

# 基于非合作博弈的多能量枢纽优化运行方法

魏春<sup>1</sup>,徐向志<sup>1</sup>,王国烽<sup>1</sup>,张有兵<sup>1</sup>,潘红武<sup>2</sup>,黄晓明<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023;2. 国网湖州市供电公司,浙江 湖州 313099)

**摘要:**能量枢纽(EH)可以促进不同形式的能源载体协同运行,是加快泛在电力物联网关键技术研究的重点。提出了一种基于非合作博弈的多EH优化运行方法,将包含多能源系统的单个园区抽象为一个EH,对EH中的能源生产、转换及储能设备进行建模,建立多能协同运行的EH框架;在此基础上,构建基于纳什均衡的多EH非合作博弈模型,各EH以日运行成本最小为目标函数与其他EH参与博弈,分析各EH中设备出力和负荷平衡情况。基于MATLAB进行仿真运行,结果表明多个EH之间能充分利用区域间负荷互补特性,使各EH在优化个体运行成本的同时,提高系统的灵活性。

**关键词:**能量枢纽;多能源系统;非合作博弈;动态优化;纳什均衡

**中图分类号:**TM 732

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202009016

## 0 引言

传统能源行业产能过剩等问题制约着我国供给侧的结构性改革,以能源互联网为核心的第三次工业革命是世界能源发展的必然趋势,是能源使用安全、高效、清洁的必经之路<sup>[1]</sup>。目前,不同能源子系统之间大多不具备联合运行的功能,不同能源之间的耦合性和设备多样性给多能源系统的运行管理带来了巨大的挑战。针对上述问题,能量枢纽EH(Energy Hub)作为一种未来能源网络愿景被提出,其高度抽象地分类能源供应与用能需求,实现了多能源的转化、调度与存储<sup>[2]</sup>。相邻EH参与能源交易可实现网损、变动成本、固定成本等费用的合理分摊,提高自身的运行效益及区域多能源系统的稳定性<sup>[3]</sup>。多个EH构成的能源交易市场和购售电决策受不同利益主体的市场行为影响,如何获取系统的最优决策成为区域能源市场研究的热点。

目前,我国对多能源系统的研究处于起步阶段,研究内容大多集中于系统建模与容量配置,较少有研究关注EH之间交易对系统运行造成的影响。文献[4-6]以混合能源系统为研究对象,提出了优化调度模型及优化方法;文献[7]提出了能源互联网的一体化控制方法,给出了面向局域能源互联网的各类典型应用场景,构建了局域能源互联网的分层分级体系结构;文献[8-9]基于EH的概念,构建了电-气-热多能流综合求解模型。上述文献主要集中于研究单个EH的优化运行问题,但对多个EH联合优化运行的问题考虑较少。

不同能源主体之间有较强的隐私保护,从而较难形成合理有效的调度中心,采用博弈方法可以解决多个EH协同运行的相关问题。作为直接利益主体,EH将会拥有更大的自主权,EH的智能化将随着信息技术的发展而大幅度提高。文献[10-11]考虑了微网多运营商之间能源交易的行为,提出了分布式协调控制方案,制定了多微网联合优化策略,有效地降低了系统的运行成本;文献[12]提出基于市场主体需求的市场决策模型并进行求解,竞价策略逐渐达到均衡状态从而实现各方收益共赢和协调发展;文献[13-14]基于博弈理论分别对能源消费者和中心管理者之间的经济效益、多微网的最佳运行模式进行研究,并得到相关结论。上述文献只考虑售电商与用户之间的交易,由于EH既是售电商又是用户,需要重新考虑多个EH协同优化运行的问题。

综上所述,本文主要研究EH的优化运行和多个EH之间的功率交互问题。首先考虑EH交易策略的合理性,并提出多个EH之间的非合作博弈模型;然后,计算各参与者的功率交互策略;最后,利用实际数据仿真分析EH的优化运行结果及所提方法对EH经济性的影响,并验证所提能源交易博弈模型存在纳什均衡解。

## 1 多能源系统框架

EH是进行多种能源转换、调度、供给和存储的多能源载体,EH之间的协同优化是实现多种形式能源的综合管理,使能源在生产、传输、储存、消费等各个环节自由运行的关键技术。

本文所提EH由以下3个部分组成:①能源输入,包括天然气流量、可再生能源(风机、光伏)出力和电网供电;②能源转换,涉及燃气轮机、燃气锅炉、换热器、电制冷机和吸附式制冷机等设备;③储能系

收稿日期:2019-11-29;修回日期:2020-07-02

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)

统,主要为储能蓄电池。

本文所提多个EH互联系统的结构如图1所示,图中 $N$ 为EH总数。其中,EH为描述多能源系统中能源、负荷和网络之间交换与耦合关系的输入-输出模型,其输入为电力联络线输出电能 $P_{grid}$ 、天然气流量 $P_{gas}$ 和可再生能源输出电能 $P_{res}$ ,输出为用户冷负荷需求 $P_r$ 、热负荷需求 $P_h$ 和电负荷需求 $P_e$ ,EH模型可表示为:

$$P_{out} + H = CP_{in} \quad (1)$$

其中, $P_{out}$ 为EH输出负荷向量; $P_{in}$ 为EH输入一次能源向量; $C$ 为指定能源输出与输入的耦合关系矩阵; $H$ 为储能修正向量,以考虑储能系统对EH模型的影响<sup>[15]</sup>。

