

# 基于异构能源区块链的综合能源系统交易模型

杨锡运,陶 准,黄欣欣,刘思渠

(华北电力大学 控制与计算机工程学院,北京 102206)

**摘要:**综合能源系统是对电、气、热、冷能进行统一规划调度的综合系统,顺应了供给侧改革的趋势。目前综合能源系统的用户呈现个体化、分散化的趋势,传统的单向集中式输配电服务模式逐渐不适应这种趋势。基于区块链技术,设计了一种综合能源系统交易模型。采用异构能源区块链的结构模式,利用智能合约建立了基于价格约束的匹配拍卖机制,保障了清洁能源用户的供能优先级,并采用双重认证机制,保障了交易的可靠性。在实验环境下对所设计模型进行分析,仿真结果验证了所提综合能源系统交易模型的有效性和可行性。

**关键词:**综合能源系统;区块链;链码;智能合约;匹配拍卖机制;物理和经济模型;分布式能源交易

**中图分类号:**TM 732;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202108022

## 0 引言

2015年3月国家能源局出台的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》指出,要还原电力的商品属性,构建电力市场体系,支持清洁能源发展,逐步打破垄断,促进市场主体化,进一步深化能源供给侧改革。随着能源供给侧的结构性改革,以煤为主的传统能源消费结构正在逐步被以可再生能源为主的混合能源取代<sup>[1]</sup>。我国正面临着产能过剩、整体运行效率低、环境污染严重等问题<sup>[2]</sup>,在这种大背景下,对电、气、热、冷等各类能源进行统一规划调度的综合智慧能源系统引起了广泛的关注<sup>[3]</sup>。在综合能源系统中,能源交易的用户也逐渐呈现个体化、分散化的趋势,交易模式也正在由集中单向交易过渡为点对点P2P(Peer-to-Peer)交易<sup>[4]</sup>。但由第三方中介参与的交易模式往往存在成本高、运行效率较低、数据不透明、隐私安全性不高等问题<sup>[5-6]</sup>,因此亟需研究一种去中心化、交易历史不可篡改、历史信息可追溯、信息公开透明的新型交易方式。

区块链作为一种“分布式账本”<sup>[7]</sup>,其所具有的安全性、去中心化、公开透明等特点与能源交易过程的“自治”、“自发”属性相契合。在电力交易市场乃至能源互联网等领域有大量研究人员逐步探索区块链的应用与前景<sup>[8]</sup>;文献[9-10]主要研究了微网及分布式电能交易的适用性;文献[11]对区块链网络的类型选择以及运行效率进行了分析,通过数学模型定量分析了能源交易的成本和速度,其研究主要面向广义的区块链电能交易;文献[12]设计了基于信用共识的微网用户交易过程,在拍卖模式下分析了用户的报价策略;文献[13]分析了区块链交易模

式下的需求响应,通过调控电价制衡负荷需求;文献[14]分析了现有区块链交易的不足,并在分布式电力交易中设计了“经济激励”的共识机制。上述研究针对特定的能源交易对象及商业模式进行交易机制设计,并未考虑交易市场的定价机制对交易过程的影响。需要指出的是,目前大多研究针对能源供需的互动响应,而关于区块链技术在综合能源系统中的应用研究相对较少。

综合能源系统含有多种能源形式和交易用户,区块链技术的特点及其拓扑结构与综合能源系统交易结构中的多方用户交易需求具有很高的契合度,其去中心化的交易模式具有显著优势,因此本文开展了结合区块链的综合能源系统能源交易的研究工作。在区块链技术的基础上,针对能源交易类型差异,提出了一种由联盟区块链子链组成的异构区块链综合能源交易模型。分析了交易市场的主体配置以及成员节点用户设备的物理和经济模型,并在智能合约的基础上建立了基于价格约束的匹配拍卖机制,取代了第三方中介,保障了清洁能源节点用户的供能优先级,并充分利用了盈余产能。在实验环境下对该模型的运行情景进行仿真,仿真结果验证了交易模型的可行性及有效性。

## 1 基于区块链技术的交易框架设计

### 1.1 综合能源系统的交易网络结构

本文中综合能源系统的交易网络结构如图1所示,用户在系统中进行电、气、热、冷4种类型的能源交易。目前,区块链大多采用单链式结构,但由于综合能源系统中交易类型的不同,本文针对能源种类构建了异构区块链。异构区块链中包含电交易子链、燃气交易子链、热交易子链、冷交易子链。

各能源子链的数据是同步进行的,各子链中的节点可同时参加多个链的交易,例如:燃气轮机用户可同时参与电交易子链、热交易子链、燃气交易子

收稿日期:2021-03-22;修回日期:2021-06-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677067)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677067)

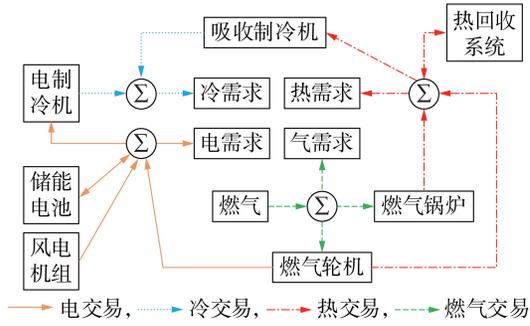


图1 综合能源系统的交易网络结构

Fig.1 Transaction network architecture for integrated energy system

链,参与联盟链的各节点均可进行跨链的历史信息回溯。在每个交易时段初期,各子链上的用户向链上发布交易需求信息,交易双方通过智能合约配对交易,双方交易经认证后,被认定为一次合法交易,再经过共识过程,则该时段的合法交易被打包上链。

### 1.2 能源子链的类型选择

区块链包括公有链、联盟链、私有链3种类型,各类型区块链的差异见附录A表A1。综合能源系统的运行过程涉及利益分配问题,由于联盟链通过联盟成员协商指定共识过程的执行节点以及共识机制,系统运行效率相对较高,并可完成各类型能源链间的利益分配、跨服务资金周转等功能。因此,考虑到系统的保密性、吞吐量、终局性、规模以及扩容要求,本文中的各能源子链选择联盟链结构。

## 2 基于异构能源区块链的交易模型

### 2.1 模型定义

基于异构能源区块链的综合能源系统交易模型为一个5元组,可表示为:

$$\gamma_{TMIES-HEB} = (C_{\alpha}, S_{\alpha}, D_{\alpha}, C_{ETIC}, D_{DSO}) \quad (1)$$

式中: $C_{\alpha}$ 为能源子链,包括电交易子链 $C_e$ 、燃气交易子链 $C_g$ 、热交易子链 $C_h$ 、冷交易子链 $C_c$ ;  $S_{\alpha}$ 为能源子链 $C_{\alpha}$ 中的供能节点有限集, $S_{\alpha} = \{s_i | i \in \mathbf{N}^+\}$ ,  $s_i$ 为第 $i$ 个供能节点, $\mathbf{N}^+$ 为正整数集合;  $D_{\alpha}$ 为能源子链 $C_{\alpha}$ 中的耗能节点有限集;  $C_{ETIC}$ 表示能源交易智能合约;  $D_{DSO}$ 表示配电系统运营商(DSO)。当新节点申请加入某能源子链时,需向 $C_{\alpha}$ 提供注册信息(如能源类型、节点位置等),以获取身份认证。

