

侯健敏^{1,2} 丁苏云¹ 余威杰¹ 徐志豪¹ 李志¹ 孟莹¹

包含多投资主体的综合能源系统容量配置

摘要

包含风电、光伏等新能源的综合能源系统以实现电、热、冷等多能互补供能而备受关注。当多个投资者作为独立主体参与综合能源系统运营时,如何对各设备进行合理的容量配置,以更好地消纳新能源和实现各投资主体的利益最大化,是值得关注的问题。本文基于博弈论的纳什均衡原理,针对由风电设备、光伏设备以及冷热电联供设备3个投资者组成的综合能源系统,构建容量配置博弈模型,并采用粒子群算法(PSO)进行求解。在非博弈、非合作博弈以及合作博弈3种不同场景下的对比分析结果表明,在合作博弈场景下,各方投资者收益相对最大、容量配置相对最小,系统具有最大的整体收益,各参与者有明显的合作可能性。研究结果为多方参与供能市场提供了解决思路。

关键词

综合能源系统;容量配置;系统优化;合作博弈

中图分类号 TM73

文献标志码 A

收稿日期 2022-02-23

资助项目 国家自然科学基金(71503136)

作者简介

侯健敏,女,博士,副教授,研究方向为 IES 配置与调度优化, jmhhou@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 自动化学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

0 引言

在我国提出碳达峰碳中和目标的背景下,需进一步加快发展清洁能源的步伐,并研究更为高效的能源系统^[1-2]。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是打破不同能源交互壁垒的一种新兴形式,是推动能源向清洁化、多元化转型的有效途径,符合未来能源的发展趋势^[3-4]。IES 的最优容量配置可以实现系统效益最佳,同时也能保证整个系统的稳定运行以及供能可靠性^[5]。然而,随着越来越多的投资主体参与到 IES 中,多投资主体间的利益冲突对 IES 容量配置构成挑战,并且各投资者追求自身效益最优与系统追求整体效益最优之间容易产生矛盾。

目前,多采用博弈论方法解决 IES 容量配置研究中多投资主体利益冲突问题。文献[6]基于对等博弈方法,分析了某市配电系统中风光-储系统在不同运营模式下的最优容量配置策略;文献[7]基于非合作博弈方法,分析了独立型海岛供电系统中多个投资者的供电策略,建立新型电能交易模型,解决了负荷需求与新能源机组出力不平衡的问题;文献[8]针对多元化发电主体和购电主体,基于非合作博弈方法和最优反应的学习算法建立新型电能交易模型,提高了售电商的经济效益;文献[9]基于合作博弈理论,构建了电网公司和用户之间的博弈模型,研究合作博弈与非合作博弈在电能竞价交易中的不同效果;文献[10]基于主从博弈方法,考虑未来微网运行市场化模式下,多个主体如何实现各自设备运行周期内的年平均收益最大化,并以缺电率作为可靠性约束建立了容量配置模型;文献[11]构建联合系统双层规划模型分析了抽水蓄能电站的容量配置问题,实现了经济效益与环境效益最大化的预期目标。上述文献主要针对多个供电投资主体的容量配置研究。但随着用户生活水平的提高,其用能需求日益多样化,研究包含冷、热、电等多能需求的 IES 各投资者最优收益和最佳容量配置,将有更好的现实意义。

因此,本文针对包含冷、热、电等多能流的 IES,在供能侧建立关于风电设备、光伏设备以及冷热电联供设备投资者的容量配置博弈模型。模型以各参与者的容量为决策变量,各自的收益为优化目标,解决多投资主体参与 IES 供能侧容量配置时,如何更好地使各投资者及整体收益达到最优的问题,以提高多方参与共建供能市场的积极性。

1 IES 结构及设备模型

1.1 IES 结构

IES 系统结构如图 1 所示.电网、风能、太阳能以及天然气共同组成了供能侧,IES 中的设备主要由光伏设备、风电设备以及冷热电联供设备 3 部分组成.用能侧包含电负荷需求、热负荷需求以及冷负荷需求.风电和光伏两种设备出力主要满足区域内的电力负荷需求.微型燃气轮机同时供给电热负荷,燃气锅炉为热负荷的重要输出设备,吸收式制冷机满足冷负荷需求.IES 供电不足时则会向电网购电.

1.2 设备出力模型

1.2.1 风电设备模型

风电设备的输出功率 $P_{wt}(t)$:

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_{in} \cup v(t) \geq v_{out}, \\ P_{WT} \frac{v(t)^k - v_r^k}{v_r^k - v_{in}^k}, & v_{in} \leq v(t) < v_r, \\ P_{WT}, & v_r \leq v(t) < v_{out}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $v(t)$ 为风速, v_{in} 为设备的启动风速, v_{out} 为设备的额定风速, v_r 为设备的切出风速, k 为出力的特性系数, P_{WT} 为设备的额定容量^[12].

