^2$ 的正态分布,则 $\rho(\xi)$ 可以表示为:

$$\rho(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\delta^2}} \quad \xi \geq 0 \quad (21)$$

将式(21)代入式(20),可得 $f(\gamma)$ 的解析表达式如式(22)所示,推导过程见附录A。

$$f(\gamma) = \begin{cases} \lambda_E (\mu - \gamma) & \gamma < 0 \\ \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{2} (\gamma - \mu) \times \\ \left( 1 - \Delta \left( \frac{\gamma - \mu}{\sqrt{2}\delta} \right) \right) + A & 0 \leq \gamma < \mu \\ \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{2} (\gamma - \mu) \times \\ \left( 1 + \Delta \left( \frac{\gamma - \mu}{\sqrt{2}\delta} \right) \right) + A & \gamma \geq \mu \end{cases} \quad (22)$$

其中, $\Delta(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-y}^y e^{-t^2} dt$ ;  $A = \frac{\lambda_E - \lambda_C}{\sqrt{2\pi}} \delta e^{-\frac{(\gamma-\mu)^2}{2\delta^2}}$ 。

若概率密度函数 $\rho(\xi)$ 难以确定,可以利用可再生能源机组出力的历史数据计算得到式(20)的近似表达式。当 $\gamma \geq 0$ 时,可得:

$$f(\gamma) = \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) (\varphi_1(\gamma) - \varphi_2(\gamma)) \quad (23)$$

$$\varphi_1(\gamma) = (\lambda_E - \lambda_C) \gamma \int_{-\infty}^{\gamma} \rho(\xi) d\xi = (\lambda_E - \lambda_C) \gamma p(\xi \leq \gamma) \quad (24)$$

$$\varphi_2(\gamma) = (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} \xi \rho(\xi) d\xi \quad (25)$$

其中, $p(\xi \leq \gamma)$ 为 $\xi \leq \gamma$ 发生的概率。

设有 $M$ 组可再生能源机组出力历史数据,表示为 $\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_M]$ 。定义 $\chi_\gamma = \{\chi_i | \chi_i \leq \gamma, i=1, 2, \dots, M\}$ 。则可以用式(26)和式(27)分别近似表示式(24)和式(25)。

$$\varphi_1(\gamma) = \frac{(\lambda_E - \lambda_C) \gamma}{M} |\chi_\gamma| \quad (26)$$

$$\varphi_2(\gamma) = (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} \xi \rho(\xi) d\xi = \frac{\lambda_E - \lambda_C}{M} \sum_{\chi_i \in \chi_\gamma} \chi_i \quad (27)$$

其中, $|\chi_\gamma|$ 表示集合 $\chi_\gamma$ 中元素的个数。

由上述方法求得的目标函数 $f(\gamma)$ 为不规则的非线性函数,无法利用现代优化技术进行处理。但对于凹函数而言,一般可以通过分段线性化技术进行拟合,即采用一系列线性约束代替相应的非线性因子。因此,本文首先讨论目标函数式(20)的凹凸性,然后利用分段线性化技术进行拟合。

根据 $f(\gamma)$ 的分段表达式,分如下2种情况进行讨论。

(1)当 $\gamma \geq 0$ 时,有:

$$f(\gamma) = \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi \quad (28)$$

求其一阶、二阶导数分别为:

$$\begin{aligned} \dot{f}(\gamma) &= -\lambda_E + (\lambda_E - \lambda_C) (-\gamma) \rho(\gamma) + \\ &= (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} \rho(\xi) d\xi + (\lambda_E - \lambda_C) \gamma \rho(\gamma) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \ddot{f}(\gamma) &= -(\lambda_E - \lambda_C) \rho(\gamma) + (\lambda_E - \lambda_C) (-\gamma) \dot{\rho}(\gamma) + \\ &= (\lambda_E - \lambda_C) \rho(\gamma) + (\lambda_E - \lambda_C) \rho(\gamma) + \\ &= (\lambda_E - \lambda_C) \gamma \dot{\rho}(\gamma) = (\lambda_E - \lambda_C) \rho(\gamma) \end{aligned} \quad (30)$$

(2)当 $\gamma < 0$ 时,有:

$$f(\gamma) = \lambda_E \int_0^{+\infty} (\xi - \gamma) \rho(\xi) d\xi \quad (31)$$

$$\dot{f}(\gamma) = \lambda_E \int_0^{+\infty} (\xi - \gamma) \rho(\xi) d\xi = -\lambda_E \quad (32)$$

$$\ddot{f}(\gamma) = 0 \quad (33)$$

由2.1节的假设可知 $\lambda_E \leq \lambda_C$ ,可得 $\ddot{f}(\gamma) \leq 0$ ,即 $f(\gamma)$ 是关于 $\gamma$ 的凹函数。此时,可以用多段线性函数将目标函数线性化为 $K$ 段,相应的约束可写为:

$$f \leq \varphi_k \gamma + \gamma_k \quad k=1, 2, \dots, K \quad (34)$$

其中, $\varphi_k$ 和 $\gamma_k$ 分别为第 $k$ 段线性函数的斜率和截距。 $f(\gamma)$ 的分段线性化拟合结果见附录B图B1。