以电交易子链为例, $C_e$ 可表示为:

$$C_e = (S_e, D_e, ECA_e) \quad (2)$$

式中: $S_e$ 、 $D_e$ 分别为电交易子链中的供电、耗电节点;  $ECA_e$ 为电交易子链共识算法。

### 2.2 交易过程的主体配置

1)能源交易用户。能源交易用户包括各能源子链中的分布式能源供应用户以及纯负荷需求用户,

其中,分布式能源供应用户可以根据各时段内自身设备的能源实时情况改变身份,选择购能或者售能,并在该能源子链中作为共识节点身份存在;对于纯负荷需求用户而言,其购买分布式能源供应用户提供的某种类型能源,并以轻节点的身份存在。各成员节点都安装了智能电表,用于采集交易信息,并将用户能源出纳结果信息上传至匹配拍卖中心。

2)认证中心CA(Certificate Authority)。认证中心实际上是基于智能合约建立的计算机程序,其在交易市场中的地位类似于商务交易中的证书授权机构,各能源子链中的联盟成员节点需向认证中心提供相关注册信息,经认证中心授权后,获得数字证书。

3)DSO。DSO参与能源子链交易过程中的能源配送、线路阻塞排检、安全维护等。在某一时段的交易开始前,DSO需对该时段内参与交易的用户节点的线路物理安全性进行认证。

## 3 交易机制设计

### 3.1 能源子链中的智能合约

传统的交易模式仍是子能源系统通过第三方进行中心化交易,而随着系统扩容,中心化的交易方式受结构性成本制约,其拍卖方式还存在信息不对等的问题。

智能合约(链码)<sup>[15]</sup>是区块链中自动运行的一段计算机程序。在综合能源系统中,区块链的智能合约可以充当各用户交易过程中的拍卖师,从而代替了“第三方中介”,实现了用户地位平等、信息对称、公开的拍卖交易。智能合约的运行过程包括合约生成、合约发布、合约执行3个阶段,其运行流程及描述见附录A图A1。

### 3.2 价格约束下的认证规则

认证中心的认证规则通过智能合约实现,各能源子链内部的联盟成员遵守清洁能源优先的规则。首先,用户节点通过非对称加密算法生成公钥 $K_{public}$ 和私钥 $K_{private}$ ,然后将用户节点信息上传至认证中心,所上传的信息可表示为:

$$M_{reg} = \{T_{node}, T_{equipment}, T_{cx}, p_{sell, max}, p_{buy, min}, I_{per}\} \quad (3)$$

式中: $T_{node}$ 为用户节点类型;  $T_{equipment}$ 为用户能源设备类型;  $T_{cx}$ 为申请加入的联盟区块链;  $p_{sell, max}$ 、 $p_{buy, min}$ 分别为该节点的最高售能单价、最低购能单价;  $I_{per}$ 为个人或者机构信息。

由于区块链子用户的自利属性,系统内部某用户可能为了自身利益最大化,通过价格博弈等方式恶性竞价<sup>[16]</sup>。对此,本文采用基于价格约束的交易拍卖机制,以抑制个别节点的过渡逐利行为,实现系统整体对能源的充分利用以及效益最优。对于用户而言,其最高售能单价、最低购能单价要限制在规定的价格区间内,方可进行交易;对于系统而言,

其无需对新增用户重新制定能源调度规则,这简化了调度指令制定过程,便于系统扩容。

认证中心获取联盟成员的能源类型和报价,根据注册用户能源设备类型进行价格区间判断。

1)对于电交易子链,需满足:

$$p_{s,\max}^{\text{WT}} < p_{s,\max}^{\text{STE}} < p_{s,\max}^{\text{GET}} \quad (4)$$

$$p_{b,\min}^{\text{STE}} < p_{b,\min}^{\text{EC}} < p_{b,\min}^{\text{LOAD,E}} \quad (5)$$

式中: $p_{s,\max}^{\text{STE}}$ 、 $p_{s,\max}^{\text{WT}}$ 、 $p_{s,\max}^{\text{GET}}$ 分别为储能电池用户、风电机组用户、燃气轮机用户的最高售电报价; $p_{b,\min}^{\text{EC}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{STE}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{LOAD,E}}$ 分别为电制冷机用户、储能电池用户、纯电负荷用户的最低购电报价。

2)对于燃气交易子链,需满足:

$$p_{s,\max}^{\text{GAS}} < p_{b,\min}^{\text{GHB}} < p_{b,\min}^{\text{GET}} < p_{b,\min}^{\text{LOAD,G}} \quad (6)$$

式中: $p_{b,\min}^{\text{GET}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{GHB}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{LOAD,G}}$ 及 $p_{s,\max}^{\text{GAS}}$ 分别为燃气轮机用户、燃气锅炉用户、纯燃气负荷用户的最低购气报价及燃气提供用户的最高售气报价。

3)对于热交易子链,需满足:

$$p_{s,\max}^{\text{GET}} < p_{s,\max}^{\text{HS}} < p_{s,\max}^{\text{GHB}} \quad (7)$$

$$p_{b,\min}^{\text{HS}} < p_{b,\min}^{\text{AC}} < p_{b,\min}^{\text{LOAD,H}} \quad (8)$$

式中: $p_{s,\max}^{\text{HS}}$ 、 $p_{s,\max}^{\text{GET}}$ 、 $p_{s,\max}^{\text{GHB}}$ 分别为热回收系统用户、燃气轮机用户、燃气锅炉用户的最高售热报价; $p_{b,\min}^{\text{AC}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{HS}}$ 、 $p_{b,\min}^{\text{LOAD,H}}$ 分别为吸收制冷机用户、热回收系统用户、纯热负荷用户的最低购热报价。

4)对于冷交易子链,需满足:

$$p_{s,\max}^{\text{AC}} < p_{s,\max}^{\text{EC}} \quad (9)$$

式中: $p_{s,\max}^{\text{AC}}$ 、 $p_{s,\max}^{\text{EC}}$ 分别为吸收制冷机用户、电制冷机用户的最高售冷报价。

认证中心对申请注册用户授权后,使用其私钥 $K_{\text{private}}^{\text{CA}}$ 对用户公钥 $K_{\text{public}}$ 进行加密,形成数字签名 $\varphi_{\text{sign}}$ ,用户可根据 $\varphi_{\text{sign}}$ 和 $K_{\text{public}}$ 创建个人用户子链账户,联盟成员可通过 $K_{\text{private}}^{\text{CA}}$ 对该用户的 $\varphi_{\text{sign}}$ 真实性进行验证。