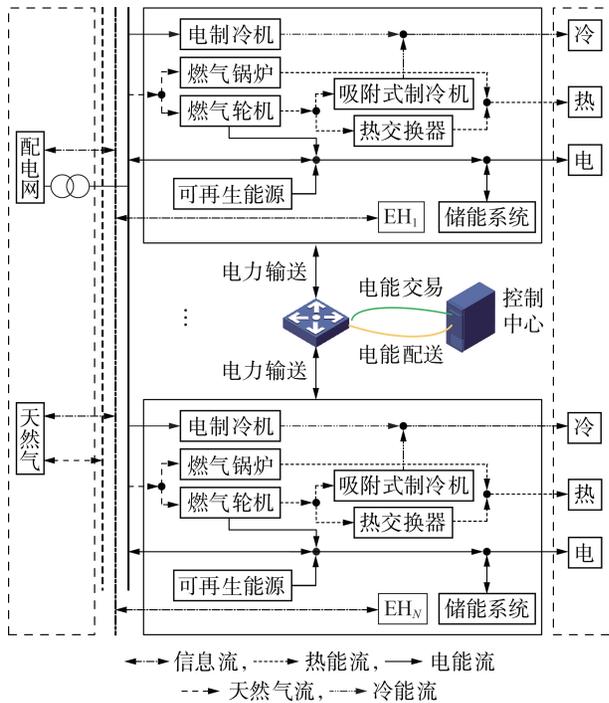


图1 多个EH互联系统的结构

Fig.1 Structure of interconnected system with multiple EHs

## 2 设备建模

### 2.1 能源转换设备

(1)燃气轮机是EH的核心设备,它将一次能源转换成电能,同时将余热回收进行供热制冷。 $t$ 时段 $EH_i$ 中燃气轮机的输出电功率 $P_{gt,i}^t$ 和余热回收量 $Q_{r,i}^t$ 为:

$$\begin{cases} P_{gt,i}^t = \eta_c F_{gas,i}^t \lambda_{gas} \\ Q_{r,i}^t = F_{gas,i}^t (1 - \eta_c) \eta_{rec} \\ P_{gt,i}^{\min} \leq P_{gt,i}^t \leq P_{gt,i}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $F_{gas,i}^t$ 为 $t$ 时段 $EH_i$ 中燃气轮机消耗的天然气量; $P_{gt,i}^{\min}$ 、 $P_{gt,i}^{\max}$ 分别为 $EH_i$ 中燃气轮机输出电功率的下限、上限; $\eta_c$ 、 $\eta_{rec}$ 分别为燃气轮机的发电效率、余热回收

效率; $\lambda_{gas}$ 为天然气热值。

(2)热交换器与吸附式制冷机为EH的热能回收装置,当热交换器输出的热功率不能满足用户热负荷需求时,由燃气锅炉提供剩余热功率;当冷负荷需求高于吸附式制冷机的制冷功率时,电制冷机将运行以满足用户的冷负荷需求。

冷负荷供能设备的模型为:

$$\begin{cases} P_{ar,i}^t = Q_{ar,i}^t \eta_{ar}, P_{ar}^{\min} \leq P_{ar,i}^t \leq P_{ar}^{\max} \\ P_{ec,i}^t = P_{ec,e,i}^t \eta_{ec}, P_{ec}^{\min} \leq P_{ec,i}^t \leq P_{ec}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{ar,i}^t$ 、 $P_{ec,i}^t$ 分别为 $t$ 时段 $EH_i$ 中吸附式制冷机、电制冷机的输出功率; $Q_{ar,i}^t$ 为 $t$ 时段 $EH_i$ 中吸附式制冷机的回收热量; $P_{ec,e,i}^t$ 为 $t$ 时段 $EH_i$ 中电制冷机消耗的电功率; $P_{ar}^{\min}$ 、 $P_{ar}^{\max}$ 和 $P_{ec}^{\min}$ 、 $P_{ec}^{\max}$ 分别为吸附式制冷机和电制冷机输出功率的下限、上限; $\eta_{ar}$ 、 $\eta_{ec}$ 分别为吸附式制冷机、电制冷机的运行效率。

热负荷供能设备的模型为:

$$\begin{cases} P_{he,i}^t = Q_{he,i}^t \eta_{he}, P_{he}^{\min} \leq P_{he,i}^t \leq P_{he}^{\max} \\ P_{gb,i}^t = F_{gb,i}^t \lambda_{gas} \eta_{gb}, P_{gb}^{\min} \leq P_{gb,i}^t \leq P_{gb}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{he,i}^t$ 、 $P_{gb,i}^t$ 分别为 $t$ 时段 $EH_i$ 中热交换器、燃气锅炉的输出功率; $Q_{he,i}^t$ 为 $t$ 时段 $EH_i$ 中热交换器的回收热量; $F_{gb,i}^t$ 为 $t$ 时段 $EH_i$ 中燃气锅炉消耗的天然气量; $P_{he}^{\min}$ 、 $P_{he}^{\max}$ 和 $P_{gb}^{\min}$ 、 $P_{gb}^{\max}$ 分别为热交换器和燃气锅炉输出功率的下限、上限; $\eta_{he}$ 、 $\eta_{gb}$ 分别为热交换器、燃气锅炉的运行效率。

燃气轮机的余热首先满足热交换器的余热需求,若燃气轮机的余热仍有剩余将供给吸附式制冷机使用进行制冷。其中,吸附式制冷机的回收热量、热交换器的回收热量与燃气轮机运行产生的余热量之间存在式(5)所示的约束关系。

$$Q_{ar,i}^t + Q_{he,i}^t \leq Q_{r,i}^t \quad (5)$$

### 2.2 储能系统

假设所有的储能系统都采用相同的锂电池组,并且认定其在一段时间内的充放电功率恒定。由此,建立储能系统电池充放电功率与储能电量之间的关系模型和约束条件分别如式(6)和式(7)所示。

$$S_{b,i}^{t+1} = \begin{cases} S_{b,i}^t (1 - \delta) + P_{ch,i}^t \eta_{ch} / N_{bess} & \text{充电} \\ S_{b,i}^t (1 - \delta) - P_{dch,i}^t / (\eta_{dch} N_{bess}) & \text{放电} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_b^{\min} \leq S_{b,i}^t \leq S_b^{\max} \\ P_{dch}^{\min} \leq P_{dch,i}^t \leq P_{dch}^{\max} \\ P_{ch}^{\min} \leq P_{ch,i}^t \leq P_{ch}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $S_{b,i}^t$ 、 $S_{b,i}^{t+1}$ 分别为 $EH_i$ 中的储能系统在 $t$ 、 $t+1$ 时段的剩余电量; $\delta$ 为储能系统的自放电率; $P_{ch,i}^t$ 、 $P_{dch,i}^t$ 分别为 $EH_i$ 中的储能系统在 $t$ 时段的充电、放电功率; $N_{bess}$ 为储能系统的容量; $S_b^{\min}$ 、 $S_b^{\max}$ 分别为储能系