对于联盟 $P'$ 而言,其合作博弈模型如式(35)所示。

$$\begin{cases} v(P') = \max_{c_{P'}} \sum_{t \in T_T} \left( f_t + \sum_{j \in P'} U_{j,t}(c_{j,t}) \right) \\ \text{s.t. 式(3)—(5)、(7)—(10)、(12)—(16)、(34)} \end{cases} \quad (35)$$

其中, $f_t$ 为 $f(\gamma)$ 在时段 $t$ 的表达式。

### 2.3 联盟收益分配

本文所建合作博弈模型式(17)具有超可加性,其定义和证明见附录C。由超可加性可知,能源社区内所有参与者组成的大联盟可以获得最高的利润,即合作博弈的最优策略。因此,在求得大联盟的总体收益后,还需要对该总收益进行合理的分配。合作博弈的分配方法有核仁法、稳定集法、谈判集法、夏普利值法等。其中,核仁法的分配思想是寻找

一个使所有联盟成员满意度最高的分配方案,即核仁 $x^*$ 。联盟 $P'$ 对大联盟 $P$ 以分配方案 $x$ 分配的满意度用过剩度 $e(P', x)$ 表示,如式(36)所示。

$$e(P', x) = v(P') - x(P') \quad (36)$$

其中, $v(P')$ 为联盟 $P'$ 可获得的收益; $x(P')$ 为 $P'$ 参与大联盟时,联盟 $P'$ 中所有成员的收益之和。由式(36)可知,过剩度 $e(P', x)$ 为联盟 $P'$ 参与大联盟前、后的收益差。过剩度越小,表示联盟 $P'$ 对分配方案 $x$ 的满意度越高。核仁 $x^*$ 即为满意度最高的分配方案,是使各个联盟的不满意度最小化的结果<sup>[16]</sup>。

将联盟得到的收益进行公平合理的分配,需要求解博弈模型的核仁。核仁的求解是求解一系列线性规划问题,如式(37)所示。

$$\begin{cases} O_1: \begin{cases} \min \varepsilon \\ \text{s.t.} \sum_{i \in P'} x_i \geq v(P') - \varepsilon \quad \forall P' \in \Omega^P \end{cases} \\ \vdots \\ O_l: \begin{cases} \min \varepsilon \\ \text{s.t.} \sum_{i \in P'} x_i \geq v(P') - \varepsilon_1 \quad \forall P' \in \pi_1 \\ \sum_{i \in P'} x_i \geq v(P') - \varepsilon_l \\ \forall P' \in \pi_{l-1} \setminus \pi_{l-2}, \forall l \in \{2, 3, \dots, Z-1\} \\ \sum_{i \in P'} x_i \geq v(P') - \varepsilon \quad \forall P' \in \Omega^P \setminus \pi_{l-1} \end{cases} \end{cases} \quad (37)$$

其中, $\varepsilon$ 为过剩度; $\varepsilon_l$ 为优化问题 $O_l$ 的最优解; $\pi_l$ 为优化问题 $O_l$ 取得最优解时其约束为等式约束的联盟的集合; $Z$ 为大联盟内包含的子联盟数量。当优化问题 $O_l$ 对应的 $\pi_l$ 为空集时,核仁求解完成,此时大联盟内的子联盟都取得了最优效益。由此可知,在最极端的情况下,需要求解 $2^N$ 个线性规划问题才能求得核仁 $x^*$ 。显然,随着联盟成员数量的增加,求解核仁问题的复杂度会呈指数增加,从而制约了合作博弈模型的可扩展性。

为了提高计算效率和模型的可扩展性,本文通过计算最差情况的过剩度所对应的分配方案来代替核仁,这不仅保证了所有联盟对分配方案的满意度,也有效避免了多次迭代求解核仁的过程。具体算法模型如下:

$$\begin{cases} \min_{x, \varepsilon} \max_{P' \in \Omega^P} \varepsilon(x, P') \\ \text{s.t.} \sum_{i \in P'} x_i = v(P') \end{cases} \quad (38)$$

将其进一步简化为单个线性优化问题,如式(39)所示。

$$\begin{cases} \min_{x, \varepsilon} \varepsilon \\ \text{s.t.} \sum_{i \in P'} x_i \geq v(P') - \varepsilon \quad \forall P' \in \Omega^P \\ \sum_{i \in P} x_i = v(P) \end{cases} \quad (39)$$

通过求解式(39)可以得到联盟效益分配方案

$\{x_i^* | \forall i \in P\}$ 。由上文可知,核仁法求解的计算复杂度为 $O(2N)$ ,本文方法的计算复杂度为 $O(N)$ 。随着联盟内参与者数量 $N$ 的增加,核仁法的计算复杂度呈指数增长,而本文方法的复杂度远低于核仁法,从而极大地提高了收益分配方案的计算效率。

