

基于区块链技术的园区级综合能源系统能量交互

刘玉成¹, 段炼¹, 班晓萌¹, 黄伟², 左欣雅², 张莞嘉²

(1. 国网呼伦贝尔供电公司, 内蒙古自治区呼伦贝尔市 021100;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

摘 要: 针对园区级综合能源系统分散式能量交互模式存在的参与主体不忠诚、外部攻击的问题, 结合区块链技术的特点、结构和类型, 分析了区块链技术在综合能源系统能量交互中应用可行性。以各运营商运营成本最小为目标, 成本增量为一致性变量, 利用区块链技术中的智能合约、分布式记账以及数字签名, 提出了基于区块链技术的综合能源系统分散式能量交互方法, 建立起能量交互双层结构。在物理层上, 建立了基于拉格朗日乘子法的分散式能量交互模型, 在信息层上, 建立了基于区块链技术的信息传递构架。通过算例验证, 该方法保障了园区级热-电综合能源系统分散式能量交互过程的公平公开和安全可靠。

关键词: 园区级综合能源系统; 分散式能量交互; 区块链技术; 一致性协议; 拉格朗日乘子法

Blockchain Technology for Distributed Energy Scheduling Method of District-Level Integrated Energy System

LIU Yucheng¹, DUAN Lian¹, BAN Xiaomeng¹, HUANG Wei²,
ZUO Xinya², ZHANG Wanjia²

(1. State Grid Hulun Buir Electric Power Company, Hulun Buir 021100, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: For the problems of disloyalty and external attacks in the distributed energy interaction mode of the integrated energy system of district level, combined with the characteristics, structure and types of blockchains, the application feasibility of blockchain technology in the energy dispatch of the integrated energy system is analyzed. The paper proposes a distributed energy scheduling method for an integrated energy system applying blockchain technology, and establishes a two-layer structure of energy interaction, with the goal of minimizing the operating cost of each operator, and the cost increment value as a consistent variable, combining smart contracts, distributed accounting and digital signatures of blockchain technology. A decentralized energy scheduling model based on the Lagrange multiplier method on the physical layer of the structure, and an information transmission framework based on blockchain technology on the information layer are established. The method is verified through calculation examples, which guarantees the fairness, openness, safety and reliability of the distributed energy dispatch process of the heat-electricity integrated energy system of district level.

KEYWORDS: integrated energy system of district level; decentralized energy interaction; blockchain technology; conformance agreement; Lagrange multiplier method

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2021)12-0030-09

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.12.004

0 引 言

为构建清洁环保、高效安全的现代能源体系^[1], 异质能源协同利用的综合能源系统(integrated energy system, IES)成为近年来的关注重点。IES的能量交互作为其中重要的研究方向, 也得到了广泛的探讨。

IES的能量交互模式可分为集中式和分散式两种。当前, 相关研究和工程实践以集中式的调度模式

为主, 即在 IES 内构建中央运营层用于集中计算并进行能量分配^[2-4]。由于中央运营层可获得全部数据并做出决策, 无法维护能源运营商的利益和隐私^[5]。同时, 决策过程中数据量大、决策变量多造成了 IES 通信压力大, 运行效率低^[6]。而分散式的能量交互模式没有中心机构, 可实现运营主体的自主运行和协同管理^[7-8]。文献[9]提出了基于主从博弈的社区综合能源系统协同优化运行策略, 以综合能源销售商为

领导者,新能源冷热电运营商和负荷聚合商为跟随者,但领导者仍具有过多中心化机构特性。文献[10]基于有向图的通信拓扑,建立了考虑需求响应的社区综合能源系统能量管理模型,使用拉格朗日乘子法解耦成3个完全平等的子系统,并用一致性协议求解。但该模式缺少监管,各运营商有足够的动机为了自身利益而篡改系统参数,且无法抵御恶意攻击。

区块链作为高度去信任、去中心化的数据库,能够实现计算过程透明化、信息不可篡改,弥补了分散式能量交互的缺点^[11-12]。文献[13]首次将区块链技术应用用于微电网中分布式电源间的分散协调控制,应用区块链技术提高了交替方向乘子法(alternate direction multiplier method, ADMM)运算过程的公平性和可靠性。文献[14]针对多个微电网之间的能量交易和控制,基于区块链设计了包含金融层、网络层和物理层的多层控制模型。区块链可审计能量流和金融交易的完整性和有效性。以上文献主要集中于电力系统,很少有文献研究区块链技术在综合能源系统能量交互中的应用。