统最低放电深度和最高允许电量;  $P_{ch}^{\min}$ 、 $P_{ch}^{\max}$  和  $P_{dch}^{\min}$ 、 $P_{dch}^{\max}$  分别为储能系统充电功率和放电功率的下限、上限;  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dch}$  分别为储能系统的充电、放电效率。

### 2.3 可再生能源出力

(1) 光伏出力的概率特性在一定的时段内近似服从 Beta 分布, 其概率密度函数  $f(r_t)$  为:

$$f(r_t) = \frac{\Gamma(\alpha_t + \beta_t)}{\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)} \left(\frac{r_t}{r^{\max}}\right)^{\alpha_t-1} \left(1 - \frac{r_t}{r^{\max}}\right)^{\beta_t-1} \quad (8)$$

其中,  $r_t$  为  $t$  时段太阳辐射度;  $r^{\max}$  为最大太阳辐射度;  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数;  $\alpha_t$ 、 $\beta_t$  为 Beta 分布的形状参数。根据式 (8) 可以得到光伏输出功率的概率模型  $f(P_{pv}^t)$  为:

$$f(P_{pv}^t) = \frac{\Gamma(\alpha_t + \beta_t)}{\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)} \left(\frac{P_{pv}^t}{P_{pv, \max}^t}\right)^{\alpha_t-1} \left(1 - \frac{P_{pv}^t}{P_{pv, \max}^t}\right)^{\beta_t-1} \quad (9)$$

其中,  $P_{pv}^t$  为  $t$  时段光伏输出功率;  $P_{pv, \max}^t$  为  $t$  时段光伏最大输出功率。

在上述模型的基础上, 首先基于历史数据拟合得到每一时段内光伏输出功率的 Beta 分布参数, 然后利用蒙特卡洛采样方法<sup>[16]</sup>生成一天内光伏的出力情况。

(2) 建立风电输出功率与风速  $v$  之间的函数关系式, 一般认为风速概率密度函数  $\rho(v)$  为:

$$\rho(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k \quad (10)$$

其中,  $k$  和  $c$  分别为随机风能发电模型的形状参数和比例参数。

由此可得风电输出功率  $P_{wt}$  模型为:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $P_r$  为风机的总装机容量;  $v_{ci}$ 、 $v_r$ 、 $v_{co}$  分别为切入风速、额定风速、切出风速。

## 3 非合作博弈模型

EH 之间为双向交易, 因此分布式控制十分适用于 EH 之间的经济优化运行<sup>[17-18]</sup>。由于可再生能源出力的不确定性及储能设备相对昂贵, EH 不可避免地会存在弃风弃光现象, 且 EH 均可能存在功率过剩、功率不足或刚好自给自足的情况, 因此每个 EH 均需参与能源交易, 在满足自身需求的同时, 提高新能源的消纳能力, 获取自身利益最大化。

### 3.1 系统运行成本

与其他能源形式相比, 电能具有更好的传递性与经济性, 各 EH 之间以联络线连接, 设定 EH 之间以电能为交易介质。

本文将 1 d 划分为 48 个时段 (即仿真时段总数  $T=48$ ), EH 的运行成本  $C_{total}$  包括燃料费用  $C_{fuel}$ 、购 (售) 电成本  $C_{grid}$ 、运维成本  $C_{run}$  和弃风弃光损失  $C_{ab}$ , 目标函数为最小化运行成本, 具体表示如下:

$$\min C_{total} = C_{fuel} + C_{grid} + C_{run} + C_{ab} \quad (12)$$

(1) 燃料费用。

$$C_{fuel} = M_{gas} \sum_{i=1}^T (F_{gas, i}^t + F_{gb, i}^t) \quad (13)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $M_{gas}$  为天然气价格。

(2) 购 (售) 电成本。

$$\begin{cases} C_{grid} = \sum_{i=1}^T (E_{grid, i}^t M_{grid} + E_{beh, i}^t M_{price}) \\ E_{grid}^{\min} \leq E_{grid, i}^t \leq E_{grid}^{\max} \\ E_{beh}^{\min} \leq E_{beh, i}^t \leq E_{beh}^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $E_{grid, i}^t$  为  $t$  时段 EH<sub>*i*</sub> 与电网交易的电功率,  $E_{grid}^{\max}$ 、 $E_{grid}^{\min}$  分别为其上、下限;  $E_{beh, i}^t$  为  $t$  时段 EH<sub>*i*</sub> 从相邻 EH 购 (售) 电功率,  $E_{beh}^{\max}$ 、 $E_{beh}^{\min}$  分别为其上、下限;  $M_{grid}$  为 EH 与电网交互电功率的电价;  $M_{price}$  为 EH 与其相邻 EH 间交互电功率的内部交易电价。

内部交易电价是 EH 参与交易的前提, 每个 EH 获取交易电价从而制定博弈策略。本文在基于 EH 内部能量补偿需求的基础上<sup>[19]</sup>, 根据多 EH 的整体净负荷定义构建交易电价为:

$$M_{price} = a \left( \sum_{i=1}^N P_{net, i} \right)^2 + b \sum_{i=1}^N P_{net, i} + d \quad (15)$$

$$P_{net, i} = P_{e, i} - (P_{wt, i} + P_{pv, i}) \quad (16)$$

其中,  $a$ 、 $b$ 、 $d$  为内部交易电价系数;  $P_{net, i}$  为日前 EH<sub>*i*</sub> 的净负荷电量;  $P_{e, i}$ 、 $P_{wt, i}$ 、 $P_{pv, i}$  分别为 EH<sub>*i*</sub> 的电负荷需求、风电输出功率、光伏输出功率。式 (15) 为 EH 参与交易的前提, 只有确定内部电价后, 每个 EH 才能计算自身的运行成本并制定博弈策略。每个 EH 获取分布式能源出力和用户负荷需求, 控制中心获取 EH 的净负荷信息, 从而确定内部交易电价。