1.2.2 光伏设备模型

光伏设备输出功率可以近似正比于光照强度:

$$P_{pv}(t) = \frac{\alpha_{PV} \times H_s \times A_p \times N_i}{H_{ST}}, \quad (2)$$

式中, α_{PV} 为效率系数, H_s 为实际太阳辐射强度, A_p 为单个太阳能电池板的面积, N_i 为太阳能电池板的总数目, H_{ST} 为在标准测试条件下的太阳辐射强度.

1.2.3 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机的热电输出功率为

$$\begin{cases} q_{MT}(t) = P_{mt}(t) \frac{1 - \eta_e - \eta_{loss}}{\eta_e}, \\ q_{MT}^H(t) = \eta_{heat} q_{MT}(t), \end{cases} \quad (3)$$

式中, $q_{MT}(t)$ 和 $P_{mt}(t)$ 分别为 t 时刻微型燃气轮机的余热量和发电量, η_e 是其发电效率, η_{loss} 是其散热损失, η_{heat} 为余热锅炉的制热系数, $q_{MT}^H(t)$ 为余热锅炉的供热量.

微型燃气轮机 t 时刻输出的电功率和天然气量的关系可以表示为

$$F_{MT}(t) = \frac{P_{mt}(t)}{\eta_e L}, \quad (4)$$

式中, $P_{mt}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的发电量, L 为天然气的低热热值.

1.2.4 燃气锅炉模型

燃气锅炉的输出功率为

$$q_{GB}(t) = \frac{\eta_{GB} F_{GB}(t)}{L}, \quad (5)$$

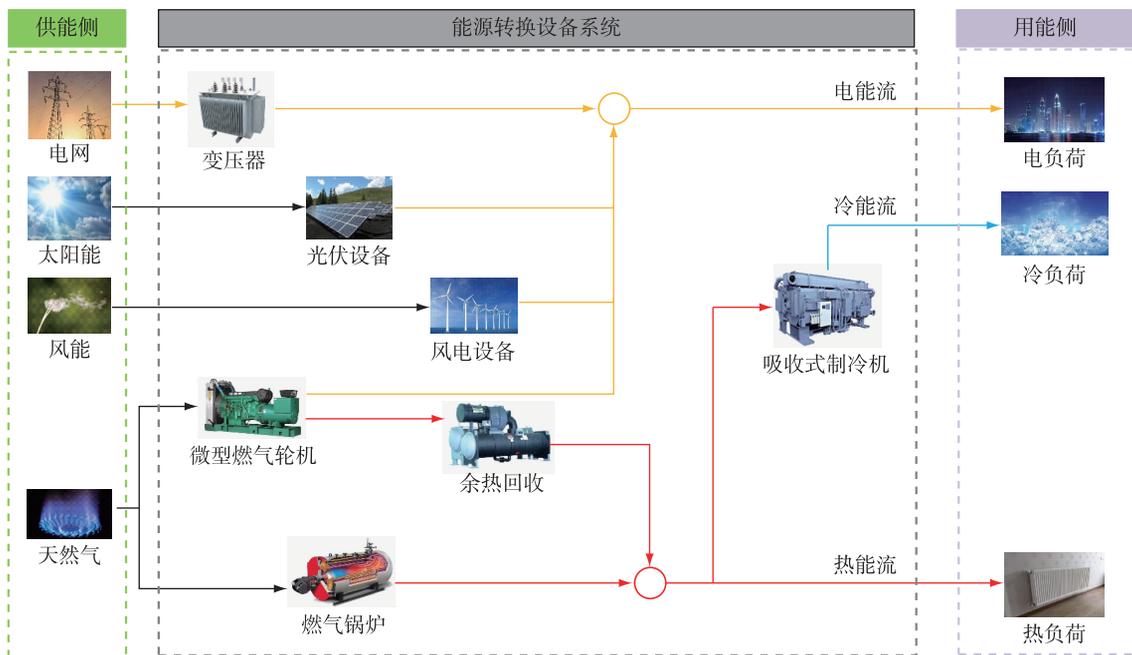


图 1 综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of IES

式中, $q_{GB}(t)$ 为热输出, $F_{GB}(t)$ 为消耗的天然气的量, η_{GB} 为制热系数.

1.2.5 吸收式制冷机模型

吸收式制冷机输出功率为

$$q_{AC}^C(t) = \eta_{AC} q_{AC}^H(t), \quad (6)$$

式中, $q_{AC}^C(t)$ 为设备的冷输出, $q_{AC}^H(t)$ 为制冷所需热量, η_{AC} 为设备的制冷效率.

2 容量配置博弈模型

市场由3方参与的 IES 系统,即风电设备投资者、光伏设备投资者以及冷热电联供设备投资者,研究其容量配置,需要构建容量配置博弈模型.各方投资者通过改变自身容量决策信息与其他参与方进行博弈,整个博弈过程都是基于理性做出的,即各投资者做出的决策都是最有利于自身收益的.各方投资者可以选择在地位对等的情况下进行非合作博弈,也可以通过结成联盟进行地位对等的合作博弈.各设备投资者在整个容量配置博弈中的目标均为追求自身收益最大化.容量配置3方博弈如图2所示.