本文针对分散的园区级热-电综合能源系统,基于区块链技术的特点,分析区块链技术应用用于分散式的交互模型和算法的可行性。进而提出 IES 分散式能量交互的双层结构模型,包含应用拉格朗日乘子法解耦的物理层交互模型;以成本增量为一致性变量,以智能合约、分布式记账、数字签名等区块链技术为构架的信息层数据传递模型。算例证明,利用区块链技术与分散式交互方法可以保障 IES 能量交互的隐私性、公平性和安全性。

1 区块链的应用可行性

1.1 区块链的特点

区块链最初是比特币交易的核心支撑技术,是分布式数据存储、智能合约、加密算法等计算机技术的新型应用模式^[15],可视为一个特殊的分布式存储数据库^[16]。在区块链中,区块依据存储信息对应生成的哈希密码有序连接,各节点都可以参与区块信息确认、记录和读取,运行流程分散化、透明化、程序化,具有去中心、去信任和信息不可篡改的特点。

区块链可分为公有链、私有链、联盟链3类^[17]。公有链没有监管机构,任何节点都可以参与区块的记录和维护,节点间仅依靠既定的规则运行,完全去中心、去信任,但吞吐量受限,运行速度很低;私有链通常建立在企业内部,节点是预先确定的,仅有少量节点拥有记录和维护权,中心化严重,但运行速度快;联盟链一般由多个主体共同发起,参与节点需通过联盟认证,各主体可共同维护和管理区块链,具有运行速

度快、可扩展性高、互操作性强和安全性高的特点。由于综合能源系统由多个能源运营主体组成,选择联盟链最为合适。

1.2 区块链与分散式交互模型

在分散式的能量交互模型中,热、电系统子模型的地位平等。运行过程中,子模型无需得知其他子模型的运行参数,只需要交换协同计算过程中的一致性变量。各运营商的求解服务器均以自身利益最大为目标,进行 IES 的能量协同交互。分散式交互模型维护了各方利益和隐私,实现了系统的去中心化,但无法保证运营商忠实可靠,难以验证分散运行过程的公平性。针对分散式交互模型的优缺点,区块链技术对应的相似性和补充性如表1所示,因此区块链技术有望成为构建分散式 IES 能量交互的底层技术构架。

表1 分散式交互模型中应用区块链的可行性
Table 1 Feasibility of applying blockchain in decentralized interaction model

对比项目	区块链技术	分散式的能量交互
相似性	加密算法可对身份信息进行加密,其余节点不能查看其身份信息,只能读取对应的数字签名	运营商不需要对外公开自身系统参数及设备运行情况
	网络中没有监管机构,数据由节点共同维护和监管	系统中没有中央运营层,运营商之间相互通信,协同自治
	所有运行规则写入智能合约中,达到条件自动触发执行命令	各运营商需要根据运行模型和算法执行命令
补充性	加密算法确保身份信息与数字签名一一对应,若身份信息改变,签名将失效	系统内部信息容易被私自篡改
	智能合约运行过程公开透明,节点可随时查看运行数据	领导或聚合过程的公平性难以验证

1.3 区块链与分散式算法

一致性协议是分散式算法中的重要分支,一致性变量基于节点之间的通信而趋于一致,最终可得到分散式优化问题的最优解。关于一致性协议收敛性与最优性的证明可见文献[18-19]。基于无向联通图 $G(V, S)$ 构建分散式热-电 IES 的节点通信拓扑。其中 V 是节点集; S 是表示节点间通信线路的边界集。配电网运营商、热电联产运营商和锅炉运营商的节点集分别用 V_E 、 V_{CHP} 、 V_G 表示。无序节点对 (i, j) 表示 S 中连接节点 i 和节点 j 的一条通信线路。假设 $n \times n$ 阶的矩阵 A 为 $G(V, S)$ 的邻接矩阵,可定义一个矩阵 $L = [l_{ij}]$:

$$\begin{cases} l_{ii} = \sum_{i \neq j} a_{ij} \\ l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j, a_{ij} \in (0, 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示 A 的非对角线元素, 即节点 i 和节点 j 之间的通信边数。

定义 x_i 是由节点 i 广播并被区块保存的一致性变量, 当所有节点广播的一致性变量相等时, 即视为系统对于此次能量分配达成共识。由于节点的通信需要验证过程, 系统的一致性变量的收敛过程是离散的。

$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j(t), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$d_{ij} = \frac{|l_{ij}|}{\sum_{j=1}^n |l_{ij}|}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: t 是离散的时间索引; d_{ij} 是通信网络的随机行矩阵中的项。