(3) 运维成本。

$$C_{run} = \sum_{i=1}^T \left[ P_{pv, i}^t \gamma_{pv} + P_{wt, i}^t \gamma_{wt} + P_{gt, i}^t \gamma_{gt} + (P_{ch, i}^t + P_{dch, i}^t) \gamma_{bess} + P_{ar, i}^t \gamma_{ar} + P_{ec, i}^t \gamma_{ec} + P_{gb, i}^t \gamma_{gb} \right] \quad (17)$$

其中,  $\gamma_{pv}$ 、 $\gamma_{wt}$ 、 $\gamma_{gt}$ 、 $\gamma_{bess}$ 、 $\gamma_{ar}$ 、 $\gamma_{ec}$ 、 $\gamma_{gb}$  分别为光伏、风机、燃气轮机、储能系统、吸附式制冷机、电制冷机、燃气锅炉的单位功率运维系数。

(4) 弃风弃光损失。

$$C_{ab} = \sum_{i=1}^T P_{ab, i}^t M_{ab} \quad (18)$$

其中,  $P_{ab, i}^t$  为  $t$  时段 EH<sub>*i*</sub> 的弃风弃光功率;  $M_{ab}$  为单位功率的弃风弃光损失价格。

EH 内部组成单元的出力受自身和系统内部的约束, 在每一时段 EH 都要满足功率平衡约束, 即:

$$\begin{cases} P_{wt,i}^t + P_{gt,i}^t + P_{pv,i}^t + E_{grid,i}^t + E_{beh,i}^t + P_{dch,i}^t = \\ P_{e,i}^t + P_{ch,i}^t + P_{ece,i}^t + P_{ab,i}^t \\ P_{he,i}^t + P_{gh,i}^t = P_{li}^t \\ P_{ar,i}^t + P_{ec,i}^t = P_{ri}^t \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $P_{li}^t$ 、 $P_{ri}^t$  分别为  $t$  时段 EH<sub>*i*</sub> 的热负荷需求、冷负荷需求。

### 3.2 博弈模型

EH 之间的功率交互问题本质上是 EH 的购售电博弈行为,基于目标函数式(12),多 EH 之间的非合作博弈可以表述为  $S = \{N, \{A_i\}_{i \in N^+}, \{U_i\}_{i \in N^+}\}$ , 具体描述如下。

(1) 博弈参与者。

参与者为功率交易的决策主体,表示为  $N^+ = \{1, 2, \dots, N\}$ , 单个 EH 通过电量交易  $E_{grid} = \{E_{grid,i}^t | t = 1, 2, \dots, T; i \in N^+\}$ ,  $E_{beh} = \{E_{beh,i}^t | t = 1, 2, \dots, T; i \in N^+\}$  达到其运行经济性最优的目的。

(2) 策略。

每个参与者的策略集合为  $A_i$ , 策略  $a_i$  为 EH<sub>*i*</sub> (即第  $i$  个参与者) 的系统运行决策变量,可表示为  $a_i = \{P_{gt,i}^t, P_{ch,i}^t, P_{dch,i}^t, P_{he,i}^t, P_{gh,i}^t, P_{ar,i}^t, P_{ec,i}^t, E_{grid,i}^t, E_{beh,i}^t\}$ 。且 EH 各个决策空间应满足相应变量的约束条件,即满足式(2)~(7)。第  $i$  个参与者在区域能源交易市场提交自身的交易电量,每个参与者通过调整交易电量使自身利益最大化。

(3) 收益。

第  $i$  个博弈参与者的收益  $U_i$  不仅取决于自身交易电量的策略,也与其他参与者的策略相关,是一个策略组合函数,本文将其定义为与所有电量交易策略相对应的收益的集合,因此第  $i$  个参与者在选择策略  $a_i$  后的收益函数可表示为:

$$U_i = -C_{total} \quad (20)$$

### 3.3 纳什均衡解的存在性

所有参与者的目标均为寻求  $U_i$  的最大化,第  $i$  个参与者根据其他参与者选择的售电策略  $a_{-i}$  (下标  $-i$  表示除第  $i$  个参与者外的其余博弈参与者) 选择适合自身经济性的售电策略  $a_i$ 。考虑本文所提非合作博弈问题  $S = \{N, \{A_i\}_{i \in N^+}, \{U_i\}_{i \in N^+}\}$ , 策略向量  $\mathbf{a}^*$  是纳什均衡点的充分必要条件为:对于第  $i$  个参与者而言,需满足  $U_i(\mathbf{a}_i^*, \mathbf{a}_{-i}^*) \geq U_i(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_{-i}^*) (\forall \mathbf{a}_i \in A_i, \forall i \in N^+)$ , 其中  $U_i(\mathbf{a}_i^*, \mathbf{a}_{-i}^*)$  为纳什均衡点  $(\mathbf{a}_i^*, \mathbf{a}_{-i}^*)$  的效用函数,  $U_i(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_{-i}^*)$  为除了第  $i$  个参与者以外其他参与者的策略确定时第  $i$  个参与者的效用函数。

根据纳什均衡点存在性定理,在  $N$  个参与者的博弈问题中,若每一个参与者的纯策略集合  $A_i$  是欧氏空间的非空紧致凸子集,且每一个效用函数  $U_i(\mathbf{a}_i)$

关于  $a_i$  连续且关于  $A_i$  拟凹,则该博弈问题存在一个纯策略纳什均衡点。

因此,为了证明本文所提非合作博弈模型存在纳什均衡点,需要证明所有参与者的售电博弈策略集合  $A_i$  是非空紧致凸子集且相应的收益函数是一个连续拟凹函数,详细证明过程见附录 A。