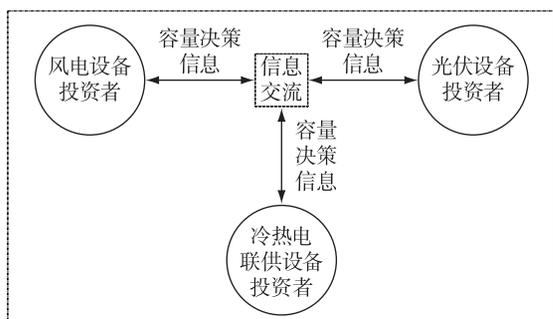


图2 容量配置3方博弈

Fig.2 Three-party game for capacity allocation

2.1 设备投资者收益模型

在上述博弈中,设备投资者的收益函数均为其在建设投入以及使用的整个过程中的经济收益.由于本文所研究的容量配置属于多投资主体博弈,因此,对于整个 IES 在运行期的收益需要集体划分给3个设备投资者.IES 在初期的建设均为一次性建设投资,收益主要是后期运行而来,因此各设备对于收益函数,考虑其自身全生命周期内的年平均经济收益更具现实意义.对于整个容量配置博弈模型的求解,首先要使得各投资者的年平均经济效益达到最优,此外也要保证整个 IES 的供能可靠性符合要求.

2.1.1 风电、光伏设备投资者年平均收益模型

在 IES 中,系统优先按风电、光伏比例接纳可再

生能源.假设政府以单位电能对风电、光伏设备投资者进行补贴^[13].风电设备与光伏设备年平均收益计算相似,以风电设备投资者为例,包含政府补贴的年平均收益为

$$\max F_{WT} = I_{WT} - C_{WT}, \quad (7)$$

式中, F_{WT} 为风电设备的年平均收益, I_{WT} 为风电设备运行周期内的年平均收入, C_{WT} 为风电设备的年平均成本.

$$I_{WT} = I_{WT,s} + I_{WT,su}, \quad (8)$$

式中, $I_{WT,s}$ 和 $I_{WT,su}$ 分别为风电设备年平均电能出售收入和风电设备投资人获得的年平均折旧收入.

$$I_{WT,s} = R_{WT,se} \sum_{t=1}^T \min \left\{ \frac{P_{wt}(t) p_e(t)}{P_{wt}(t) + P_{pv}(t)}, P_{wt}(t) \right\}, \quad (9)$$

式中, $R_{WT,se}$ 为风电上网电价,其中包含了政府补贴, $p_e(t)$ 为 t 时刻电力负荷需求, T 为运行总小时数.

风电设备使用一定年限后设备仍有价值,风电设备投资者获得的年平均折旧收入为

$$C_{WT} = c_{WT,re} P_{WT} f_{WT,re} + c_{WT,ma} P_{WT}, \quad (10)$$

式中, $c_{WT,re}$ 和 $c_{WT,ma}$ 分别为风电设备单位容量的年建设成本以及年运行维护成本, $f_{WT,re}$ 为风电设备资金回报系数.

风电设备的年平均成本包括建设与运行维护成本.由于建设投资为一次性,需考虑货币时间价值,即考虑资金回报系数,因此风电设备的年平均成本为

$$C_{WT} = C_{WT,re} + C_{WT,ma}, \quad (11)$$

$$C_{WT,re} = \alpha_{WT,re} P_{WT} f_{WT,re}, \quad (12)$$

$$C_{WT,ma} = \alpha_{WT,ma} P_{WT}, \quad (13)$$

式中, $C_{WT,re}$ 和 $C_{WT,ma}$ 分别为风电设备的年平均建设成本和年平均运行维护成本, $\alpha_{WT,re}$ 和 $\alpha_{WT,ma}$ 分别为风电设备单位容量的年建设成本和年运行维护成本, $f_{WT,re}$ 为风电设备资金回报系数.

当风电、光伏设备投资主体设备出力不能满足区域用电需求时,需要燃气轮机增发一部分电能.考虑燃气轮机发电的运行成本,风电、光伏设备投资主体需要支付响应的出力不足补偿费用^[14].若仍不能满足用户需求,将会向电网购电^[15].本文这两类费用选择按额定容量分配.风电、光伏设备投资主体因供电不足需要支付的总费用为

$$I_t = f_{gas} \sum_{t=1}^T P_{uco}(t) + R_{ue} \sum_{t=1}^T P_p(t), \quad (14)$$

式中, $P_p(t)$ 和 R_{ue} 为在 t 时刻向电网购电功率和单位功率成本, $P_{uco}(t)$ 为 t 时刻风电、光伏设备供电不足时,需要微型燃气轮机增发的电能, f_{gas} 为其单位

发电成本系数.