### 3.3 匹配拍卖过程

匹配拍卖中心的功能通过智能合约实现,其本质上是各能源子链中所有联盟节点共同维护的一段代码,在交易过程中,供能端用户和耗能端用户在同一时段内根据各自的报价策略发布相应的最低售能价格 $p_{s,\min}$ 以及最高购能价格 $p_{b,\max}$ ,交易双方各自物理线路的实时安全状况需要DSO进行实时认证,经过DSO物理设备的可靠性认证后,用户将购能需求信息 $M_b$ 或者售能需求信息 $M_s$ 、身份信息、DSO认证信息以及授权信息广播至全网络其他节点进行拍卖匹配,自动匹配交易方并执行拍卖过程,在双方交易结束且交易合法性被认证后,此次交易将被自动公布至能源子链的所有节点。例如:某用户的购能需求信息如式(10)所示。

$$M_b^A = \{x^A(t), p^A(t), \varphi_{\text{sign}}^A, K_{\text{public}}^A, T_{\text{energy}}, M_{\text{SGS}}^A(M_{\text{CA}}^A, M_{\text{DSO}}^A(t))\} \quad (10)$$

式中: $x^A(t)$ 为时段 $t$ 用户A的购电需求量; $p^A(t)$ 为时段 $t$ 用户A的购能单价; $\varphi_{\text{sign}}^A$ 为用户A的私钥数字签名; $K_{\text{public}}^A$ 为用户A的公钥信息; $T_{\text{energy}}$ 为需求能源种类; $M_{\text{SGS}}^A(M_{\text{CA}}^A, M_{\text{DSO}}^A(t))$ 为双重认证信息,包含授权信息 $M_{\text{CA}}^A$ 及DSO对时段 $t$ 用户A线路可靠性的认证信息 $M_{\text{DSO}}^A(t)$ 。若用户A存在设备或线路故障,则DSO对时段 $t$ 用户A线路可靠性的认证信息 $M_{\text{DSO}}^A(t)$ 将不予以通过,无法满足 $M_{\text{SGS}}^A$ ,则用户A无法进行匹配拍卖,将被从交易队列中剔除,从而无法完成交易。

匹配拍卖的流程图见附录A图A2,具体步骤如下。

1)匹配拍卖中心首先对交易队列中的各用户进行排序:对于购能端用户,按照购能价格由高到低的顺序进行排序,报价最高者具有优先选择权;对于供能端用户,按照售能价格由低到高的顺序进行排序,报价最低者具有优先选择权。

2)若购能端用户 $i$ 的最高购能报价 $p_{b,\max}^i$ 大于供能端用户 $j$ 的最低售能报价 $p_{s,\min}^j$ ,则匹配成功,所拍卖的交易量为其中一方的需求量或供应量二者中的最小值,其中需求量或者供应量得到满足的一方完成订单,退出待匹配交易队列,后续用户继续进行交易匹配。

3)重复步骤2),直至购能端用户或供能端用户的队列中没有满足可交易条件的用户。

4)匹配拍卖中心根据二者提供的信息向双方发布各自的匹配订单信息,购能、售能双方进行交易,之后将该次交易信息封装,并将其发布至各用户,经各用户确认后,通过智能电表将确认信息反馈给匹配拍卖中心,并将此次交易列为合法交易,直至该时段结束。

共识节点通过获取匹配拍卖中心记录的该时段内的合法交易,经过共识过程,将交易打包生成区块,双方的交易价格为 $(p_b + p_s)(1 - \eta_{\text{deposit}})/2$ ,其中 $\eta_{\text{deposit}}$ 为保证金系数,保证金用作支付DSO配送、检修、维护等费用以及某全节点进行共识过程的出块奖励; $p_b$ 、 $p_s$ 分别为购能端、供能端用户的报价。

### 3.4 区块数据结构及共识机制

区块数据结构如图2所示,包括块头和块体两部分。块头包括前一区块头的哈希(Hash)值、随机数、难度、时间戳以及交易信息的根哈希值(默克(Merkle)根);块体采用Merkle树结构存储交易记录,其中交易记录包含购能用户、供能用户、能源类型、交易总价、交易总量。

本文采用工作量证明作为共识机制,共识过程如下:

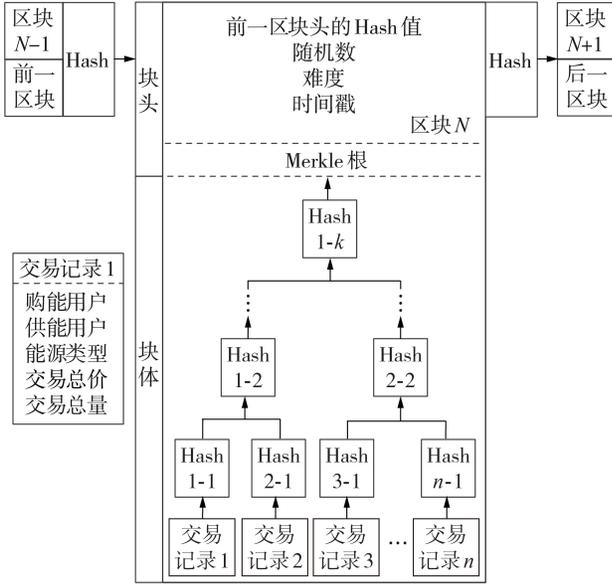


图 2 区块数据结构

Fig.2 Structure of block data

- 1) 计算 SHA256(SHA256(区块头));
- 2) 如果步骤 1) 所得计算结果小于目标值, 则完成工作量证明;
- 3) 如果步骤 1) 所得计算结果大于等于目标值, 则更换随机数, 继续执行步骤 1)。

## 4 设备单元建模

### 4.1 燃气轮机模型

#### 1) 物理模型。

燃气轮机消耗燃气可转化为输出电功率  $P_e^{GET}$  和排热量  $Q_{ex}$  两部分, 如式(11)所示。

$$P_e^{GET} + Q_{ex} = V_{egt} L_{ng} \quad (11)$$

式中:  $L_{ng}$  为燃气低位热值;  $V_{egt}$  为燃气轮机的燃气消耗量。输出电功率  $P_e^{GET}$  与排热量  $Q_{ex}$  间的关系式为:

$$Q_{ex} = P_e^{GET} (1 - \eta_{mt} - \eta_1) / \eta_{mt} \quad (12)$$

式中:  $\eta_{mt}$ 、 $\eta_1$  分别为燃气轮机的发电效率、散热损失系数。输出电功率  $P_e^{GET}$  与燃气消耗量  $V_{egt}$  之间的关系可表示为:

$$V_{egt} = F_0 P_{gen}^{GET} + F_1 P_e^{GET} \quad (13)$$

式中:  $P_{gen}^{GET}$  为燃气轮机的额定功率;  $F_0$ 、 $F_1$  分别为燃气轮机燃烧曲线的截距系数、斜率系数。

#### 2) 经济模型。

燃气轮机的成本  $C^{GET}$ 、收益  $B^{GET}$  可分别表示为:

$$C^{GET} = C_{ope}^{GET} + C_{fuel}^{GET} + C_{pol}^{GET} \quad (14)$$

$$B^{GET} = E_{ps}^{GET} p_s^{GET} + H_{sh}^{GET} p_{sh}^{GET} + E_{reward}^{GET} \quad (15)$$