由于可再生能源出力具有不确定性,联盟的收益必须在可再生能源出力确定后才随之确定,因此还需要根据所求核仁对实际确定的收益进行分配。联盟实际确定的收益 $v^R(P)$ 可由式(40)表示。

$$v^R(P) = \sum_{i \in T_r} J_i(e_p^*, c_p^*) \quad (40)$$

其中, $e_p^*$ 为可再生能源机组出力的确定值; $c_p^*$ 由式(35)求得。依据所求的核仁值按照等比例的原则分配实际收益,实际收益的分配方案如下:

$$y_i = \sigma_i v^R(P) \quad \forall i \in P \quad (41)$$

其中, $\sigma_i = \frac{x_i^*}{\sum_{j \in P} x_j^*}$ ;  $y_i$ 为联盟中博弈主体 $i$ 收益的实际分配值。

### 3 算例分析

#### 3.1 参数设置

本文算例采用图1所示智慧能源社区架构,假设社区包含9个产消者,为其随机分配的可控设施如表1所示。为了简化模型,假设所有产消者都有固定的负荷曲线,如附录D图D1所示。用户的可再生能源机组为风电机组,其预测有功功率如附录D图D2所示。假设智慧能源社区中所有储能设备为相同类型,具体参数设置见文献[20]。社区中的电动汽车选用容量为33 kW·h的BMW i3汽车。假设电动汽车接入智慧能源社区充电桩的时段为18:00至次日08:00,充电桩的最大充电功率为3 kW,充电前、后电动汽车的荷电状态分别为45%、95%。采用多段线性函数模拟联盟的收益期望函数 $f(\gamma)$ ,其中 $K=10$ 。弹性负荷效用函数参数 $\nu$ 、 $\zeta$ 的取值分别设为0.025、0.32。

表1 智慧能源社区内各产消者的可控设施分配

Table 1 Allocation of controllable facilities for each proconsumer in SEC

产消者	分配的可控设施	产消者	分配的可控设施
H <sub>1</sub>	弹性负荷	H <sub>6</sub>	电动汽车
H <sub>2</sub>	弹性负荷,储能系统,电动汽车	H <sub>7</sub>	风电机组,储能系统,电动汽车
H <sub>3</sub>	弹性负荷,储能系统	H <sub>8</sub>	风电机组,储能系统
H <sub>4</sub>	储能系统	H <sub>9</sub>	风电机组,电动汽车
H <sub>5</sub>	储能系统,电动汽车		

本文算例参考英国电力市场的实际电价机制设置电价。智慧能源社区的购电电价为分时电价:23:00至次日05:00为4.99 p/(kW·h),16:00—18:00

为  $24.99 \text{ p}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , 其余时段为  $11.99 \text{ p}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。智慧能源社区的上网售电电价为  $4.85 \text{ p}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。储能系统的单位损耗成本为  $0.5 \text{ p}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

### 3.2 联盟收益对比分析

将智慧能源社区中所有产消者的收益情况分为不参加合作博弈独立运行与采用本文所提合作博弈模型2种场景进行对比, 结果如图2所示(图中标注的数值为参加合作博弈时的核仁值)。

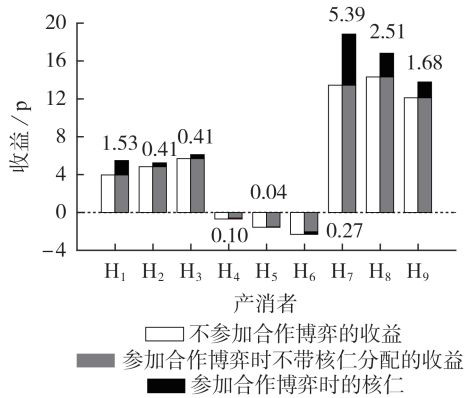


图2 2种场景的产消者收益对比

Fig.2 Comparison of proconsumers' income between two scenes

由图2可看出, 相较于产消者不参与合作博弈独立运行的场景, 在采用本文所提合作博弈模型的场景下, 所有产消者的收益都有不同幅度的增长。其中, 含风电机组的产消者(H<sub>7</sub>—H<sub>9</sub>)的收益提升最大, 含储能系统接入的产消者(H<sub>4</sub>、H<sub>5</sub>)参加合作博弈后的收益虽有增长但变化不大, 含弹性负荷接入的产消者(H<sub>1</sub>—H<sub>3</sub>)的收益也有一定的提升。这是因为: 风电机组的出力在满足用户自身需求之外可以高于市场售电电价的价格将电能出售给智慧能源社区中的其他产消者, 从而避免了向主网以高价购电以及以低价售电; 而含储能系统接入的产消者需要承担储能设备的运行维护费用, 且储能的充放电过程具有一定的损耗, 因此相应产消者的收益增长不明显; 含弹性负荷接入的产消者在参与合作博弈后发挥了主动参与调度的优势, 可以避开电价高峰, 从而获得一定的收益提升。上述2种场景下的负荷曲线见图3。由图3可看出, 本文所提合作博弈模型在一定程度上起到削峰填谷的作用。需要指出的是, 由于安装了大容量的风电机组, 智慧能源社区在大部分时段处于售电状态。在风电机组出力较低的时段, 如00:00—05:00时段, 本文所提模型可以明显地降低负荷功率; 在风电机组出力较高的时段, 则安排一部分弹性负荷在此时工作。这在一定的程度上改善了智慧能源社区的负荷特性, 实现了更多风电能源的就地消纳。