一致性协议中应用区块链的可行性如表 2 所示, 一致性协议与区块链技术的理念高度一致, 区块链技术还弥补了一致性协议的不足, 提高了协议过程的安全性。

表 2 一致性协议中应用区块链的可行性
Table 2 Feasibility of applying blockchain in consensus protocol

对比项目	区块链技术	一致性协议
相似性	无中心化节点, 各节点地位对等	无中心化节点, 各节点之间可以相互通信
	各节点之间去信任, 共同维护区块中的信息一致	各节点通过交互迭代, 确保信息趋于一致
	所有运行规则公开透明, 节点随时可查询运行数据	一致性协议模型公开透明, 各节点按模型执行
补充性	信息需经过所有节点验证, 且加密传输	信息无需验证, 运行过程自动默认信息正确
	存储全局数据, 并保持全网同步	无法确保各自存储信息一致

2 IES 分散式能量交互双层结构模型

2.1 IES 能量交互双层结构

基于上述分析, 区块链技术与分散式的热-电 IES 有很高的契合度。如图 1 所示, 可将分散式 IES 能量交互划分为信息层和物理层。信息层是以区块链技术为支撑的通信网络, 可以实现节点间的点对点通信, 并提高通信的安全性、可靠性, 维护系统的隐私性和公平性。物理层可实现能量的交互。各运营商通过在区块链上部署服务器, 连接信息层和物理层。基于智能合约平台, 能量交互策略由服务器的信息层计算后, 下达至物理层执行。该策略是以各自运行成本最低为目标的分散式交互模型。

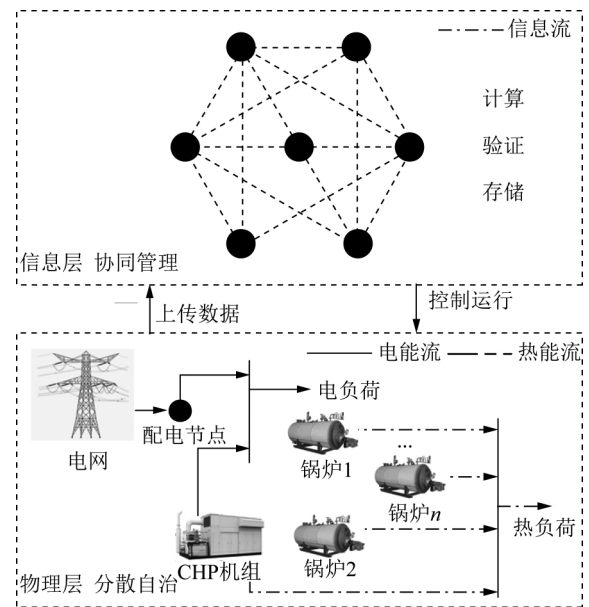


图 1 IES 能量交互双层结构

Fig. 1 Two-layer structure of IES energy interaction

2.2 物理层的能量交互模型

2.2.1 IES 成本模型

园区级热-电综合能源系统的能源交互主要包含了 3 种主体: 燃气/燃煤锅炉运营商、热电联产运营商、配电网运营商。燃气/燃煤锅炉运营商将化学能转化为热能, 为园区供暖; 配电网运营商即供电公司, 负责供应园区大部分电能; 热电联产运营商耦合了电能和热能, 可同时为园区供应热、电, 主要用于平衡和优化系统中的能量供给。三者独立运营, 构成园区的供热网络和供电网络。

配电网运营商采用耗量成本和线损成本来表征配电网对园区供电的成本模型, 在时间索引 t 下的供电成本为:

$$C_i^E(t) = a_i P_{E,i}^2(t) + b_i P_{E,i}(t) + c_i + \sigma_i r_{oi} l_i \quad (4)$$

式中: $C_i^E(t)$ 表示配电网运营商成本; $P_{E,i}(t)$ 表示配电网运营商在时间索引 t 下的计划供电功率; a_i 、 b_i 、 c_i 表示发电机组发电成本的费用系数; σ_i 表示网损费用系数; l_i 表示从电厂到园区的配电线路长度; r_{oi} 表示线路单位长度的交流电阻。

对于热电联产机组, 通常认为运行于最小凝汽工况, 这也和实际运行中的一般情况相符^[20]。在该工况下采取以热定电的运行模式, 其热电耦合模型可表示为:

$$P_{CHP,i}(t) = K_{CHP} H_{CHP,i}(t) = \frac{\eta_e}{(1 - \eta_e) \eta_h} H_{CHP,i}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{CHP,i}(t)$ 、 $H_{CHP,i}(t)$ 分别表示热电联产机组在时间索引 t 下的计划供电功率和供热功率; K_{CHP} 表示