式中:  $C_{ope}^{GET}$  为燃气轮机的运行维护成本;  $C_{fuel}^{GET} = V_{egt} P_{fuel}^{GET}$  为燃气轮机的燃气消耗成本,  $p_{fuel}^{GET}$  为燃气轮机购买燃气的价格;  $C_{pol}^{GET}$  为污染物排放成本;  $E_{ps}^{GET}$  为燃气轮机在单位时段内的总输出电量;  $H_{sh}^{GET}$  为燃气轮机参与

热电联产的供热量;  $p_{sh}^{GET}$ 、 $p_s^{GET}$  分别为完成匹配后燃气轮机的实际供热、售电价格;  $E_{reward}^{GET}$  为燃气轮机用户的出块奖励。

### 4.2 储能电池模型

#### 1) 物理模型。

时段  $t$  储能电池的电量  $S_{soc}(t)$  可表示为:

$$S_{soc}(t) = \begin{cases} S_{soc}(t-1)(1 - \delta_{sdis} \Delta t) + P_{ch} \eta_{ch} \Delta t & \text{充电} \\ S_{soc}(t-1)(1 - \delta_{sdis} \Delta t) - \frac{P_{dis}}{\eta_{dis}} \Delta t & \text{放电} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $S_{soc}(t-1)$  为时段  $t-1$  储能电池的电量;  $\delta_{sdis}$  为储能电池的自放电系数;  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dis}$  分别为储能电池的充电、放电效率;  $P_{ch}$ 、 $P_{dis}$  分别为储能电池的实际充电、放电功率;  $\Delta t$  为单位时段时长。

#### 2) 经济模型。

储能电池的成本  $C^{STE}$ 、收益  $B^{STE}$  可分别表示为:

$$C^{STE} = C_{ope}^{STE} + C_{ch,dis}^{STE} + E_{ch}^{STE} p_b^{STE} \quad (17)$$

$$B^{STE} = E_{dis}^{STE} p_s^{STE} + E_{reward}^{STE} \quad (18)$$

式中:  $C_{ope}^{STE}$ 、 $C_{ch,dis}^{STE}$  分别为储能电池的运行维护成本、充放电成本;  $E_{ch}^{STE}$ 、 $E_{dis}^{STE}$  分别为储能电池的充电、放电电量;  $p_s^{STE}$ 、 $p_b^{STE}$  分别为完成匹配后储能电池的实际售电、购电价格;  $E_{reward}^{STE}$  为储能电池用户的出块奖励。

### 4.3 风电机组模型

#### 1) 物理模型。

风速  $v$  服从威布尔分布, 其概率密度表达式为:

$$f(v) = \frac{k}{v} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (19)$$

式中:  $k$ 、 $c$  分别为形状参数、尺度参数。根据平均风速  $\bar{v}$ 、风速标准差  $\delta$  可近似求得  $k = \bar{v}/\delta$ 、 $c = \bar{v}/\Gamma(1 + 1/k)$ , 其中  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数。

风电机组的输出功率  $P^{WT}$  与风速  $v$  之间的关系可以近似用如下分段函数表示:

$$P^{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} P_r^{WT} & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r^{WT} & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_r^{WT}$  为风电机组的额定输出功率;  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$ 、 $v_r$  分别为切入风速、切出风速、额定风速。

#### 2) 经济模型。

风电机组的成本  $C^{WT}$ 、收益  $B^{WT}$  可分别表示为:

$$C^{WT} = C_{ope}^{WT} \quad (21)$$

$$B^{WT} = E_s^{WT} p_s^{WT} + E_{reward}^{WT} \quad (22)$$

式中:  $C_{ope}^{WT}$  为风电机组的初始投资及运行维护成本;  $E_s^{WT}$  为风电机组的售电电量;  $p_s^{WT}$  为完成匹配后风电机组的实际售电价格;  $E_{reward}^{WT}$  为风电机组用户的出块奖励。

#### 4.4 热回收系统模型

##### 1) 物理模型。

时段  $t$  热回收系统储热罐的储热量  $Q^{\text{HS}}(t)$  可表示为:

$$Q^{\text{HS}}(t) = (1 - \mu_{\text{loss}}) Q^{\text{HS}}(t-1) + Q_{\text{ch}}^{\text{HS}}(\Delta t) \eta_{\text{ch}}^{\text{HS}} - \frac{Q_{\text{dis}}^{\text{HS}}(\Delta t)}{\eta_{\text{dis}}^{\text{HS}}} \quad (23)$$

式中:  $Q^{\text{HS}}(t-1)$  为时段  $t-1$  热回收系统储热罐的储热量;  $\mu_{\text{loss}}$ 、 $\eta_{\text{ch}}^{\text{HS}}$  分别为热回收系统储热罐的热损失系数、储热效率;  $Q_{\text{ch}}^{\text{HS}}(\Delta t)$ 、 $Q_{\text{dis}}^{\text{HS}}(\Delta t)$  分别为  $\Delta t$  时间内热回收系统储热罐的储热量、释热量。

##### 2) 经济模型。

热回收系统的成本  $C^{\text{HS}}$ 、收益  $B^{\text{HS}}$  可分别表示为:

$$C^{\text{HS}} = C_{\text{ope}}^{\text{HS}} + C_{\text{ch,dis}}^{\text{HS}} + Q_{\text{ch}}^{\text{HS}} p_{\text{b}}^{\text{HS}} \quad (24)$$

$$B^{\text{HS}} = Q_{\text{dis}}^{\text{HS}} p_{\text{s}}^{\text{HS}} + E_{\text{reward}}^{\text{HS}} \quad (25)$$

式中:  $C_{\text{ope}}^{\text{HS}}$ 、 $C_{\text{ch,dis}}^{\text{HS}}$  分别为热回收系统的运行维护成本、储热释热成本;  $Q_{\text{ch}}^{\text{HS}}$ 、 $Q_{\text{dis}}^{\text{HS}}$  分别为热回收系统的储热量、释热量;  $p_{\text{b}}^{\text{HS}}$ 、 $p_{\text{s}}^{\text{HS}}$  分别为完成匹配后热回收系统的实际购热、售热价格;  $E_{\text{reward}}^{\text{HS}}$  为热回收系统用户的出块奖励。

#### 4.5 燃气锅炉模型

##### 1) 物理模型。

时段  $t$  燃气锅炉的输出功率  $P^{\text{GHB}}(t)$  可表示为:

$$P^{\text{GHB}}(t) = \frac{V^{\text{GHB}}(t) L_{\text{ng}} \eta^{\text{GHB}}}{\Delta t} \quad (26)$$

式中:  $\eta^{\text{GHB}}$  为燃气锅炉的供热效率;  $V^{\text{GHB}}(t)$  为时段  $t$  燃气锅炉的燃气消耗量。

##### 2) 经济模型。

燃气锅炉的成本  $C^{\text{GHB}}$ 、收益  $B^{\text{GHB}}$  可分别表示为:

$$C^{\text{GHB}} = C_{\text{ope}}^{\text{GHB}} + C_{\text{fuel}}^{\text{GHB}} + C_{\text{pol}}^{\text{GHB}} \quad (27)$$

$$B^{\text{GHB}} = Q_{\text{dis}}^{\text{GHB}} p_{\text{s}}^{\text{GHB}} + E_{\text{reward}}^{\text{GHB}} \quad (28)$$