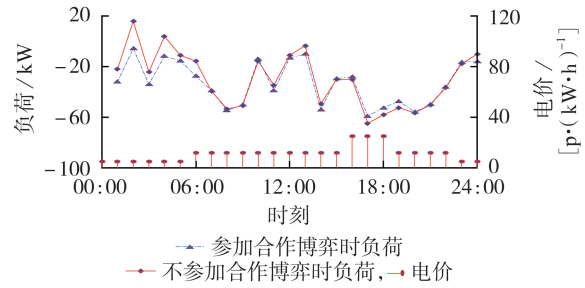


图3 2种场景的负荷曲线对比

Fig.3 Comparison of load curves between two scenes

### 3.3 不确定性变量的影响

为了评估不确定性对博弈模型收益的影响, 本节设计了1组忽略风电机组出力不确定性的对照组, 该对照组采用风电机组出力的预测值, 将其与本文模型进行对比, 30 d的联盟总收益结果如图4所示。

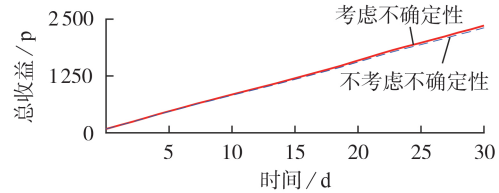


图4 考虑与不考虑风电机组出力不确定性时联盟总收益对比

Fig.4 Comparison of alliance's total income between considering and without considering uncertainty of wind turbine output

由图4可看出, 在忽略风电机组出力不确定性的情形下, 随着累计天数的增加, 联盟总收益(累计收益)明显低于本文模型所得总收益。这是因为本文采用了考虑预测误差的风电机组出力概率模型, 并以收益函数的期望作为优化目标, 从而将不确定性因素纳入优化模型。与忽略风电机组出力不确定性的模型相比, 本文模型可有效地降低风电机组实际出力偏离预测出力时所带来的风险成本, 从而将联盟总收益最大化。

### 3.4 夏普利值法与核仁法的对比分析

夏普利值法是一种经典的根据联盟参与者对联盟总目标贡献度的利益分配方法, 其具体分配方案如式(42)所示。

$$\phi_i = \sum_{P' \in \Omega^P, i \in P'} \frac{(|P'| - 1)!(N - |P'|)!}{N!} (v(P') - v(P' \setminus \{i\})) \quad (42)$$

其中,  $\phi_i$  为产消者  $i$  的夏普利值;  $|P'|$  表示子联盟  $P'$  中参与者的数量;  $v(P' \setminus \{i\})$  为联盟  $P'$  中除了产消者  $i$  之外的所有参与者的价值函数。当合作博弈模型为凸模型时, 可以证明夏普利值法的分配方案属于核集合。计算本文所提合作博弈模型的夏普利值和核仁的过剩度如图5所示。由图可知, 两者的过剩度部



分类似,但夏普利值的过剩度存在大于0的部分,而核仁的过剩度均严格小于等于0。显然,这是因为此时的夏普利值法的分配方案不属于核集合,即基于夏普利值法得到的分配方案并不能满足所有联盟的要求,由此可知本文所建模型为非凸博弈模型。