热电耦合系数; η_e 表示机组的电效率; η_h 表示机组的热效率。最小凝汽工况下, 不考虑热电联产机组调节特性, K_{CHP} 视为一个常数^[18-19]。

因此, 热电联产机组索引 i 下的成本函数可写为:

$$C_i^{\text{CHP}}(t) = \phi_i + \beta_i [K_{\text{CHP}} H_{\text{CHP}, i}(t)] + \gamma_i [K_{\text{CHP}} H_{\text{CHP}, i}(t)]^2 + \delta_i H_{\text{CHP}, i}(t) + \theta_i H_{\text{CHP}, i}^2(t) + \varphi_i [K_{\text{CHP}} H_{\text{CHP}, i}(t)] H_{\text{CHP}, i}(t) \quad (6)$$

式中: $C_i^{\text{CHP}}(t)$ 表示热电联产机组成本; ϕ_i 、 β_i 、 γ_i 、 δ_i 、 θ_i 、 φ_i 为热电联产机组供能成本的费用系数。

当热电联产机组的负荷率小于 30% 时, 机组不在凝汽工况下, 机组效率低, 因此, 仅当热电联产机组的负荷率高于 30% 时, 该系统才会启动热电联产机组^[21], 即:

$$\begin{cases} P_{\text{CHP}, i}(t) = \begin{cases} P_{\text{CHP}, i}(t), & P_{\text{CHP}, i}(t) \geq 0.3 C_{\text{pi}} \\ 0, & P_{\text{CHP}, i}(t) < 0.3 C_{\text{pi}} \end{cases} \\ H_{\text{CHP}, i}(t) = \begin{cases} H_{\text{CHP}, i}(t), & P_{\text{CHP}, i}(t) \geq 0.3 C_{\text{pi}} \\ 0, & P_{\text{CHP}, i}(t) < 0.3 C_{\text{pi}} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{pi} 表示 i 号热电联产机组的额定功率。

锅炉运行成本可表示为:

$$C_i^{\text{GB}}(t) = v_i + \omega_i H_{\text{GB}, i}(t) + \nu_i H_{\text{GB}, i}^2(t) \quad (8)$$

式中: $C_i^{\text{GB}}(t)$ 表示锅炉运行成本; $H_{\text{GB}, i}(t)$ 表示锅炉在时间索引 t 下的计划供电热系数; v_i 、 ω_i 、 ν_i 分别为锅炉供热成本系数。

IES 能量交互的运行目标是系统总成本最低:

$$C^* = \min \left[\sum_{i \in V_E} C_i^E(t) + \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} C_i^{\text{CHP}}(t) + \sum_{i \in V_{\text{GB}}} C_i^{\text{GB}}(t) \right] \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i \in V_E} P_{E, i}(t) + \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} P_{\text{CHP}, i}(t) = P_D \\ \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} H_{\text{CHP}, i}(t) + \sum_{i \in V_{\text{GB}}} H_{\text{GB}, i}(t) = H_D \\ P_{E, i}^{\min} \leq P_{E, i}(t) \leq P_{E, i}^{\max} \\ P_{\text{CHP}, i}^{\min} \leq P_{\text{CHP}, i}(t) \leq P_{\text{CHP}, i}^{\max} \\ H_{\text{CHP}, i}^{\min} \leq H_{\text{CHP}, i}(t) \leq H_{\text{CHP}, i}^{\max} \\ H_{\text{GB}, i}^{\min} \leq H_{\text{GB}, i}(t) \leq H_{\text{GB}, i}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: C^* 为系统总成本; P_D 为园区的电功率需求; H_D 为园区的热功率需求; $P_{E, i}^{\min}$ 、 $P_{\text{CHP}, i}^{\min}$ 、 $P_{E, i}^{\max}$ 、 $P_{\text{CHP}, i}^{\max}$ 分别表示配电网以及热电联产运营商节点 i 的电功率下限和上限; $H_{\text{CHP}, i}^{\min}$ 、 $H_{\text{GB}, i}^{\min}$ 、 $H_{\text{CHP}, i}^{\max}$ 、 $H_{\text{GB}, i}^{\max}$ 分别表示热电联产运营商以及锅炉节点 i 的热功率下限和上限。