2.1.2 冷热电联供设备年平均收益模型

冷热电联供设备投资者的年平均收益为

$$\max F_C = I_C - C_C, \quad (15)$$

式中, F_C 为冷热电联供设备的年平均收益, I_C 为冷热电联供设备运行周期内的年平均收入, C_C 为冷热电联供设备的年平均成本.

$$I_C = I_{C,s} + I_{C,su}, \quad (16)$$

式中, $I_{C,s}$ 和 $I_{C,su}$ 分别为冷热电联供设备年平均能量出售收入和冷热电联供设备投资人获得的年平均折旧收入.

$$I_{C,s} = \sum_{t=1}^T (R_{H,se} Q_H(t) + R_{C,se} Q_C(t)) + f_{gas} \sum_{t=1}^T P_{uco}(t), \quad (17)$$

式中, $R_{H,se}$ 为设备售热价格, $Q_H(t)$ 为 t 时刻的热负荷, $R_{C,se}$ 为设备售冷价格, $Q_C(t)$ 为 t 时刻的冷负荷.

$$I_{C,su} = (R_{MT,su} P_{MT} + R_{GB,su} P_{GB} + R_{AC,su} P_{AC}) \cdot \frac{m}{(1+m)^{L_C} - 1}, \quad (18)$$

式中, $R_{MT,su}$ 、 $R_{GB,su}$ 以及 $R_{AC,su}$ 分别为微型燃气轮机、燃气锅炉以及吸收式制冷机单位装机容量折旧收入, L_C 为冷热电联供设备运行寿命.

冷热电联供设备的年平均成本中包括了年平均建设成本以及年平均运行维护成本, 与风电设备的计算方式类似.

2.2 多主体博弈模型

1) 参与者

$$N = \{WT, PV, C\}. \quad (19)$$

2) 策略集合

$$P = \{P_{WT}, P_{PV}, P_C\}. \quad (20)$$

3) 收益函数

$$\begin{cases} F_{WT}(P_{WT}, P_{PV}, P_C), \\ F_{PV}(P_{WT}, P_{PV}, P_C), \\ F_C(P_{WT}, P_{PV}, P_C), \end{cases} \quad (21)$$

式中, N 表示参与者集合, C 表示冷热电联供设备, P 表示策略集合, P_{WT} 、 P_{PV} 以及 P_C 分别表示风电、光伏以及冷热电联供设备 3 个投资主体的装机容量, F_{WT} 、 F_{PV} 以及 F_C 分别表示风电、光伏以及冷热电联供设备的收益函数.

博弈模型的均衡解, 是各参与者的最优策略选择, 此时整体收益达到最佳, 各参与者收益最佳^[16]. 均衡解应满足:

$$\begin{cases} P_{WT}^* = \arg \max_{P_{WT}} (P_{WT}, P_{PV}^*, P_C^*), \\ P_{PV}^* = \arg \max_{P_{PV}} (P_{WT}^*, P_{PV}, P_C^*), \\ P_C^* = \arg \max_{P_C} (P_{WT}^*, P_{PV}^*, P_C), \end{cases} \quad (22)$$

式中, P_{WT}^* 、 P_{PV}^* 以及 P_C^* 分别为风电、光伏以及冷热电联供设备的最优容量策略, $\arg \max(\cdot)$ 为使目标函数达到最大的容量集合.

2.3 约束条件

1) 能量平衡约束

$$P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{uco}(t) + P_p(t) = P_e(t) + P_{ex}(t), \quad (23)$$

式中, $P_{wt}(t)$ 为风电设备的供电功率, $P_{pv}(t)$ 为光伏设备的供电功率, $P_{uco}(t)$ 为燃气轮机的供电功率, $P_p(t)$ 为向电网购电的功率, $P_e(t)$ 为电负荷, $P_{ex}(t)$ 为过剩功率.

$$q_{MT}(t) + q_{GB}(t) = Q_H(t) + Q_{ex}(t) + Q_C(t)/\eta_{AC}, \quad (24)$$

式中, $Q_H(t)$ 为 t 时刻热负荷, $Q_{ex}(t)$ 为 t 时刻的过剩热量, $Q_C(t)$ 为 t 时刻冷负荷.

$$H_{AC}(t)\eta_{AC} = Q_C(t), \quad (25)$$

式中, $H_{AC}(t)$ 为吸收式制冷机完成制冷循环所需要消耗的热能功率, η_{AC} 为吸收式制冷机制冷效率系数.

2) 出力约束

各设备的出力需在允许范围内, IES 中各设备的出力需满足:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{mt}(t) \leq P_{MT}, \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{PV}, \\ 0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{WT}, \\ 0 \leq q_{GB}(t) \leq P_{GB}, \\ 0 \leq q_{AC}(t) \leq P_{AC}, \end{cases} \quad (26)$$

式中, P_{MT} 、 P_{GB} 以及 P_{AC} 分别为微型燃气轮机、燃气锅炉以及吸收式制冷机对应的装机容量.

3 模型求解

粒子群算法(PSO)在求解博弈模型时具有效率高、收敛速度快的特点. 结合迭代搜索法, 粒子群每次迭代后, 能够不断更新自身的速度和位置, 直到收敛至一个稳定解^[17]. 容量配置博弈模型纳什均衡求解步骤具体如下:

步骤 1: 设置平衡点的初始值. 初始值可以从每个参与者的策略空间中随机选择.