式中:  $C_{\text{ope}}^{\text{GHB}}$ 、 $C_{\text{fuel}}^{\text{GHB}}$ 、 $C_{\text{pol}}^{\text{GHB}}$  分别为燃气锅炉的运行维护成本、燃气消耗成本、污染物排放成本;  $Q_{\text{dis}}^{\text{GHB}}$  为燃气锅炉的释热量;  $p_{\text{s}}^{\text{GHB}}$  为完成匹配后燃气锅炉的实际售热价格;  $E_{\text{reward}}^{\text{GHB}}$  为燃气锅炉用户的出块奖励。

#### 4.6 吸收式制冷机模型

##### 1) 物理模型。

吸收式制冷机的输出冷功率  $P^{\text{AC}}$  可表示为:

$$P^{\text{AC}} = \min \{ C_{\text{op}}^{\text{AC}} P_{\text{H}}^{\text{AC}}, P_{\text{max}}^{\text{AC}} \} \quad (29)$$

式中:  $C_{\text{op}}^{\text{AC}}$  为热力系数;  $P_{\text{H}}^{\text{AC}}$  为吸收式制冷机吸收的热功率;  $P_{\text{max}}^{\text{AC}}$  为最大输出冷功率。

##### 2) 经济模型。

吸收式制冷机的成本  $C^{\text{AC}}$  和收益  $B^{\text{AC}}$  可以分别表示为:

$$C^{\text{AC}} = C_{\text{ope}}^{\text{AC}} + C_{\text{h}}^{\text{AC}} \quad (30)$$

$$B^{\text{AC}} = Q_{\text{dis}}^{\text{AC}} p_{\text{s}}^{\text{AC}} + E_{\text{reward}}^{\text{AC}} \quad (31)$$

式中:  $C_{\text{ope}}^{\text{AC}}$ 、 $C_{\text{h}}^{\text{AC}}$  分别为吸收式制冷机的运行维护成本、热能消耗成本;  $Q_{\text{dis}}^{\text{AC}}$  为吸收式制冷机的输出冷

量;  $p_{\text{s}}^{\text{AC}}$  为完成匹配后吸收式制冷机的实际供冷价格;  $E_{\text{reward}}^{\text{AC}}$  为吸收式制冷机用户的出块奖励。

#### 4.7 电制冷机模型

##### 1) 物理模型。

电制冷机的输出冷功率  $P^{\text{EC}}$  可表示为:

$$P^{\text{EC}} = \min \{ C_{\text{op}}^{\text{EC}} P_{\text{e}}^{\text{EC}}, P_{\text{max}}^{\text{EC}} \} \quad (32)$$

式中:  $C_{\text{op}}^{\text{EC}}$  为制冷系数;  $P_{\text{e}}^{\text{EC}}$  为电制冷机的输入电功率;  $P_{\text{max}}^{\text{EC}}$  为最大输出冷功率。

##### 2) 经济模型。

电制冷机的成本  $C^{\text{EC}}$ 、收益  $B^{\text{EC}}$  可分别表示为:

$$C^{\text{EC}} = C_{\text{ope}}^{\text{EC}} + C_{\text{e}}^{\text{EC}} \quad (33)$$

$$B^{\text{EC}} = Q_{\text{dis}}^{\text{EC}} p_{\text{s}}^{\text{EC}} + E_{\text{reward}}^{\text{EC}} \quad (34)$$

式中:  $C_{\text{ope}}^{\text{EC}}$ 、 $C_{\text{e}}^{\text{EC}}$  分别为电制冷机的运行维护成本、电能消耗成本;  $Q_{\text{dis}}^{\text{EC}}$  为电制冷机的输出制冷量;  $p_{\text{s}}^{\text{EC}}$  为完成匹配后电制冷机的实际供冷价格;  $E_{\text{reward}}^{\text{EC}}$  为电制冷机用户的出块奖励。

基于上述综合能源系统框架、市场主体配置、交易机制、设备建模,本文构建了完整的基于异构能源区块链的综合能源系统交易模型,成员节点在此平台上进行能源交易。

## 5 算例分析

### 5.1 实验环境搭建及仿真过程

为了模拟综合能源系统在某一天的交易过程,本文参考以太坊等区块链平台交易逻辑,在本地利用实验室计算机搭建区块链交易环境,生成综合能源系统的各种能源设备用户,并将智能合约的代码保存在本地计算机。实验的编程环境为 Python3.6,在每个交易时段初期,各用户广播交易信息进行拍卖过程,并采用异步调用的方法模拟各用户的共识过程。交易过程的基本流程图见附录 B 图 B1,智能合约(匹配拍卖过程)的流程图见附录 B 图 B2。设备用户(以燃气轮机用户为例)生产函数的部分代码截图见附录 B 图 B3。

### 5.2 用户报价及成本参数

系统设备参数见文献[17],保证金系数  $\eta_{\text{deposit}} = 0.01$ ,交易双方的成交单价为  $(p_{\text{b}} + p_{\text{s}})(1 - \eta_{\text{deposit}})/2$ 。根据第4节中设备的经济模型计算用户的收益情况。根据文献[9]中所提基于区块链交易模式的产销者交易价格制定本文的用户报价及成本,见附录 B 表 B1。

### 5.3 能源子链用户的交易过程分析

以 1 h 为单位时段时长,将一天 24 h 划分为 24 个时段进行分析。实时风速曲线见附录 C 图 C1,电、热、冷负荷需求曲线以及燃气消耗曲线见附录 C 图 C2。各用户的交易结果见图 3—10。

结合附录 C 图 C1、C2 和图 3—5、10 分析电交易

子链中的交易结果可知:在时段1—6内,由于风资源充足,风电机组用户输出的电能较多,同时燃气轮机用户处于停机状态,储能电池用户处于充电状态,储存风电机组输出的盈余电能;在时段6之后,电负荷耗电量逐步提升,储能电池用户输出之前储存的电能;在时段8、9内,风速大幅下降,风电机组用户的输出功率骤降;在时段8之后,由于电制冷机用户

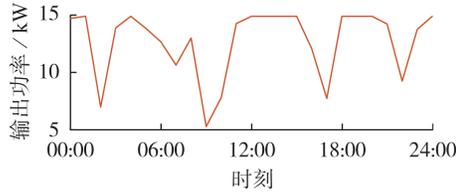


图3 风电机组用户的输出功率曲线

Fig.3 Output power curve of wind turbine user

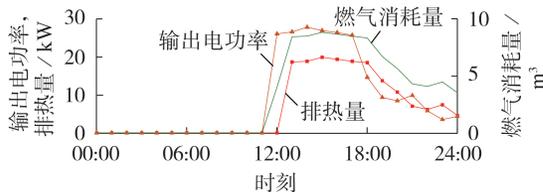


图4 燃气轮机用户的输出电功率、排热量、燃气消耗量曲线

Fig.4 Electric power output,heat exhaust and gas consumption curves of gas turbine user