2.2.2 模型解耦

在分散式的能量交互中, 各节点均以自身成本最低为目标。使用拉格朗日乘子法, 将上述凸优化问题解耦成 3 个子系统问题。为此, 先构造该问题的拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} \Gamma[P(t), H(t), \lambda(t), \mu(t)] = & \sum_{i \in V_E} C_i^E(t) + \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} C_i^{\text{CHP}}(t) + \sum_{i \in V_{\text{GB}}} C_i^{\text{GB}}(t) + \\ & \lambda(t) [P_D - \sum_{i \in V_E} P_{E, i}(t) - \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} K_{\text{CHP}} H_{\text{CHP}, i}(t)] + \\ & \mu(t) [H_D - \sum_{i \in V_{\text{CHP}}} H_{\text{CHP}, i}(t) - \sum_{i \in V_{\text{GB}}} H_{\text{GB}, i}(t)] \quad (11) \end{aligned}$$

式中: $P(t)$ 表示系统的电功率向量, 若节点 n 不供电, 则 $P_n(t) = 0$; $H(t)$ 表示系统的热功率向量, 若节点 n 不供热, 则 $H_n(t) = 0$; $\lambda(t)$ 和 $\mu(t)$ 是拉格朗日乘子, 分别表示时间索引 t 下电功率和热功率的成本增量。

由于每个子系统存在不同的全局约束, 可将 $\lambda(t)$ 和 $\mu(t)$ 解耦:

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} 2a_i P_{E, i}(t) + b_i, & i \in V_E \\ 0, & i \in V_{\text{CHP}} \\ 0, & i \in V_{\text{GB}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_i(t) = \begin{cases} 0, & i \in V_E \\ (2\gamma_i K_{\text{CHP}} + 2\theta_i + 2\varphi_i K_{\text{CHP}}) H_{\text{CHP}, i}(t) + \beta K_{\text{CHP}} + \delta_i - \lambda_i K_{\text{CHP}}, & i \in V_{\text{CHP}} \\ 2\nu_i H_{\text{GB}, i}(t) + \omega_i, & i \in V_{\text{GB}} \end{cases} \quad (13)$$

将系统的拉格朗日函数解耦成仅包含就地约束的子系统优化问题, 存于各节点的服务器中单独运行。

1) 配电网运营商子问题 ($i \in V_E$):

$$\min C_i(t) - \lambda_i(t) P_{E, i}(t) \quad (14)$$

$$\text{s. t. } P_{E, i}^{\min} \leq P_{E, i}(t) \leq P_{E, i}^{\max} \quad (15)$$

2) 热电联产运营商子问题 ($i \in V_{\text{CHP}}$):

$$\min [C_i^{\text{CHP}}(t) - \lambda_i(t) P_{\text{CHP}, i}(t) - \mu_i(t) H_{\text{CHP}, i}(t)] \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} P_{\text{CHP}, i}^{\min} \leq P_{\text{CHP}, i}(t) \leq P_{\text{CHP}, i}^{\max} \\ H_{\text{CHP}, i}^{\min} \leq H_{\text{CHP}, i}(t) \leq H_{\text{CHP}, i}^{\max} \\ P_{\text{CHP}, i}(t) = \begin{cases} P_{\text{CHP}, i}(t), & P_{\text{CHP}, i}(t) \geq 0.3 C_{\text{pi}} \\ 0, & P_{\text{CHP}, i}(t) < 0.3 C_{\text{pi}} \end{cases} \\ H_{\text{CHP}, i}(t) = \begin{cases} H_{\text{CHP}, i}(t), & P_{\text{CHP}, i}(t) \geq 0.3 C_{\text{pi}} \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

3) 锅炉运营商子问题 ($i \in V_{\text{GB}}$):

$$\min [C_i^{\text{GB}}(t) - \mu_i(t) H_{\text{GB}, i}(t)] \quad (18)$$

$$\text{s. t. } H_{GB,i}^{\min} \leq H_{GB,i}(t) \leq H_{GB,i}^{\max} \quad (19)$$

2.3 信息层的数据传递模型

2.3.1 一致性变量

系统内各运营商组成能量交互的联盟链,目标是各节点服务器使用一致性协议和分布式数据存储、智能合约、加密算法等区块链技术,使联盟对能量交互达成共识,并确保过程安全可靠。选取交互模型中 $\mu(t)$ 和 $\lambda(t)$ 分别作为热能系统和电能系统的一致性变量,节点服务器将基于其余节点更新自身一致性变量:

$$\mu_i(t+1) = \sum_{j \in V_H} d_{ij} \mu_j(t), i \in V_{CHP} \cup V_{GB} \quad (20)$$