步骤 2: 与其他参与者共享前一次迭代中所做

操作。

步骤3:第*i*个博弈参与者作出独立决策。第*j*-1轮迭代后,各参与者根据结果值进行决策,得到第*j*轮的决策变量组合为

$$\begin{cases} P_{WT}^j = \arg \max_{P_{WT}} (P_{WT}, P_{PV}^{j-1}, P_C^{j-1}), \\ P_{PV}^j = \arg \max_{P_{PV}} (P_{WT}^{j-1}, P_{PV}, P_C^{j-1}), \\ P_C^j = \arg \max_{P_C} (P_{WT}^{j-1}, P_{PV}^{j-1}, P_C). \end{cases} \quad (27)$$

步骤4:判断结果是否收敛到纳什均衡。接下来的连续两次迭代中如果各参与者得到的最优结果相同,即 $(P_{WT}^j, P_{PV}^j, P_C^j) = (P_{WT}^{j-1}, P_{PV}^{j-1}, P_C^{j-1}) = (P_{WT}^*, P_{PV}^*, P_C^*)$, 此时就是纳什均衡状态。

步骤5:输出最优解 $(P_{WT}^*, P_{PV}^*, P_C^*)$ 以及博弈3方的收益 (F_{WT}, F_{PV}, F_C) 。

4 案例分析

4.1 负荷需求

以江苏某地区的IES为例,用户的冷热电负荷需求分为春季、夏季、秋季和冬季4个时期。选取典型的日负荷曲线进行分析,如图3所示^[18]。可以看出,冬夏和春秋电负荷需求相对一致,都是09:00—16:00相对较高,其他时段电负荷需求相对较低,总体需求较为平稳。热负荷方面,主要为冬季典型日,21:00—次日10:00为热负荷需求高峰期,10:00—21:00热负荷相对较低。冷负荷方面,主要为夏季典型日,01:00—24:00都为冷负荷高峰,需求相对平稳。

4.2 参数设定

该IES中主要相关参数如表1和表2所示。微型燃气轮机和燃气锅炉用气价格设定为2.6元/m³,冷、热价格分别为0.68和0.71元/(kW·h)^[19]。

表1 相关参数1

参数	取值
天然气热值/(kW·h)/m ³	10
微型燃气轮机电输出系数	0.4
微型燃气轮机热输出系数	0.5
燃气锅炉制热系数	0.8
吸收式制冷机制冷系数	0.8
贴现率	0.05

4.3 结果分析

4.3.1 博弈结果分析

为了分析在多投资主体参与供能的情况下,各

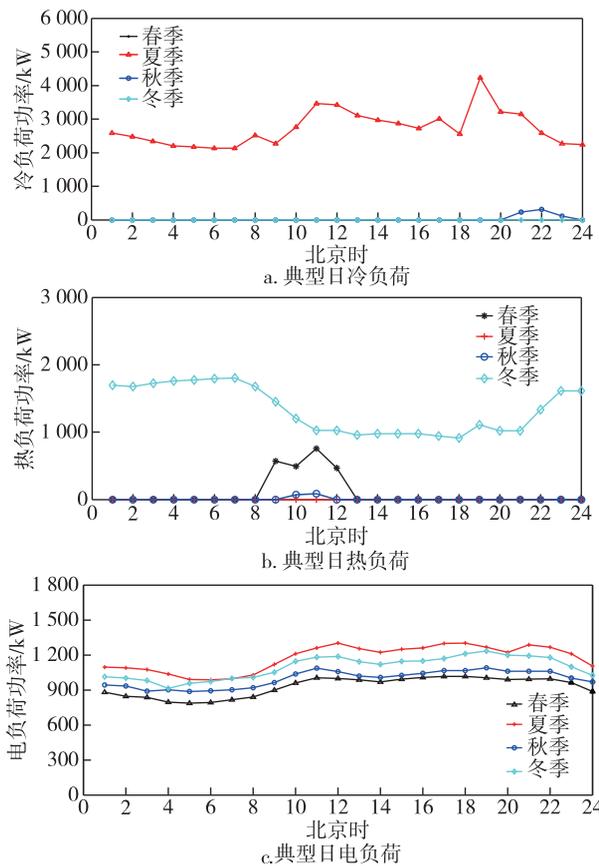


图3 典型日逐时负荷

Fig. 3 Hourly loads of typical days

表2 相关参数2

Table 2 More related parameters of IES

设备	建设成本/ (元/kW)	维护成本/ (元/kW)	折旧收入/ (元/kW)	年限/a
风电设备	6 000	30	400	20
光伏设备	8 000	45	700	25
燃气锅炉	900	0.174	80	15
吸收式制冷机	1 100	0.155	100	15
微型燃气轮机	6 300	0.16	500	15

方如何合作能够在满足用户负荷的前提下,各方均获得最大收益,分别设置3种场景进行分析——非博弈场景、非合作博弈场景以及合作博弈场景。在非合作博弈中,各博弈参与者在相同环境下,做出符合自身利益的独立决策,以最大化自己效益为目标^[20]。而在合作博弈中,各参与者首先是整体理性,目标是整体收益最佳,同时使参与者满意^[21]。为合作成立,需要保证各参与者的收益不低于非合作博弈的结果。结果见表3、图4和图5。