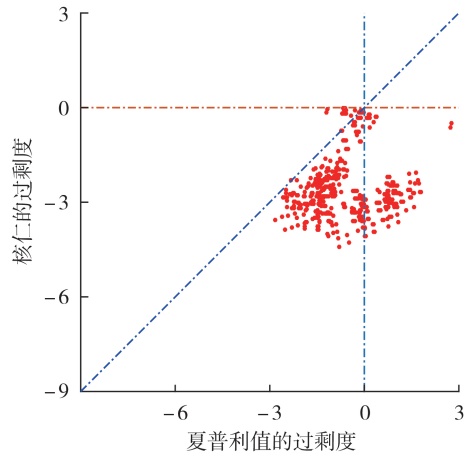


图5 产消者的核仁与夏普利值的过剩度对比

Fig.5 Comparison between proconsumer's nucleolus excess and Shapley excess

### 3.5 模型计算效率分析

求解核仁是合作博弈模型中的难点,因为核仁问题的求解是指数复杂度问题,会影响模型的扩展性与实用性。本节采用直接求核仁的方法(简称直接法)与本文所提简化方法进行分析,对比当联盟分别包含3、6、9、12、15位产消者时,2种方法求解核仁所需的时间,结果如表2所示。需要说明的是,该算例计算平台为Core i7, RAM 8 GB,编程环境为MATLAB 2016b,计算时间为CPU运行时间。由表2可知,采用直接法求解核仁的时间随着参与博弈联盟的产消者数量的增加呈指数增长,而采用式(39)所示简化方法求解所需时间随着参与博弈联盟的产消者数量的增长幅度较小。这是因为:当利用直接法求解核仁时,需要求解的优化问题的数量与线性规划问题的维数都随着联盟的产消者数量呈指数增长,而式(39)将求解核仁的过程简化为求解单个线性规划问题,从而避免了指数复杂度问题,因而极大地提高了模型的可扩展性。

表2 2种方法求解核仁时间对比

Table 2 Comparison of nucleolus solution time between two methods

产消者 数量/位	求解核仁时间/s		产消者 数量/位	求解核仁时间/s	
	直接法	本文方法		直接法	本文方法
3	0.55	0.34	12	363.5	0.48
6	1.18	0.37	15	7301.1	0.97
9	8.81	0.40			

为了提高计算效率和模型的可扩展性,本文通过计算最差情况的过剩度所对应的分配方案来代替

核仁,两者的过剩度结果见图6。由图6可知,本文方法得到的分配方案的过剩度均小于0,即本文模型所得的分配方案能得到所有联盟成员的满意。因此,本文所提最差过剩度法可替代核仁法,实现联盟收益的合理分配。

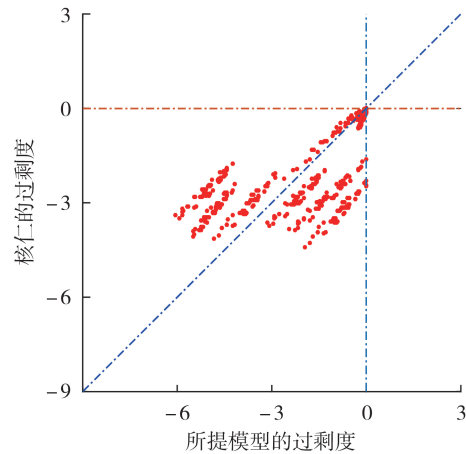


图6 核仁法的过剩度与本文方法的过剩度对比

Fig.6 Comparison of excess between nucleolus method and proposed method

## 4 结论

本文针对含有弹性负荷、分布式可再生能源、电动汽车与储能系统接入的智慧能源社区,提出了一种基于多主体合作博弈的协同运行方法。首先,构建了智慧能源社区内各个产消者的运行模型,通过价值函数表示联盟的收益,将智慧能源社区的协同运行建模为合作博弈问题;然后,基于历史数据与概率密度函数模拟了可再生能源出力的不确定性,并将收益函数的期望作为目标函数,得到联盟的总收益;最后,基于合作博弈中核仁的概念,给出了联盟收益的分配方案,并在可再生能源机组出力确定后换算得到联盟实际所得收益的分配方案。算例分析结果表明:本文所提模型有效地提高了能源社区的总体收益,并在一定程度上改善了智慧能源社区的负荷特性,实现了更多可再生能源的就地消纳;同时进一步证明了随着联盟成员数量的增加,本文所提联盟收益分配方法可高效、快速地求解,极大地提高了本文模型的可扩展性。

本文的研究仍有不足之处,如在构建模型时没有考虑配电网潮流约束的影响。因此,在下一步的研究工作中,若将模型扩展至多智慧能源社区乃至多微网之间,需要将潮流的影响纳入考虑,对该情景下模型的有效性与其可行性进行进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