### 3.4 博弈求解流程

本文所提多个 EH 非合作博弈模型运行求解的流程见图 B1,具体步骤如下。

(1) 输入系统信息并进行参数设置,获取用户侧负荷需求信息并进行可再生能源出力预测。

(2) 根据图 B1 所示求解流程,每个参与者在  $t$  时段选取一个策略  $a_i^t$  作为自身的起始参与策略。

(3) 以最大化自身效用函数为目标,在满足自身各设备运行约束的条件下,利用内点法求解最优策略并计算自身效用函数  $U_i$ ,得到自身系统的运行信息。

(4) 获取自身系统的运行信息,每个参与者更新自身策略  $a_i^t$ ,并重新计算自身效用函数  $U_i$ 。

(5) 重复迭代,直到各参与者都确定了  $[t+1, t+2, \dots, T]$  内自身的运行控制策略。判断自身相邻 2 次策略是否相同,如果相同,则表明该策略为纳什均衡点,参与者按照策略向量  $\mathbf{a}^*$  运行,并计算自身的效用函数  $U_i$ ; 如果不相同,则表明自身策略并未达到最优,重复步骤(3)~(5)。

## 4 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性,以杭州 4 个具有代表性的工业园区作为研究对象。上述所提非合作博弈模型实质为线性带约束的混合整数规划问题,在 MATLAB 中采用 YALMIP 和 CPLEX 求解器进行建模与求解。

EH 包含电制冷机、燃气轮机、吸附式制冷机、储能系统、燃气锅炉、光伏、风机等,具体情景分类及容量配置见附录 C 中表 C1。本文充分考虑了可再生能源出力的不确定性,利用某地区典型季节各个时段光伏电站、光照直接辐射、太阳辐射角度以及风电场风速的实测数据作为预测算法的数据来源。典型日内可再生能源出力曲线和常规用电负荷需求曲线如附录 C 中图 C1 所示。

EH 之间通过联络线相连接,进行电功率交互,由于 EH 之间距离较近,本文不考虑区域 EH 联络线的传输功率损失,EH 与电网交易和从相邻 EH 购售电功率的最小值、最大值分别为  $-1500$ 、 $1000$  kW。当 EH 中可再生能源的电功率不能满足系统负荷需求或发电量存在剩余时,优先考虑从其他 EH 购售电。EH 与电网交互电功率电价的确定较为复杂,根据我国政策,不同地区不同新能源的上网电价均

不相同,从多能源系统角度制定与电网功率交易的电价较为困难,因此目前大多选取微网上网电价为标准进行电能交易。EH在峰时段(08:00—11:00, 18:00—23:00)向电网售电的电价为0.65元/(kW·h),购电电价为0.83元/(kW·h);在平时段(07:00—08:00以及11:00—18:00)向电网售电的电价为0.38元/(kW·h),购电电价为0.49元/(kW·h);在谷时段(23:00至次日07:00)向电网售电电价为0.13元/(kW·h),购电电价为0.17元/(kW·h)<sup>[20]</sup>。系统的其他参数选择见附录C中表C2,系统净负荷曲线见附录C中图C2。

采取本文所提方法对上述系统进行运行优化,优化调度周期为24 h,时段间隔为0.5 h。系统运行优化结果如附录C中图C3和图2所示(图2(c)、(d)中EH的功率为正时表示购电,为负时表示售电)。

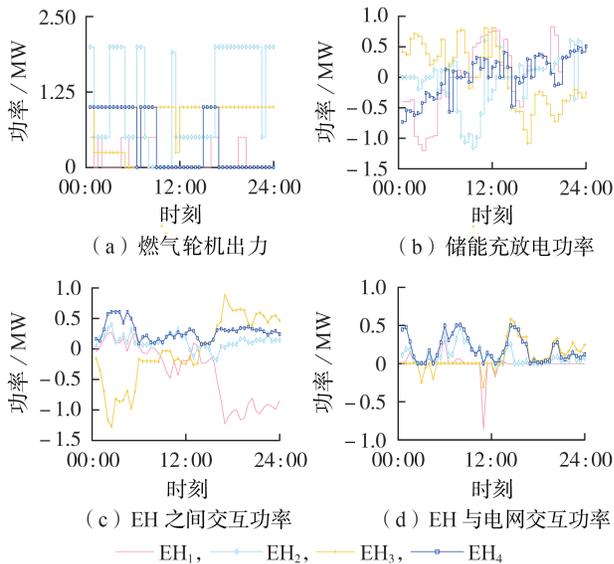


图2 优化运行结果

Fig.2 Optimal operation results

附录C中图C3为冷、热负荷及各设备出力情况。由图C3可知,EH<sub>1</sub>和EH<sub>3</sub>中的冷负荷平衡由吸附式制冷机和电制冷机两部分协助完成,当吸附式制冷机的输出功率不能够满足冷负荷需求时,由电制冷机进行补冷;EH<sub>1</sub>和EH<sub>2</sub>中的热负荷由热交换器和燃气锅炉提供,当热交换器的输出热功率不能满足热负荷需求时,由燃气锅炉进行补热。结合图2可知,EH<sub>1</sub>进行能源交易后可满足自身电负荷需求,因此燃气轮机出力较少,主要由燃气锅炉维持热负荷平衡;EH<sub>2</sub>进行能源交易后仍处于缺电状态,由燃气轮机输出功率进行补电,因此EH<sub>2</sub>主要由热交换器维持热负荷平衡。

内部交易电价曲线见附录C中图C4。由图2(a)、(b)和图C4可知,在04:00—05:00、16:00—17:00、20:00—21:00时段,由于内部交易电价较高,

处于缺电状态的EH通过调节储能系统和燃气轮机出力,减少了自身的购电费用,有剩余电能的EH无法以高电价售出多余电功率,只能进行电功率储存,同时EH之间的能源交易减少。