表 3 设备投资者单位容量收益

Table 3 Return per unit capacity for equipment investors

设备投资者	非博弈收益	非合作博弈	合作博弈
风电设备	1 261.1	1 413.9	1 513.3
光伏设备	233.5	349.3	510.8
冷热电联供设备	29.3	33.0	36.5

由表 3 可知:合作博弈场景下的各投资者设备单位容量收益值最大;非合作博弈场景下的各投资者设备单位容量收益值次之;非博弈场景的各投资者设备单位容量收益值最小.图 4 和图 5 为各场景下的投资者容量优化结果和收益优化结果,具体分析如下:

1) 非博弈场景

该场景下各投资者独立决策,其收益值相对最小,容量配置值相对最大.风电、光伏以及冷热电联供设备的收益分别为 338 万元、46 万元以及 24 万元,整体收益为 408 万元.风电、光伏以及冷热电联供设备的容量配置值分别为 2 680、1 970 和 8 198 kW.风电、光伏以及冷热电联供设备投资主体的单位容量收益值为 1 261、233.5 和 29.3 元/kW.该场景未充分考虑 3 个决策主体间的利益关系,相互独立、各自配置,没有博弈、没有合作,忽视了不同投资者容量配置容易出现相互覆盖现象,从而造成能源浪费.

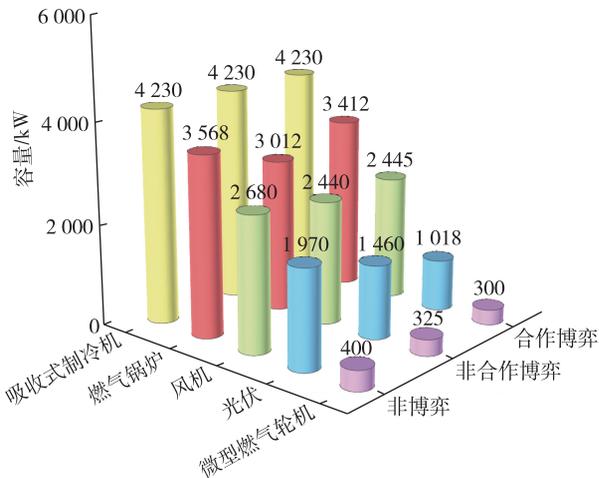


图 4 容量优化结果

Fig. 4 Capacity optimization results

2) 非合作博弈场景

该场景下各投资者收益值相对较大,容量配置值相对非博弈场景较小.风电、光伏以及冷热电联供设备的收益分别为 345 万元、51 万元以及 25 万元,整体收益为 421 万元.风电、光伏、冷热电联供设备

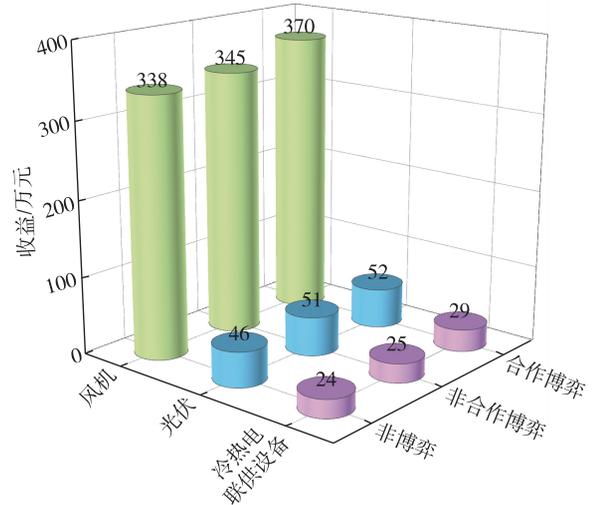


图 5 收益优化结果

Fig. 5 Revenue optimization results

的容量配置值分别为 2 440、1 460 和 7 567 kW.风电、光伏以及冷热电联供设备投资主体的单位容量收益值为 1 413.9、349.3 和 33.0 元/kW.在该场景中 3 个主体间的决策相互影响.决策分为 2 个部分:第 1 部分投资者根据对电力需求负荷的预测,计算自己的最优收益,然后优化机组装机容量;第 2 部分投资者根据冷热需求负荷的预测,计算自己的最优收益,然后优化机组装机容量.

3) 合作博弈场景

该场景下各投资者收益值相对最大,容量配置值相对最小.风电、光伏以及冷热电联供设备的收益分别为 370 万元、52 万元以及 29 万元,整体收益为 451 万元.风电、光伏以及冷热电联供设备的容量配置值分别为 2 445、1 018 和 7 942 kW.风电、光伏以及冷热电联供设备投资主体的单位容量收益值分别为 1 513.3、510.8 和 36.5 元/kW.在该场景下,3 个投资主体形成联盟,将多于非合作博弈场景的收益进行再分配.结果表明,合作博弈场景下可实现最优收益,且各参与者有明显的合作可能性.此场景下具有最大的整体收益,也进一步体现了多方参与供能市场的合理性.