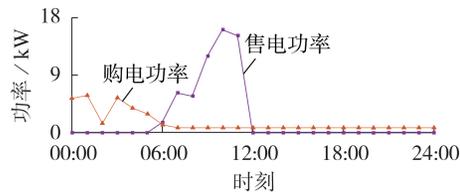


图5 储能电池用户的售电、购电功率曲线

Fig.5 Power curves of electricity sale and purchase of storage battery user

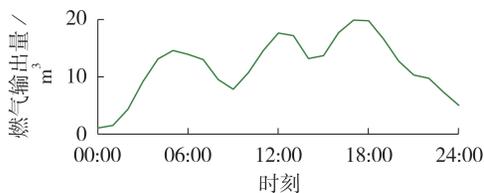


图6 燃气提供用户的燃气输出量曲线

Fig.6 Gas output curve of gas supplier user

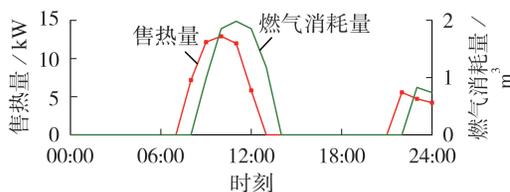


图7 燃气锅炉用户的售热量、燃气消耗量曲线

Fig.7 Heat sale and gas consumption curves of gas boiler user

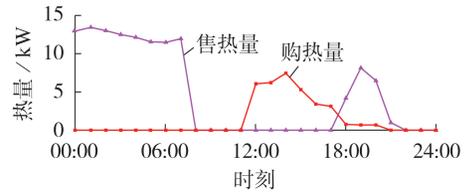


图8 热回收系统用户的售热量、购热量曲线

Fig.8 Heat sale and purchase curves of heat recovery system user

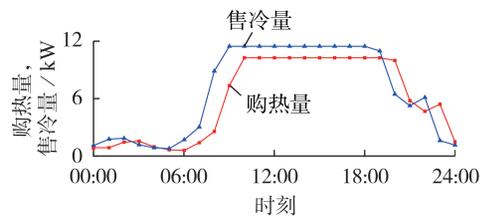


图9 吸收制冷机用户的售冷、购热曲线

Fig.9 Cold sale and heat purchase curves of absorption refrigeration user

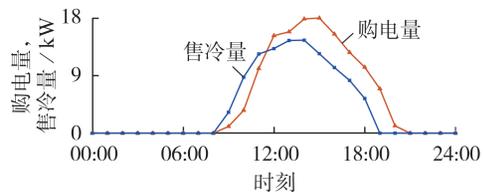


图10 电制冷机用户的售冷、购电曲线

Fig.10 Cold sale and electricity purchase curves of electric refrigeration user

投入运行,总电能消耗量增大,风电机组用户及储能电池用户输出的电能不足以满足电负荷,燃气轮机开始投入运行。结合附录C图C2和图4、7—9分析热交易子链中的交易结果可知:在时段1—8内,热回收系统用户输出此前储存的热能,以供应热负荷需求;在时段8,热回收系统储存的热能耗尽,燃气锅炉用户释热,由于此时燃气轮机用户投入运行,参与热电联产,其产热供应热负荷,故燃气锅炉用户在时段13停止产热,热回收系统用户开始回收燃气轮机用户所产生的盈余热量;随着燃气轮机用户输出电功率下降,产热量逐渐减少,热回收系统用户从时段18开始释热,至时段22耗尽储存的热量,燃气锅炉用户再次投入发热。结合附录C图C2和图4、6、7可以看出,在燃气交易子链中,时段5、13、18左右存在燃气消耗量峰值,这与燃气负荷用户的燃气消耗量曲线存在相似性,并且在时段18燃气消耗量达到最大值,这是因为此时燃气轮机用户保持较高的发电量,导致燃气消耗量增大。结合附录C图C2、图9和图10分析冷交易子链中的交易结果可知:吸收式制冷机用户优先投入供冷,剩余冷负荷差额由电制冷机用户供给。

综合上述分析可知,因为能源价格约束,在各能

源子链中清洁能源都具有最高的供给优先级,这是由本文的价格约束机制以及拍卖机制所决定的。在电交易子链中,风电机组具有最低的售电报价,故风电机组用户优先售能,当风资源充足时,风电机组的发电量供给电负荷用户,剩余电能出售给储能电池用户,从而储存盈余电能;当风资源中等时,储能电池用户将储存的电能释放供给负荷用户;当风资源不足时,燃气轮机用户开始供电。在热交易子链中,当燃气轮机用户不发电时,由于热回收系统用户的售热价格较低,其储热优先供给热负荷;当燃气轮机发电时,由于燃气轮机的售热价格最低,参与热电联产,其产热优先供给负荷消纳,并将多余的热能出售给热回收系统存储热量;当产热不足时,燃气锅炉用户开始供热。在燃气交易子链中,燃气供应用户将燃气提供给燃气负荷用户、燃气轮机用户以及燃气锅炉用户。在冷交易子链中,吸收式制冷机用户的售冷价格最低,故优先售冷,吸收式制冷机用户利用热回收系统用户在热交易中积累的盈余热量优先供冷,剩余需冷量由电制冷机供给。

#### 5.4 供能用户收益及负荷用户支出分析

为了进一步揭示基于价格约束的区块链交易模型的经济性,对比了本文所提交易模式以及文献[9]中传统交易模式的供能用户收益及负荷支出结果,如图11所示,图11(a)的横轴坐标1—8分别对应风电机组、储能电池、燃气轮机、电制冷机、燃气锅炉、燃气供应、吸收式制冷机、热回收系统用户。

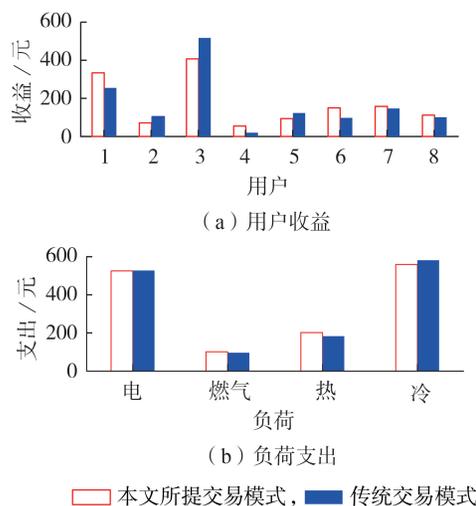


图11 2种交易模式下的供能用户收益及负荷支出  
Fig.11 Revenue for energy supply users and load expenditure of two transaction modes

由图11可知:相较于传统交易模式,本文所提交易模式下纯负荷需求方的总购能支出相差不大,综合能源系统内部各供能用户的收益趋于均匀化,限制了收益最高用户(燃气轮机用户)的收益,提高了收益最低用户(电制冷机用户)的收益。对于清洁

能源用户而言,采用匹配拍卖机制能使其收益不因低售能报价而受损,且相较于传统交易模式,本文所提交易模式下的收益有明显提高。同时,储能电池对产能过程中的盈余能量进行存储并再利用,体现了综合能源系统清洁能源的发展方向 and 环保理念。