[1] 程乐峰,余涛,张孝顺,等. 信息-物理-社会融合的智慧能源调

- 度机器人及其知识自动化:框架、技术与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1):25-40, 340.
- CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):25-40, 340.
- [2] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13):1-9.
- WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13):1-9.
- [3] 任建文, 张青青. 基于能源区块链的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):23-33.
- REN Jianwen, ZHANG Qingqing. Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):23-33.
- [4] 孙国强, 钱苇航, 黄文进, 等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5):7-14.
- SUN Guoqiang, QIAN Weihang, HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):7-14.
- [5] 王成山, 王丹, 李立涅, 等. 需求侧智慧能源系统关键技术分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3):132-140.
- WANG Chengshan, WANG Dan, LI Licheng, et al. Key technology analysis of demand-side smart energy system[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(3):132-140.
- [6] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7):198-207.
- JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7):198-207.
- [7] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1):1-13.
- YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):1-13.
- [8] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1):89-97.
- WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1):89-97.
- [9] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10):51-56.
- CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10):51-56.
- [10] 何彦英, 曾鸣. 考虑需求侧响应的配电网运行效应评估研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11):1-7, 14.
- HE Yanying, ZENG Ming. Effect evaluation of demand response on distribution network operation [J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11):1-7, 14.
- [11] 江岳春, 曾诚玉, 邹嘉嘉, 等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):254-260.
- JIANG Yuechun, ZENG Chengyu, HUAN Jijia, et al. Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):254-260.
- [12] 胡泽升, 陆俊, 黄瑞, 等. 计及需求响应的智慧能源小区热电耦合系统用能优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12):22-34.
- HU Zesheng, LU Jun, HUANG Rui, et al. Optimization method of energy consumption for thermoelectric coupling system in smart energy community considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):22-34.
- [13] 祖其武, 牛玉刚, 邹媛媛, 等. 基于弹性负荷分时调度和多电源联合供电的微网经济运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4):20-27.
- ZU Qiwu, NIU Yugang, ZOU Yuanyuan, et al. Economic operation of microgrid based on elastic load sub-period dispatch and combined power supply of multiple energy [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4):20-27.
- [14] 李媛, 冯昌森, 文福拴, 等. 含电动汽车和电转气的园区能源互联网能源定价与管理[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16):1-10.
- LI Yuan, FENG Changsen, WEN Fushuan, et al. Energy pricing and management for park-level energy internets with electric vehicles and power-to-gas devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16):1-10.
- [15] 李驰宇, 高红均, 刘友波, 等. 多园区微网优化共享运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3):29-36.
- LI Chiyu, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal sharing operation strategy for multi park-level microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):29-36.
- [16] 武昭原, 周明, 姚尚润, 等. 基于合作博弈论的风储联合参与现货市场优化运行策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2815-2824.
- WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, YAO Shangrun, et al. Optimization operation strategy of wind-storage coalition in spot market based on cooperative game theory [J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2815-2824.
- [17] CHIS A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1960-1970.
- [18] HAMBRIDGE S, HUANG A Q, YU R. Solid State Transformer (SST) as an energy router: economic dispatch based energy routing strategy [C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015:2355-2360.
- [19] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid [C] // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, USA: IEEE, 2010:415-420.
- [20] FENG Changsen, WEN Fushuan, LI Zhiyi, et al. Stackelberg game based transactive pricing for optimal demand response in power distribution systems [J]. International Journal of Electric Power and Energy Systems, 2020, 118:105764.

#### 作者简介:



冯昌森

冯昌森(1990—),男,山东枣庄人,讲师,博士,从事电力系统优化控制、电力市场、机器学习、区块链技术等方面的研究工作(**E-mail**:fcs@zjut.edu.cn);

沈佳静(1992—),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场、微电网优化调度(**E-mail**:joy-sjj@outlook.com);

张有兵(1971—),男,湖北黄石人,教授,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控等(**E-mail**:youbingzhang@zjut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)



## Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community

FENG Changsen<sup>1</sup>, SHEN Jiajing<sup>1</sup>, ZHAO Chongjuan<sup>2</sup>, LIU Ang<sup>3</sup>, WEN Fushuan<sup>4</sup>, ZHANG Youbing<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Huzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Huzhou 313000, China;

3. Huzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313099, China;

4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Smart energy is one of the focal points of China's energy side reform, and SEC (Smart Energy Community) is a user-level smart energy system integrating large-scale proconsumers. In this context, a cooperative game-based coordinated operation strategy of SEC is proposed, which can effectively motivate the individual participants to cooperate with the whole community. Considering the uncertainty of renewable energy output, the cooperative game model of SEC is established, and the income allocation scheme of cooperative game model applicable to a large number of participants is designed, which significantly improves the computational efficiency and scalability of the model. The simulative and analysis results of SEC examples show that, the proposed model can effectively improve the total SEC income, and the nucleolus-based income allocation scheme is effective and feasible, which not only maximizes the economic benefit, but also promotes the local consumption of renewable energy.

**Key words:** smart energy community; cooperative game; flexible load; proconsumers; income allocation; coordinated operation

(上接第84页 continued from page 84)

## Robust economic dispatch of CSP-CHPMG based on chance constrained Gaussian mixture model

PENG Chunhua, CHEN Jing, ZHENG Cong

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to improve the robustness of optimal dispatch of CSP-CHPMG (Concentrated Solar Power-Combined Heating and Power MicroGrid) in uncertain environment, the uncertain sets of wind power forecasting error and load forecasting error based on opportunity constraint Gaussian mixture model are constructed to realize accurate description of the robustness of dispatch scheme. Robustness is taken as the collaborative optimization target, and the robust economic multi-objective optimal dispatch model of CSP-CHPMG is built considering power demand response, which ensures the robustness and economy of the dispatch scheme and achieves the best balanced coordination. Case results verify the superiority of the proposed method.