4.3.2 供需平衡分析

通过上述 3 种场景分析可知,系统的最优配置模式是合作博弈模式.为进一步分析该场景下的系统供需平衡情况,选取夏季、冬季、秋季 3 个典型日,分别分析各典型日对应的冷、热、电负荷的供需平衡,如图 6 所示.

由图 6a 可以看出,冷负荷需求通过吸收式制冷

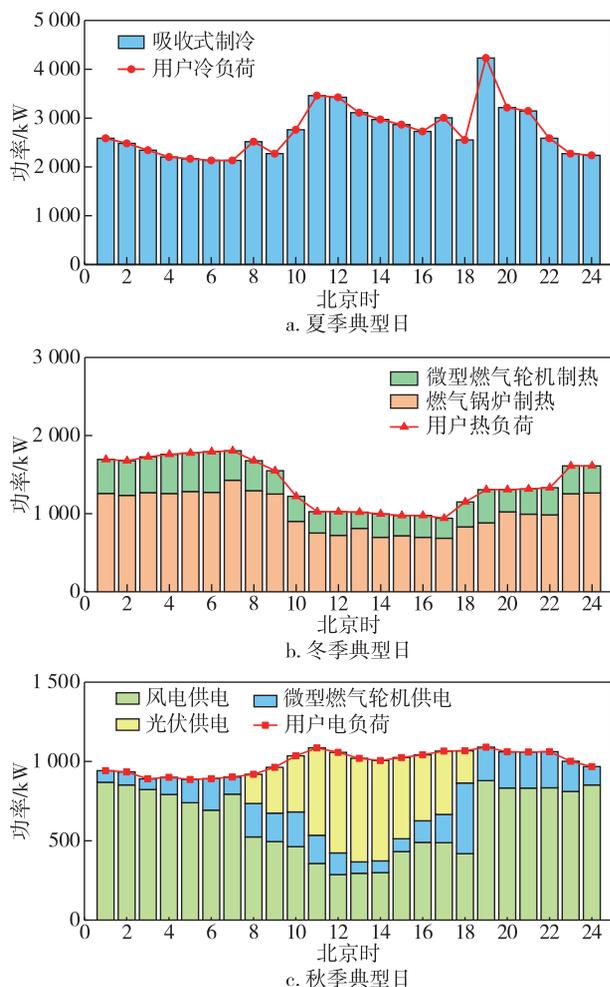


图6 供需平衡

Fig. 6 Balance between supply and demand

机满足.图6b中,因为燃气锅炉可以提供比微型燃气轮机效率更高的热输出,所以热负荷需求主要由燃气锅炉提供,微型燃气轮机辅助供热.图6c中:白天主要由光伏和风电设备供电,微型燃气轮机作为补充;夜间大部分由风电设备供电,微型燃气轮机辅助供电,电网作为备用.

5 结论

本文构建了风电、光伏以及冷热电联供设备组成的IES容量配置博弈模型,通过非博弈、非合作博弈以及合作博弈3种场景的对比分析,得出以下结论:

1)通过求解不同博弈模式下的纳什均衡解,在IES容量配置中,多投资主体之间采取合作博弈模式,能实现自身与整体的经济效益最大化.

2)合作博弈时,3方投资主体形成联盟,将多于非合作博弈场景的收益进行再分配,进而实现最优

收益,这为多方参与供能市场提供了解决思路.

3)在合作博弈模式下,IES的冷负荷需求可由吸收式制冷机满足;热负荷需求主要由燃气锅炉提供,微型燃气轮机辅助供热;电能供应中,系统更高比例地接纳了风电、光伏设备所发出的电,提升了可再生能源的利用率.

未来研究可考虑加入储能装置,以更好地实现调峰功能及提高IES效率.

参考文献

References

- [1] 赵超,王斌,孙志新,等.基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J].太阳能学报,2022,43(1):256-262
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(1): 256-262
- [2] 汪露露,吴红斌,周亦尧.基于供能可靠性的综合能源系统优化配置[J].太阳能学报,2021,42(12):395-400
WANG Lulu, WU Hongbin, ZHOU Yiyao. Optimal configuration of integrated energy system based on energy supply reliability [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(12): 395-400
- [3] Gu W, Wu Z, Bo R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 26-37
- [4] Yang J J, Guo B Q, Qu B. Economic optimization on two time scales for a hybrid energy system based on virtual storage [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 1004-1014
- [5] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3306
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306
- [6] 郭洋,吴峰,许庆强,等.风-光-储系统在不同运营模式下的最优容量配置策略及考虑网损补贴的经济性分析[J].智慧电力,2019,47(1):26-33
GUO Yang, WU Feng, XU Qingqiang, et al. Optimal capacity allocation strategy for wind-PV-ES system with different operation modes and its economic analysis considering network loss subsidy [J]. Smart Power, 2019, 47(1): 26-33
- [7] 郭旭升,文汀,林湘宁,等.面向多利益主体的清洁能源化大型离网海岛源储一体化优化定容[J].中国电机工程学报,2019,39(增刊1):1-14
GUO Xusheng, WEN Ting, LIN Xiangning, et al. Integration capacity optimization of multi-stakeholder generation-storage on large-scale off-grid island [J]. Pro-