$$\lambda_i(t+1) = \sum_{j \in V_P} d_{ij} \lambda_j(t), i \in V_E \quad (21)$$

由于能量交互需要满足供需平衡,不考虑需求侧响应的情况下,当供给量超过需求量,能量交互的收敛方向应为负,即减少供给;当需求量超过供给量,收敛方向应为正,即增加供给。可通过选举,在热能系统和电能系统各选取一个公信力较高的节点作为领导节点 i_H 、 i_P 用于获取热、电功率供需差额,判断 $\mu_i(t)$ 和 $\lambda_i(t)$ 的收敛方向,该系统直接选取热电联产运营商作为领导节点 i_H ,供电公司作为领导节点 i_P 。

$$\mu_{i_H}(t+1) = \sum_{j \in V_{CHP}} d_{ij} \mu_j(t) + \sum_{j \in V_G} d_{ij} \mu_j(t) + \xi \Delta H(t) \quad (22)$$

$$\lambda_{i_P}(t+1) = \sum_{j \in V_E} d_{ij} \lambda_j(t) + \xi' \Delta P(t) \quad (23)$$

$$\Delta P(t) = P_D - \left[\sum_{i \in V_E} P_{E,i}(t) + \sum_{i \in V_{CHP}} K_{CHP} H_{CHP,i}(t) \right] \quad (24)$$

$$\Delta H(t) = H_D - \left[\sum_{i \in V_{CHP}} H_{CHP,i}(t) + \sum_{i \in V_{GB}} H_{GB,i}(t) \right] \quad (25)$$

式中: $\mu_{i_H}(t+1)$ 、 $\lambda_{i_P}(t+1)$ 分别表示领导节点 i_H 、 i_P 更新的拉格朗日乘子; ξ 、 ξ' 是收敛系数($\xi > 0$, $\xi' > 0$),表示收敛速度。

2.3.2 信息传递构架

变量 $\lambda_i(t)$ 、 $\mu_i(t)$ 、 $P(t)$ 和 $H(t)$ 均属于区内记录的信息 M_i^t 。在联盟链中,信息传递的流程如图2所示。

首先,运营商需要获得联盟认证,将子问题模型中的参数存于本地服务器中,并根据参数生成用于签名的私钥和用于验证的公钥。私钥和公钥均嵌有加密的参数信息,但信息无法解密,运营商也无法再私自更改设备参数。各主体的服务器加入网络后,均存有相同的能量交互区块链。节点各自计算自身最优功率,并将 $\lambda_i(t)$ 、 $\mu_i(t)$ 和时间索引 t 下的最优功率值记录于 M_i^t 并广播至网络中,其余节点基于 M_i^t 的摘要、公钥、上一区块状态等关键信息对 M_i^t 的正确性和发布 M_i^t 的节点身份进行验证。当通过验证的节点大于 $n/2$ 视为达成共识, M_i^t 将写入新的区块内,并通过广播接入各节点的区块链,各节点更新系统的区块状态。

3 求解流程

对于基于区块链的IES分散式能量流交互,所有的运行流程以计算机语言写入系统的智能合约中自动执行。具体流程如图3所示,节点首先调取变量初值并广播,领导节点获取功率差额,同时所有节点更新 $\mu_i(t)$ 和 $\lambda_i(t)$,并按照式(14)~(19)对本地功率值进行寻优。这些信息暂时写入 M_i^t 并标记有数字签名,节点 M_i^t 广播至邻接节点。各节点基于 M_i^t 的摘