**Key words:** concentrated solar power plant; Gaussian mixture model; opportunity constraint; demand response; robust optimization

## 附录 A

式 (22) 的推导过程如下。

为了推导  $f(\gamma)$  的表达式, 分  $\gamma \geq \mu$ 、 $0 \leq \gamma < \mu$  和  $\gamma < 0$  这 3 种情况讨论。

(1) 当  $\gamma \geq \mu$  时, 有:

$$\begin{aligned}
 f(\gamma) &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_0^{\gamma} (\gamma - \zeta) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} \right] d\zeta = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \left[ (\gamma - \mu) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} d\frac{\zeta-\mu}{\sqrt{2}\delta} + \frac{-1}{2} \frac{1}{\sqrt{2}\delta} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} d(\zeta-\mu)^2 \right] = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{2} (\gamma - \mu) \left[ 1 + \Delta \left( \frac{\gamma - \mu}{\sqrt{2}\delta} \right) \right] + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{\sqrt{2\pi}} \delta e^{-\frac{(\gamma-\mu)^2}{2\delta^2}}
 \end{aligned} \tag{A1}$$

(2) 当  $0 \leq \gamma < \mu$  时, 有:

$$\begin{aligned}
 f(\gamma) &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_{-\infty}^{\gamma} (\gamma - \xi) \rho(\xi) d\xi = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \int_0^{\gamma} (\gamma - \zeta) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} \right] d\zeta = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + (\lambda_E - \lambda_C) \left[ (\gamma - \mu) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} d\frac{\zeta-\mu}{\sqrt{2}\delta} + \frac{-1}{2} \frac{1}{\sqrt{2}\delta} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{(\zeta-\mu)^2}{2\delta^2}} d(\zeta-\mu)^2 \right] = \\
 &= \lambda_E \mu - \lambda_E \gamma + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{2} (\gamma - \mu) \left[ 1 - \Delta \left( \frac{\mu - \gamma}{\sqrt{2}\delta} \right) \right] + \frac{\lambda_E - \lambda_C}{\sqrt{2\pi}} \delta e^{-\frac{(\gamma-\mu)^2}{2\delta^2}}
 \end{aligned} \tag{A2}$$

(3) 当  $\gamma < 0$  时, 有:

$$f(\gamma) = \lambda_E \int_0^{+\infty} (\xi - \gamma) \rho(\xi) d\xi = \lambda_E (\mu - \gamma) \tag{A3}$$

## 附录 B

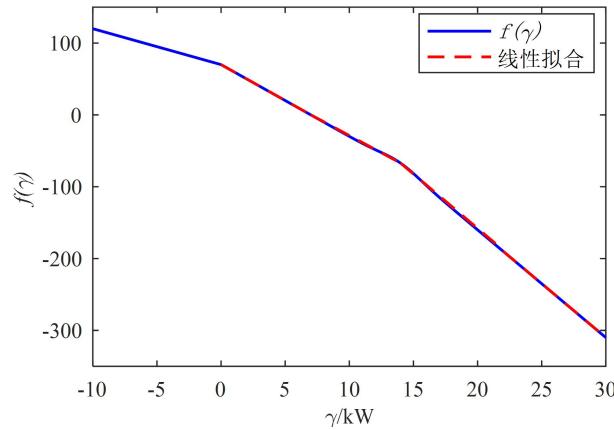


图 B1  $f(\gamma)$  的分段线性化拟合结果

Fig.B1 Piecewise linearization fitting result of  $f(\gamma)$

## 附录 C

合作博弈模型的超可加性证明如下。

合作博弈中超可加性的定义为：在博弈模型  $(P, v)$  中，当且仅当 2 个互斥的联盟的价值函数之和不大于 2 个联盟合作后的价值函数，即对于任意且  $P'_1, P'_2 \subseteq \Omega^P$ ，均有  $v(P'_1) + v(P'_2) \leq v(P'_1 \cup P'_2)$  时，博弈模型  $(P, v)$  具有超可加性。

假设  $P'_1$  和  $P'_2$  为大联盟  $P$  中 2 个互斥的子联盟，即  $P'_1, P'_2 \subseteq P$  且  $P'_1 \cap P'_2 = \emptyset$ ，定义  $A_{P'} = \{c_{P'} \mid \text{s.t. 式 (3)–(5)、(7)–(10)、(12)–(16)}\}$ ，定义：

$$c_{P'_1}^* = \arg \max_{c_{P'_1} \in A_{P'_1}} E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_1}, c_{P'_1}) \right) \quad (C1)$$

$$c_{P'_2}^* = \arg \max_{c_{P'_2} \in A_{P'_2}} E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_2}, c_{P'_2}) \right) \quad (C2)$$

$$v(P'_1) + v(P'_2) = E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_1}, c_{P'_1}^*) \right) + E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_2}, c_{P'_2}^*) \right) \quad (C3)$$

$$\begin{aligned} & E \left( J_t(e_{P'_1 \cup P'_2}, c_{P'_1}^* \cup c_{P'_2}^*) \right) - E \left( J_t(e_{P'_1}, c_{P'_1}^*) \right) - E \left( J_t(e_{P'_2}, c_{P'_2}^*) \right) = \\ & E \left( f \left( \sum_{i \in P'_1 \cup P'_2} e_{i,t} - \sum_{j \in P'_1 \cup P'_2} c_{j,t}^* \right) \right) - E \left( f \left( \sum_{i \in P'_1} e_{i,t} - \sum_{j \in P'_1} c_{j,t}^* \right) \right) - E \left( f \left( \sum_{i \in P'_2} e_{i,t} - \sum_{j \in P'_2} c_{j,t}^* \right) \right) \end{aligned} \quad (C4)$$