以EH<sub>1</sub>为例,由图2(c)、(d)可知,在00:00—06:00、13:00—13:30时段内EH<sub>1</sub>均处于缺电状态,首先在内部市场寻求交易,同时调用储能满足电负荷需求,需特别注意的是,在12:00—13:30时段内,由于系统内部交易电价较低,EH<sub>1</sub>在内部交易市场购买电能满足自身需求并进行存储;在其余时段内,EH<sub>1</sub>均存在多余电功率,所以在内部市场售卖多余电功率,同时根据交易电价实时调用储能系统买卖电能,从而最大化自身经济效益。其余EH的分析与EH<sub>1</sub>类似,不再赘述。

结合附录C中图C3和图2(c)、(d)可以看出,在10:00—12:30时段内,光伏出力占比较大,只有EH<sub>2</sub>和EH<sub>4</sub>处于缺电状态,首先从EH<sub>1</sub>和EH<sub>3</sub>进行购电,若仍不能满足电负荷需求再向电网购电;EH<sub>2</sub>和EH<sub>4</sub>在满足自身负荷需求后,在其他参与者购买电能时积极进行市场交易。在16:00—24:00时段内,风机出力占比较大,EH<sub>1</sub>处于多电状态,EH<sub>2</sub>—EH<sub>4</sub>从能源市场和电网购电并调用储能系统维持自身电负荷平衡。

为了验证本文所提方法的有效性,对比本文所提优化运行方法与单独运行方法(即各个EH之间不进行功率交互)下每个EH的日运行成本,结果如表1所示。

表1 不同方法下EH的日运行成本

Table 1 Daily operation costs of EHs under different methods

方法	日运行成本/元			
	EH <sub>1</sub>	EH <sub>2</sub>	EH <sub>3</sub>	EH <sub>4</sub>
单独运行方法	16031.80	54508.80	42587.55	15680.10
本文方法	14689.73	53347.80	40063.34	14758.70

由表1可以看出,相较于单独运行方法,本文所提优化运行方法下EH<sub>1</sub>—EH<sub>4</sub>的运行费用分别降低了8.4%、2.1%、5.9%、5.8%,这是因为采用非合作博弈后增强了各EH之间的能量调度协调性,减少了购电成本及设备运行成本,从而降低了EH的运行成本。

## 5 结论

本文针对多个EH实时能源管理问题,提出了多个EH之间的非合作博弈模型,证明了纳什均衡在所述非合作博弈问题中的存在性,并提出一种基于非合作博弈的多EH优化运行方法,使EH之间通过策略合理地进行功率交互。算例结果表明,同一配电网下EH构成能源交易市场,通过非合作博弈

的多能协同模型可提高系统运行的灵活性与可靠性,有效降低了EH的运行成本。在未来的区域多能源交易市场中,本文所提方法有助于分析市场参与者的均衡策略,培育新的利润增长点和市场业态。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [ 1 ] GLOWACKI-DUDKA M. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[J]. *Adult Learning*, 2013, 24(1): 50-51.
- [ 2 ] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(1): 24-30.
- [ 3 ] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7185-7194.  
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7185-7194.
- [ 4 ] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(12): 33-38, 52.  
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [ 5 ] LIU Y, LI Y Z, GOOI H B, et al. Distributed robust energy management of a multimicrogrid system in the real-time energy market[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 396-406.
- [ 6 ] 刘天琪, 卢俊, 何川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 261-268.  
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 261-268.
- [ 7 ] 王继业, 李洋, 路兆铭, 等. 基于能源交换机和路由器的局域能源互联网研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13): 3433-3439.  
WANG Jiye, LI Yang, LU Zhaoming, et al. Research on local-area energy internet control technology based on energy switches and energy routers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13): 3433-3439.
- [ 8 ] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 171-178.  
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 171-178.
- [ 9 ] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 基于多层电价响应机制的主动配电网源-网-荷协调方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(5): 9-17, 24.  
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-grid-load coordination method for active distribution network based on multi-level electricity price response mechanism[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 9-17, 24.
- [ 10 ] LIU W, GU W, WANG J H, et al. Game theoretic non-cooperative distributed coordination control for multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6986-6997.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 马天男, 杜英, 苟全峰, 等. 基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(6): 192-204.  
MA Tiannan, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Non-cooperative competition game model of multiple subjects in electricity market based on Berge-NS equilibrium[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(6): 192-204.
- [ 13 ] MA L, LIU N, ZHANG J H, et al. Real-time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1227-1242.
- [ 14 ] LIN Y, DONG P, SUN X L, et al. Two-level game algorithm for multi-microgrid in electricity market[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(14): 1733-1740.
- [ 15 ] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5669-5681.  
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [ 16 ] WANG Q F, GUAN Y P, WANG J H. A chance-constrained two-stage stochastic program for unit commitment with uncertain wind power output[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 206-215.
- [ 17 ] 刘洪, 陈星屹, 李吉峰, 等. 基于改进 CPSO 算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 193-200.  
LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 193-200.
- [ 18 ] 檀勤良, 丁毅宏. 考虑碳交易的火电节能调度优化模型及应对模式[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(7): 175-181, 188.  
TAN Qinliang, DING Yihong. Optimal energy-saving dispatching model for thermal power considering carbon trading and its coping mode[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7): 175-181, 188.
- [ 19 ] 任帅杰, 杨晓东, 张有兵, 等. 不确定性环境下基于可调度能力的微电网优化运行实时控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23): 6866-6877.  
REN Shuaijie, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. A real time optimization strategy for microgrid integrated with schedulable ability and uncertainties[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 6866-6877.
- [ 20 ] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 36-44.  
XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering

## Power flow calculation method of integrated electricity and heat system based on power conservation principle

SUN Hongyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Peichao<sup>1,2</sup>, DU Wei<sup>3</sup>, LIU Xuezhai<sup>1,2</sup>, HE Guoxin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Power flow calculation represents the basis to analyze the steady-state operation of an integrated electricity and heat system. The multi-energy flow coupling caused by CHP (Combined Heat and Power) and other coupling components results in complicated calculation of combined power flow. Regarding the existing combined power flow calculation approach, the integrated approach suffers from the issues of huge computation burden and ill-conditioned Jacobian matrix. However, the decomposed approach is difficult to proof the algorithm convergence, and its iterative divergence issue cannot be well addressed. Hence, addressing these issues is of interest. For the system in which the slack node is connected with coupling units, the iterative formula of the slack nodes that respectively belong to heat network and the electricity network is derived according to the power conservation principle. Based on this, the convergence property of the decomposed method is analyzed, and the iterative fixed point is considered as an analytical solution of the slack node. Subsequently, a new method of combined power flow analysis is developed. Finally, simulative results of integrated electricity and heat systems prove that the proposed approach is efficient and accurate. It can also be used to solve the divergence problem of decomposition approaches. In addition, the feasible region of coupling parameters is estimated.