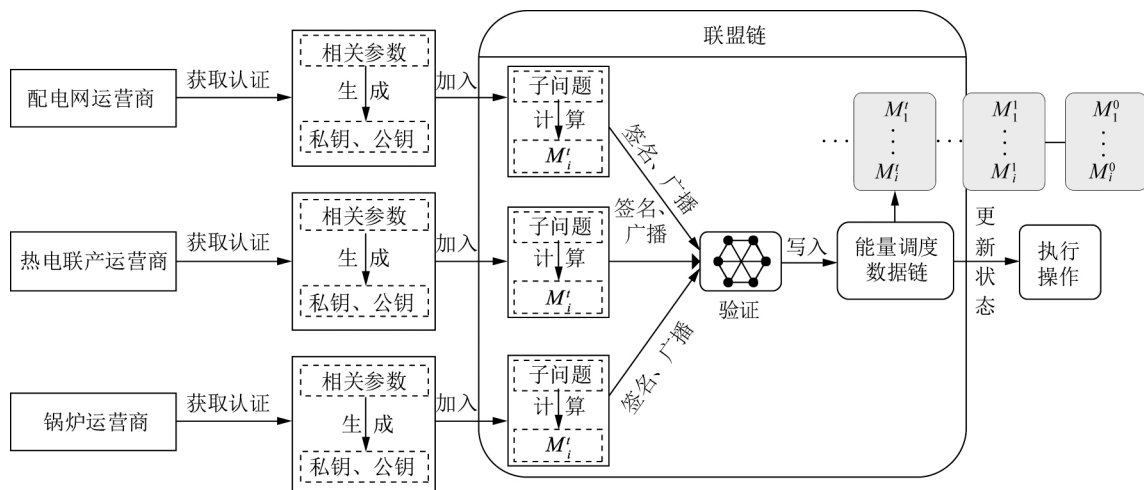


图2 基于区块链的IES能量交互运行构架

Fig. 2 Blockchain-based IES energy interaction operation framework

要、公钥和上一区块状态等关键信息验证 M_i^t 及节点身份,若超过 $n/2$ 的邻接节点判定为真, M_i^t 可写入新区块,否则记录并修正错误后,该节点重新计算各变量。当系统满足以下条件,则表示供电网络中 $\lambda_i(t)$ 相等且供热网络中的 $\mu_i(t)$ 相等,即各节点对能量供给分配达成了共识,便可各自输出自身的最优功率值,否则进行下一轮迭代。

$$\begin{cases} |\Delta H(t)| < \varepsilon \\ |\Delta P(t)| < \varepsilon \\ |\mu_i(t) - \mu_i(t-1)| < \varepsilon', i \in V_H \\ |\lambda_i(t) - \lambda_i(t-1)| < \varepsilon', i \in V_P \end{cases} \quad (26)$$

式中: ε 表示允许的功率偏差; ε' 表示 $\mu_i(t)$ 和 $\lambda_i(t)$ 的收敛精度。

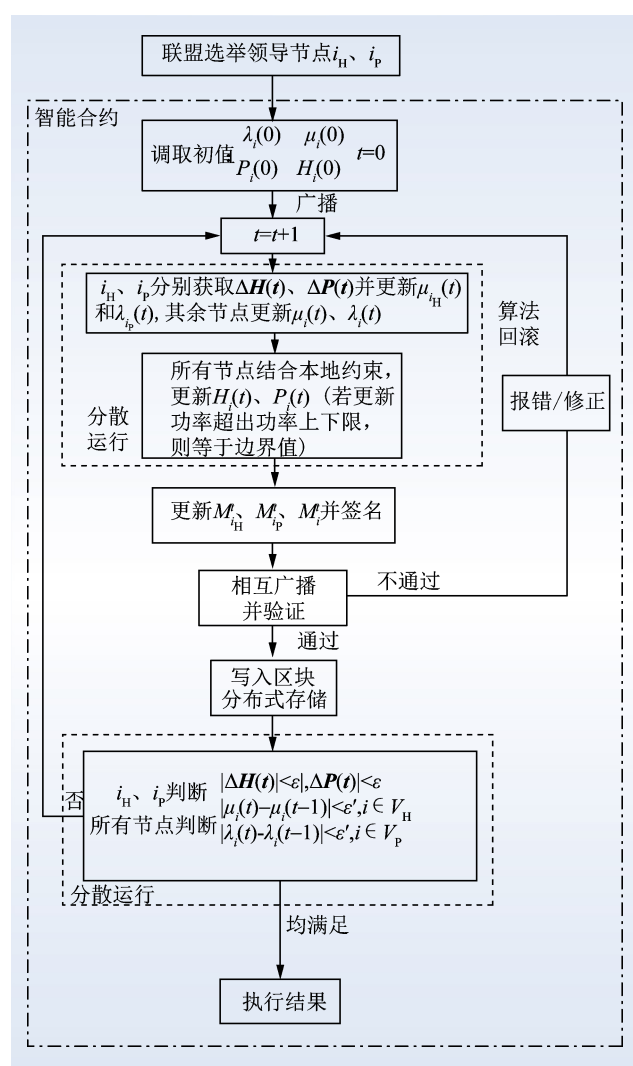


图 3 基于区块链的一致性算法流程

Fig. 3 Blockchain-based consensus algorithm flow

4 算例与分析

为验证所提算法的有效性和区块链技术应用的优越性,通过算例进行仿真计算。假设某园区级 IES

的能量供给侧含有 6 个主体节点:供电公司、热电联产机组和 4 个小型燃气锅炉组件,分别为 1~6 号节点。各节点间可以相互通信,共同构成能源供给联盟链。假设节点之间可以点对点直接通信,但通信存在一定的网络延时。各节点的运行参数和初始功率值如表 3 所示。