根据 2.2 节可知  $f \left( \sum_i e_{i,t} - \sum_j c_{j,t} \right)$  是一个凹函数，那么在任意时段  $t$ ，可得：

$$E \left( J_t(e_{P'_1}, c_{P'_1}^*) \right) + E \left( J_t(e_{P'_2}, c_{P'_2}^*) \right) \leq E \left( J_t(e_{P'_1 \cup P'_2}, c_{P'_1}^* \cup c_{P'_2}^*) \right) \quad (C5)$$

由于：

$$E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_1 \cup P'_2}, c_{P'_1}^* \cup c_{P'_2}^*) \right) \leq \max_{b_{P'_1}, b_{P'_2}} E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_1 \cup P'_2}, c_{P'_1} \cup c_{P'_2}) \right) \quad (C6)$$

因此，可得：

$$E \left( \sum_{t \in T_1} [J_t(e_{P'_1}, c_{P'_1}^*) + J_t(e_{P'_2}, c_{P'_2}^*)] \right) \leq \max_{b_{P'_1}, b_{P'_2}} E \left( \sum_{t \in T_1} J_t(e_{P'_1 \cup P'_2}, c_{P'_1} \cup c_{P'_2}) \right) \quad (C7)$$

即：

$$v(P'_1) + v(P'_2) \leq v(P'_1 \cup P'_2) \quad (C8)$$

由此可证明合作博弈模型式 (17) 具有超可加性。



## 附录 D

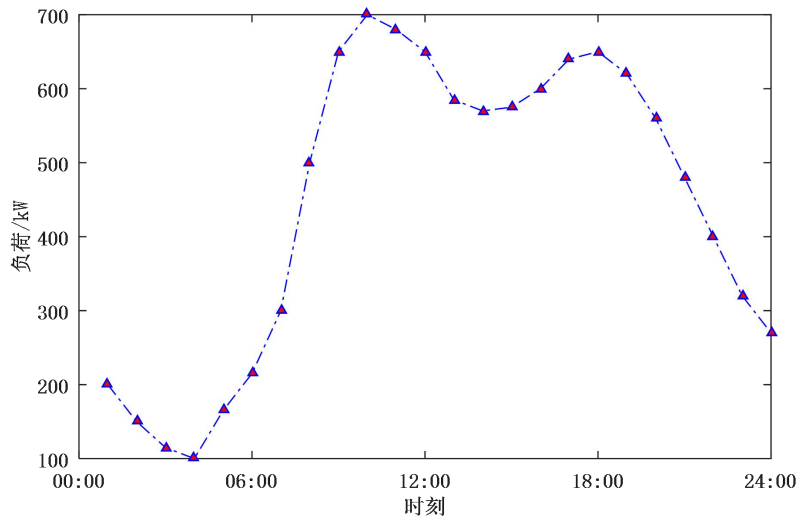


图 D1 产消者的负荷曲线  
Fig.D1 Load curve of proconsumer

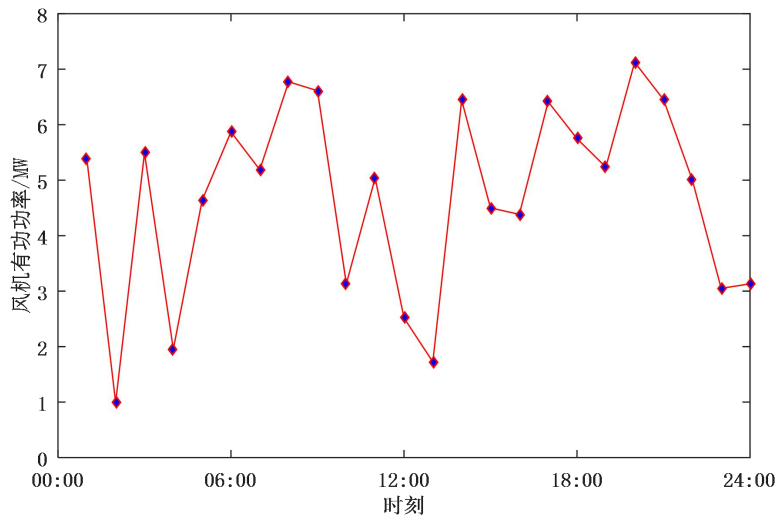


图 D2 风电机组的有功功率  
Fig.D2 Active power of wind turbine