**Key words:** integrated electricity and heat system; power flow calculation; power conservation principle; fixed point; convergence

(上接第53页 continued from page 53)

ring power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.

### 作者简介:

魏 春(1987—),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电及新能源优化控制、微电网、智能电网(E-mail: chunwei18@zjut.edu.cn);

徐向志(1994—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研



魏 春

究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: xz\_940626@163.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)

## Non-cooperative game-based optimal operation method of multiple energy hubs

WEI Chun<sup>1</sup>, XU Xiangzhi<sup>1</sup>, WANG Guofeng<sup>1</sup>, ZHANG Youbing<sup>1</sup>, PAN Hongwu<sup>2</sup>, HUANG Xiaoming<sup>2</sup>

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

2. State Grid Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313099, China)

**Abstract:** The EH (Energy Hub) can promote the cooperative operation of different forms of energy carriers and is the key point to accelerate the research on key technologies of ubiquitous power internet of things. A non-cooperative game-based optimal operation method of multiple EHs is proposed. The single park containing multi-energy system is abstracted into an EH, and the energy production, conversion and storage equipment in EH are modeled, so as to establish the EH framework for multi-energy cooperative operation. On this basis, the non-cooperative game model of multiple EHs based on Nash equilibrium is constructed. Each EH participates in the game with other EHs with the objective function of minimizing daily operation cost, and the equipment output and load balance in each EH are analyzed. Simulative results based on MATLAB show that multiple EHs can make full use of the complementary characteristics of inter-regional loads, so that each EH can optimize the individual operation cost and improve the system flexibility.

**Key words:** energy hub; multi-energy system; non-cooperative game; dynamic optimization; Nash equilibrium

## 附录 A

(1) 证明  $A_i$  为非空紧致凸子集。

$A_i$  是参与者从最小可出售电量到最大可出售电量的一个区间,  $A_i = \{a_i \in [E_{\text{grid}}, E_{\text{beh}}]\}$  为紧致凸子集, 且当参与者参与电能交易时必然存在自身对应的策略。

(2) 证明收益函数  $U_i$  为凹函数。

收益函数的表达式为:

$$U_i = \sum_{t=1}^T [F_{\text{gas},j}^t + F_{\text{gb},i}^t, E_{\text{grid},j}^t, E_{\text{beh},j}^t, P_{\text{ab},j}^t] \begin{bmatrix} M_{\text{gas}} \\ M_{\text{grid}} \\ a \left( \sum_{i=1}^N P_{\text{net},i} \right)^2 + b \sum_{i=1}^N P_{\text{net},i} + d \\ M_{\text{ab}} \end{bmatrix} + \sum_{t=1}^T [y_{\text{pv}}, y_{\text{wt}}, y_{\text{gt}}, y_{\text{bess}}] \begin{bmatrix} P_{\text{pv},i}^t \\ P_{\text{wt},i}^t \\ P_{\text{gt},i}^t \\ P_{\text{ch},i}^t \end{bmatrix} + \sum_{t=1}^T [y_{\text{bess}}, y_{\text{ar}}, y_{\text{ec}}, y_{\text{gb}}] \begin{bmatrix} P_{\text{dch},i}^t \\ P_{\text{ar},i}^t \\ P_{\text{ec},i}^t \\ P_{\text{gb},i}^t \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

由式 (A1) 可知, 收益函数为线性函数, 根据纳什均衡存在性定理, 只需证明效用函数  $U_i$  关于策略集  $a_i$  拟凹, 即所述非合作博弈模型存在纯策略纳什均衡。当  $a_i$  为已知策略集时,  $U_i$  为关于  $a_i$  的线性函数, 线性函数必为凹函数, 因此基于非合作博弈的区域 EH 运行优化模型存在纯策略纳什集合。

## 附录 B

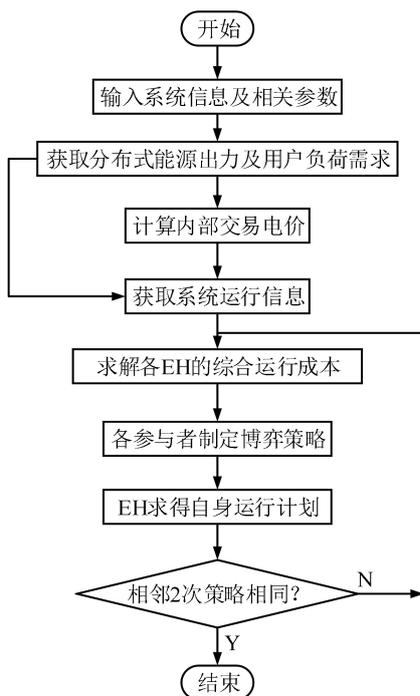


图 B1 博弈求解流程图

Fig.B1 Flowchart of solving game

# 附录 C

表 C1 EH 的容量配置  
Table C1 Capacity configuration of EHs

设备	容量配置/kW			
	EH <sub>1</sub>	EH <sub>2</sub>	EH <sub>3</sub>	EH <sub>4</sub>
光伏	3000	3300	4000	3500
风机	2500	3600	3900	3800
燃气轮机	2000	2000	1000	1000
储能系统	2000	2000	2000	2000
吸附式制冷机	1500	0	2000	0
热交换器	2000	1800	0	0
电制冷机	1000	0	1000	0
燃气锅炉	1500	1500	0	0