## 6 结论

本文针对综合能源系统的交易特性,设计了基于异构区块链的交易框架;针对不同能源交易类型,分别设计了联盟交易子链;基于智能合约设计了基于价格约束的匹配拍卖机制,通过认证中心以及DSO的双重认证环节保证了交易的可靠性。算例分析结果表明:在本文所提价格约束机制下,清洁能源用户的收益及供能优先级得到保证,并且系统的盈余产能得到充分利用,这表明所建模型可以有效服务综合能源系统的交易需求,符合系统侧重发展清洁能源的趋势。然而,本文还存在未深入研究的潜在问题,如共识过程的耗时是否能够满足综合能源系统的交易需求,节点用户在此模型下存在价格博弈问题等,这将是后续的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 贾景姿,曾鸣. 基于供给侧改革的综合能源服务规划[J]. 经济研究导刊,2019(17):177-179.
- [2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术,2015,39(11):3014-3022. MA Zhao,ZHOU Xiaoxin,SHANG Yuwei,et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technolog,2015,39(11):3014-3022.
- [3] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11. CHEN Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):3-11.
- [4] 郭琳,陈先锋,邓惠华,等. 含分布式电源P2P交易的社区微网运营机制[J]. 电力建设,2018,39(7):1-9. GUO Lin,CHEN Xianfeng,DENG Huihua,et al. A framework of operating mechanism based on peer-to-peer transaction among distributed energy resources in community microgrid[J]. Electric Power Construction,2018,39(7):1-9.
- [5] AITZHAN N Z, SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures,blockchain and anonymous messaging streams[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing,2018,15(5):840-852.
- [6] PATRICK R,FERRI A,VACHTSEVANOS G. Effect of planetary gear carrier-plate cracks on vibration spectrum[J]. Journal of Vibration and Acoustics,2012,134(6):61-65.
- [7] NAKAMOTO S. Bitcoin:a peer-to-peer electronic cash system [R/OL]. (2008-10-31)[2020-10-26]. <https://bitcoin.org/en/bitcoin-paper>.
- [8] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4023. ZHANG Ning,WANG Yi,KANG Chongqing,et al. Blockchain

- technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15):4011-4023.
- [9] 王毅,赵辉辉,侯兴哲,等. 基于链码和多阶段混合拍卖机制的微电网分布式电能交易模型[J]. 电网技术, 2020, 44(4):1302-1309.  
WANG Yi, ZHAO Huihui, HOU Xingzhe, et al. Distributed electricity transaction mode in microgrid based on chaincode and multi-stage hybrid auction mechanism[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1302-1309.
- [10] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24):7137-7145, 7487.  
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24):7137-7145, 7487.
- [11] 邵雪,孙宏斌,郭庆来. 能源互联网区块链应用的交易效率分析[J]. 电网技术, 2017, 41(10):3400-3406.  
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Transaction efficiency analysis of blockchain applied to energy internet[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3400-3406.
- [12] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11):130-138.  
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, ZHU Youchan, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):130-138.
- [13] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):9-17.  
CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):9-17.
- [14] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):17-22, 30.  
XU Jiahui, MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):17-22, 30.
- [15] 贺海武,延安,陈泽华. 基于区块链的智能合约技术与应用综述[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(11):2452-2466.  
HE Haiwu, YAN An, CHEN Zehua. Survey of smart contract technology and application based on blockchain[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(11):2452-2466.
- [16] 周晓洁,彭谦,杨睿,等. 绿色电力证书交易影响下计及输电阻塞影响的综合型能源发电电商竞价策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4):1317-1324.  
ZHOU Xiaojie, PENG Qian, YANG Rui, et al. Power price marketing strategy of comprehensive energy-based electricity sales company participating in electricity market competition under ubiquitous environment of Internet of Things[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1317-1324.
- [17] 殷红旭,刘春秀,赵金勇,等. 基于自适应模型预测控制的区域能源互联网两阶段协同调度[J]. 现代电力, 2018, 35(4):35-44.  
YIN Hongxu, LIU Chunxiu, ZHAO Jinyong, et al. A two-stage coordinated optimization method of regional energy internet based on adaptive model predictive control[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4):35-44.

#### 作者简介:



杨锡运

杨锡运(1973—),女,内蒙古通辽人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源发电控制(E-mail:yangxiyun916@souhu.com);

陶准(1996—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为区块链技术在能源领域的应用(E-mail:18618162564@163.com);

黄欣欣(1997—),女,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电技术(E-mail:hxxncepu@163.com);

刘思梁(1997—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电技术(E-mail:liusiquz@163.com)。

(编辑 陆丹)

## Transaction model of integrated energy system based on heterogeneous energy blockchain

YANG Xiyun, TAO Zhun, HUANG Xinxin, LIU Siqu

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The integrated energy system is an integrated system for the unified planning and scheduling of electricity, gas, heat and cold energy, which conforms to the trend of supply side reform. At present, the users in the integrated energy system show the trend of individualization and decentralization, and the traditional one-way centralized transmission and distribution service mode gradually fails to adapt to this trend. Based on blockchain technology, a transaction model of integrated energy system is designed. The model adopts the structure pattern of heterogeneous energy blockchain, and establishes a matching auction mechanism based on price constraint by using smart contract to guarantee the energy supply priority of clean energy users, and adopts a two-factor authentication mechanism to guarantee the reliability of transaction. The designed model is analyzed in the experimental environment, and the simulative results verify the effectiveness and feasibility of the proposed integrated energy system transaction model.

**Key words:** integrated energy system; energy blockchain; chain code; smart contract; matching auction mechanism; physical and economic models; distributed energy trading

# 附录 A

表 A1 3 种类型区块链的差异  
Table A1 Differences among three types of blockchain

区块链类型	中心化程度	节点规模	开放范围	记账方	交易效率
公有链	完全去中心	所有节点	对全网开放	任何参与者	较低
联盟链	部分去中心	部分节点	联盟成员	协商决定	适中
私有链	中心化	内部节点	仅对内开放	内部决定	较快

在本文中，合约由综合能源系统中各能源子链中参与的联盟成员节点多方协商之后发布，合约一经发布便不可篡改，会随某个成员节点的一次能源交易广播至该能源子链的全部联盟成员节点并保存在节点本地，最终生成的合约是一段代码文件。在各个能源子链中，有交易意向的成员节点将自己的交易需求信息向全网播报，通过智能合约自动根据所有接受到的交易需求信息按照报价优先级进行匹配，交易的合法性得到认证后，经过共识过程后将状态改变过程写入区块。