- ceedings of the CSEE, 2019, 39(sup1):1-14
- [8] 刘连光,潘明明,田世明,等.考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J].中国电机工程学报, 2017, 37(6):1618-1626
LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of an competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6):1618-1626
- [9] Balagopalan S, Anooja V S. Cooperative game theory for sharing transmission charges in electricity markets[C]// IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2011), 2011:1-6
- [10] 金顺平,房方,朱仲晏,等.不同投资模式下计及缺电率约束的微网容量配置博弈分析[J].中国电力, 2020, 53(8):173-181
JIN Shunping, FANG Fang, ZHU Zhongyan, et al. Game analysis of microgrid capacity configuration for different investment modes constrained by loss of power supply probability[J]. Electric Power, 2020, 53(8):173-181
- [11] 程孟增,唐一金,商文颖,等.风-光-火-抽蓄联合系统中抽水蓄能电站最佳容量配置[J].电力建设, 2021, 42(11):72-81
CHENG Mengzeng, TANG Yijin, SHANG Wenying, et al. Optimal capacity configuration of pumped-storage power station in wind-PV-fire-pump storage system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11):72-81
- [12] Wang Y R, Luo Y N. Research of wind power correlation with three different data types based on mixed copula [J]. IEEE Access, 2018, 6:77986-77995
- [13] Luo F J, Ranzi G, Wang X B, et al. Social information filtering-based electricity retail plan recommender system for smart grid end users[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):95-104
- [14] 刘娇扬,郭力,杨书强,等.配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J].电网技术, 2018, 42(9):2806-2815
LIU Jiaoyang, GUO Li, YANG Shuqiang, et al. Optimal sizing for multi PV-ESS microgrids in distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2806-2815
- [15] 赵瑞锋,王海柱,郭文鑫,等.含风电接入的区域综合能源系统电/热储能配置[J].南方电网技术, 2022, 16(4):68-77
ZHAO Ruifeng, WANG Haizhu, GUO Wenxin, et al. Power and heat storage configuration of regional integrated energy system with wind power integration[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4):68-77
- [16] 张富平,李志宏,常好晶,等.计及分布式电源不确定性的微网储能容量博弈优化[J].可再生能源, 2019, 37(7):1042-1048
ZHANG Fuping, LI Zhihong, CHANG Haojing, et al. Game-based optimization of energy storage capacity for micro-grid considering uncertainty of distributed generation[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7):1042-1048
- [17] 白凯峰,顾洁,彭虹桥,等.融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J].电力系统自动化, 2018, 42(15):133-141
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):133-141
- [18] 吴红斌,庄怀东,朱新超.基于2层协调调度的风光储柴优化配置研究[J].中国电力, 2016, 49(9):142-147
WU Hongbin, ZHUANG Huaidong, ZHU Xinchao. Research on optimal allocation of PV-wind-storage-diesel based on two layers of coordinated dispatch[J]. Electric Power, 2016, 49(9):142-147
- [19] 任洪波,侯亚群,李琦芬,等.基于博弈论的多能互补综合能源系统规划设计方法[J].科学技术与工程, 2021, 21(5):1812-1819
REN Hongbo, HOU Yaquin, LI Qifen, et al. Planning and design method of multi-energy complementary energy system based on game theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5):1812-1819
- [20] Liu X F, Gao B T, Zhu Z Y, et al. Non-cooperative and cooperative optimisation of battery energy storage system for energy management in multi-microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10):2369-2377
- [21] 王树东,杜巍,林莉,等.基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J].电力系统保护与控制, 2018, 46(1):129-137
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1):129-137

Capacity allocation of integrated energy system involving multiple investors

HOU Jianmin^{1,2} DING Suyun¹ YU Weijie¹ XU Zhihao¹ LI Zhi¹ MENG Ying¹

1 School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Energy system integrated new energies such as wind power and photovoltaic to achieve complementary energy supply of electricity, heat and cold has attracted much concern. When multiple investors are involved in the operation of integrated energy system as independent subjects, it is worthwhile to reasonably allocate the capacity to better absorb new energy and maximize the interests of each investor. Based on the Nash equilibrium principle of game theory, this study establishes a capacity allocation game model for the integrated energy system composed of wind power, photovoltaic, and a combined cooling heating and power system, and uses Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to solve it. The comparative analysis of three scenarios including non-game, non-cooperative game and cooperative game shows that in the cooperative game scenario, the system generates optimal results in investors' return, capacity allocation, and overall system return, thus each participant has obvious possibility to cooperate. This study provides a solution for multi-party participation in the energy supply market.

Key words integrated energy system (IES); capacity allocation; system optimization; cooperative game