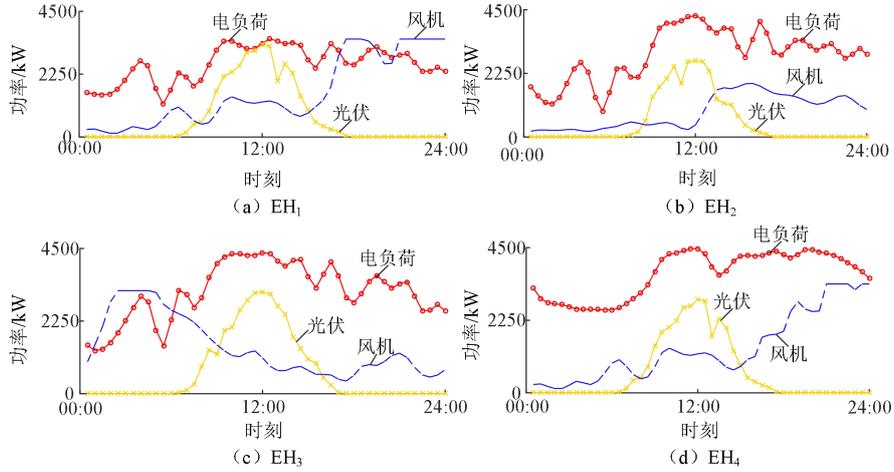


图 C1 可再生能源出力与电负荷需求

Fig.C1 Output of renewable energy resource and electrical load demand

表 C2 系统其他参数

Table C2 Other parameters of system

参数	取值	参数	取值
$M_{\text{gas}} / (\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	2.2	$\eta_{\text{ar}}$	1.2
$\lambda_{\text{gas}} / (\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	9.7	$\eta_{\text{ec}}$	4
$M_{\text{ab}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.25	$y_{\text{ec}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0188
储能初始 SOC	0.5	$\eta_{\text{he}}$	0.8
$\eta_{\text{ch}}$	0.95	$y_{\text{gt}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0158
$\eta_{\text{dch}}$	0.96	$\eta_{\text{gb}}$	0.9
$y_{\text{bess}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0254	$\eta_{\text{rec}}$	0.7661
$y_{\text{pv}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0096	$y_{\text{gb}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0163
$y_{\text{wt}} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0296	$a, b, d$	$3.6 \times 10^{-5}, 2.4 \times 10^{-5}, 0.5$

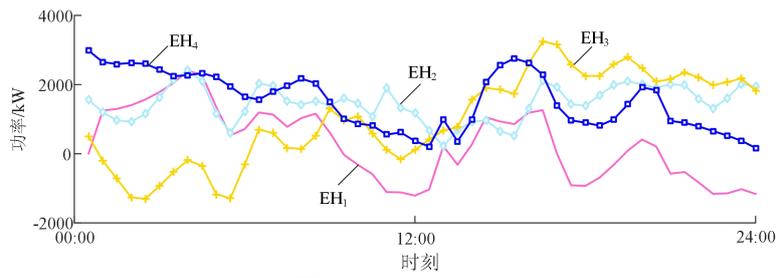
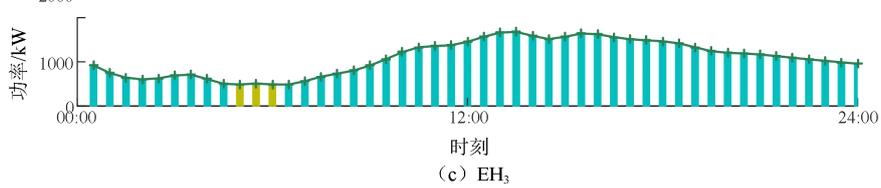
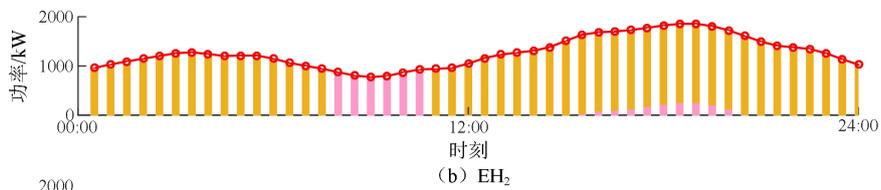
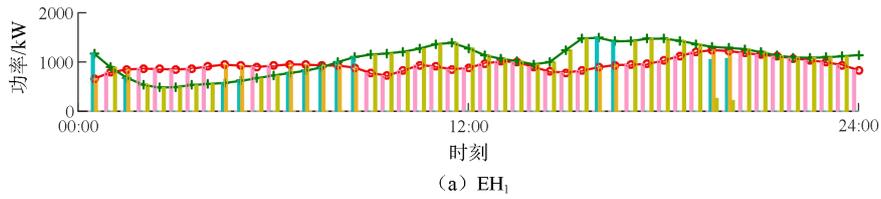


图 C3 EH 的净负荷  
Fig.C3 Net load of EHs



—○— 热负荷, —■— 冷负荷, —■— 锅炉制热, —■— 吸附式制冷机, —■— 热交换器, —■— 电制冷机

图 C4 冷、热负荷、及设备出力  
Fig.C4 Cooling and heat load and output of equipments

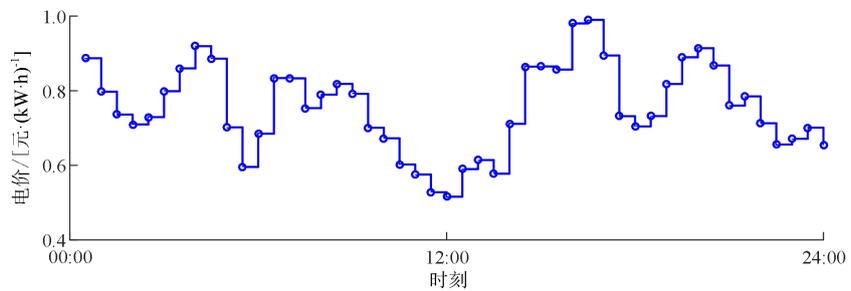


图 C5 内部交易电价  
Fig.C5 Internal transaction electricity price