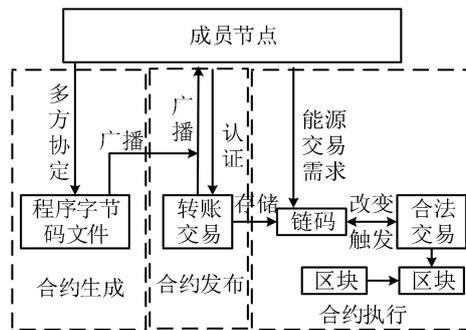


图 A1 综合能源系统智能合约运行周期  
Fig.A1 Operation cycle of ETIC

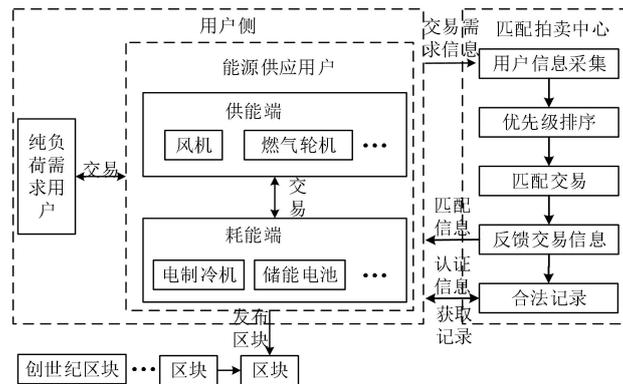


图 A2 综合能源系统能源交易流程  
Fig.A2 Integrated energy system energy transaction process

# 附录 B

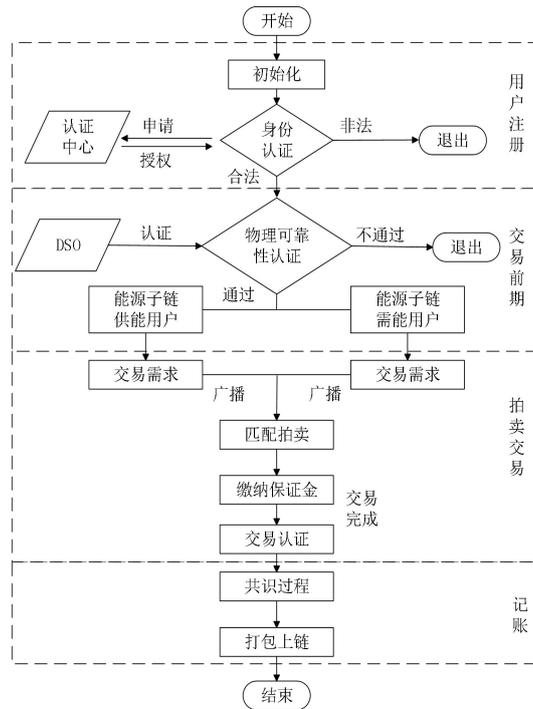


图 B1 基本交易流程  
Fig.B1 Basic transaction process

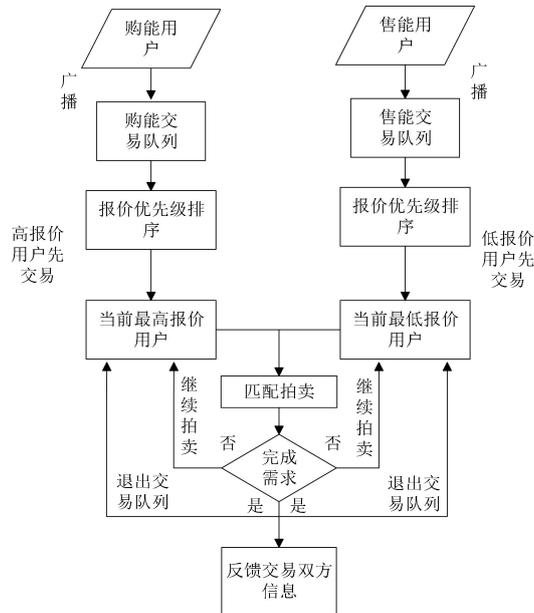


图 B2 匹配拍卖过程  
Fig.B2 Match auction process

```

class gas_turbine:
    def __init__(self, Y_gen, F_0, F_1, pb_gas, ps_elec, ps_heat):
        self.F_0 = F_0
        self.F_1 = F_1
        self.Y_gen = Y_gen
        self.price_buy_gas = pb_gas
        self.price_sell_elec = ps_elec
        self.price_sell_heat = ps_heat
    def set_pe(self, state, pe):
        self.pe = pe
        self.state = state
        if self.state == 'open':
            self.V_MT = self.F_0 * self.Y_gen + self.F_1 * self.pe
        elif self.state == 'close':
            self.V_MT = 0
    def set_cost(self, cost_com, cost_ful):
        self.cost_com = cost_com
        self.cost_ful = cost_ful
        self.cost_power = 0
        self.cost = 0
        if self.state == 'open':
            self.cost_fixed = self.cost_com + self.F_0 * self.Y_gen * self.cost_ful
            self.cost_power = self.F_1 * self.cost_ful * self.V_MT
            self.cost = self.cost_fixed + self.cost_power
    def operation(self, state, pe, com, ful):

```

图 B3 设备用户生产函数代码截图  
Fig.B3 Code screenshot of device user production function

表 B1 用户报价及成本  
Table B1 User quotation and cost

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
电负荷购电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.75	储能电池售电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.5	燃气轮机购气报价/ (元·m <sup>-3</sup> )	3.40	燃气锅炉购气报价/ (元·m <sup>-3</sup> )	0.6
热负荷购热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.78	储能电池运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.01	电制冷机购电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.70	燃气锅炉售热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.40
冷负荷购冷报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.83	储能电池充放电成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.02	电制冷机售冷报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.79	燃气锅炉运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.008
燃气负荷购气报价/ (元·m <sup>-3</sup> )	3.45	燃气轮机售电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.65	电制冷机运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.01	燃气锅炉排污成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.001
风机售电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.35	燃气轮机售热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.43	吸收制冷机购热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.72	热回收系统购热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.35
风机运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.01	燃气轮机运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.008	吸收制冷机售冷报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.77	热回收系统售热报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.45
储能电池购电报价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.40	燃气轮机排污成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.003	吸收制冷机运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.01	热回收系统运维成本/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.008

## 附录 C

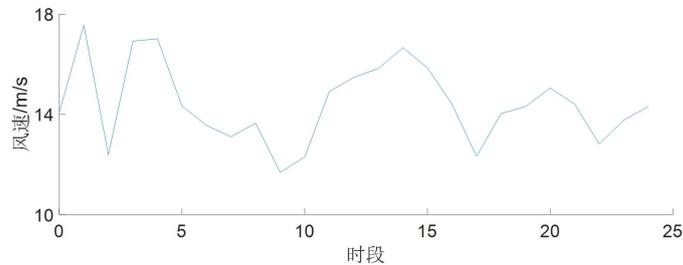


图 C1 风速曲线  
Fig.C1 Wind speed curve

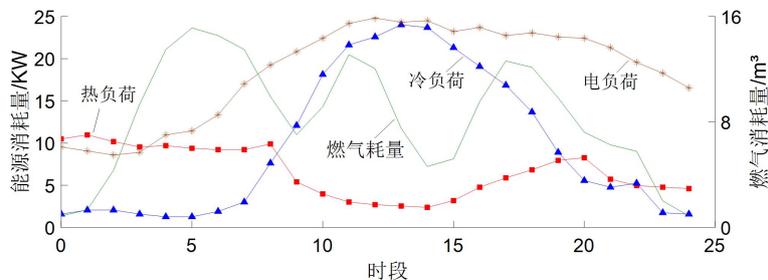


图 C2 电、气、热、冷消耗曲线  
Fig.C2 Power, gas, heat and cold consumption curves