表 3 各节点的运行参数和初始变量值

Table 3 Operating parameters and initial variable values of each node

主体	系统参数	容量/kW	初始功率/kW
供电公司	$a_1 = 0.000\ 6$	$[0, 1\ 000]$	$P_1(0) = 100$
	$b_1 = 0.302$		
	$c_1 = 0.02$		
	$\sigma_1 r_{01} l_1 = 0.000\ 6$		
热电联产	$\gamma_2 = 0.004\ 42$	$[0, 80]$ 热	$H_2(0) = 50$
	$\theta_2 = 0.037\ 03$		
	$\beta_2 = 1.682\ 50$		
	$\delta_2 = 0.645\ 00$		
	$\phi_2 = 0.033\ 95$		
	$\varphi_2 = 0.055\ 90$		
锅炉 1	$K_{\text{CHP}} = 0.665\ 88$	$[0, 80]$	$H_3(0) = 40$
	$v_3 = 0.054\ 1$		
	$\omega_3 = 2.216$		
锅炉 2	$v_3 = 0.015\ 0$	$[0, 90]$	$H_4(0) = 70$
	$v_4 = 0.050\ 0$		
	$\omega_4 = 2.163$		
锅炉 3	$v_4 = 0.013\ 2$	$[0, 70]$	$H_5(0) = 60$
	$v_5 = 0.062\ 1$		
	$\omega_5 = 1.618$		
锅炉 4	$v_5 = 0.015\ 4$	$[0, 70]$	$H_5(0) = 55$
	$v_6 = 0.049\ 2$		
	$\omega_6 = 2.471$		
	$v_6 = 0.017\ 1$		

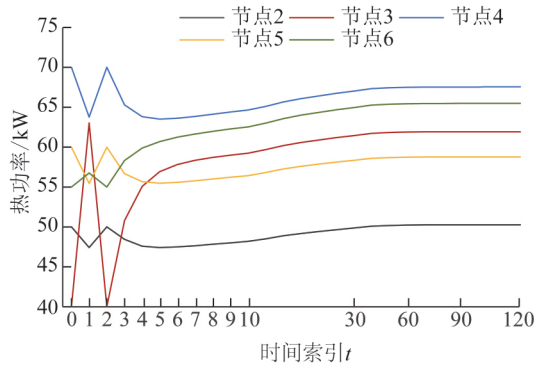
假设某次能量交互, IES 所需电功率 $P_D = 420.15\ \text{kW}$, 所需热功率 $H_D = 303.96\ \text{kW}$, 允许功率偏差 $\varepsilon = 0.01$, 收敛系数 $\xi = 0.000\ 8$, $\xi' = 0.000\ 2$, 收敛精度 $\varepsilon' = 0.003$ 。

情景 1: 在此次交互计算前, 3 号节点锅炉 1 为追逐利益, 篡改系统内部参数: $v_3 = 0.038\ 7$, 以提高自身出力。对比没有区块链技术支撑的 IES 分散式能量交互, 系统运行过程如图 4 所示。若没有区块链技术, 节点 3 (锅炉 1) 出力大幅提升, H_3 由 $61.925\ 9\ \text{kW}$ 升至 $80.000\ 0\ \text{kW}$ 满载运行。 H_2 由 $50.261\ 5\ \text{kW}$ 降至 $46.881\ 7\ \text{kW}$, H_4 由 $67.533\ 9\ \text{kW}$ 降至 $62.364\ 4\ \text{kW}$, H_5 由 $58.765\ 2\ \text{kW}$ 降至 $54.601\ 0\ \text{kW}$, H_6 由 $65.475\ 3\ \text{kW}$

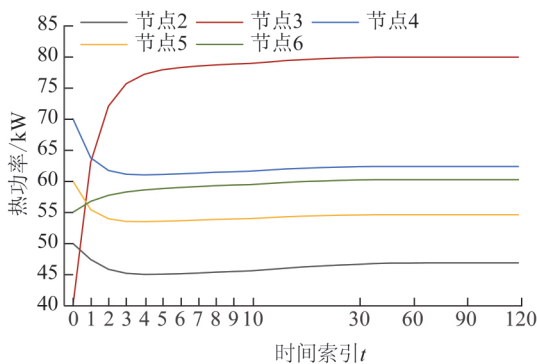
降至 60.223 9 kW。除锅炉 1 外的所有热网节点利益均受损。而基于区块链的 IES 分散式能量交互中,私钥数字串随 3 号节点(锅炉 1)的系统参数发生改变,在

第一次广播时验证失败,迫使 3 号节点修正参数,从 $t=2$ 起以正确参数运行,在仅多了一次时间索引的情况下,记录本次错误,得到正确的功率分配,成功维护了分散式交互系统的公平性。

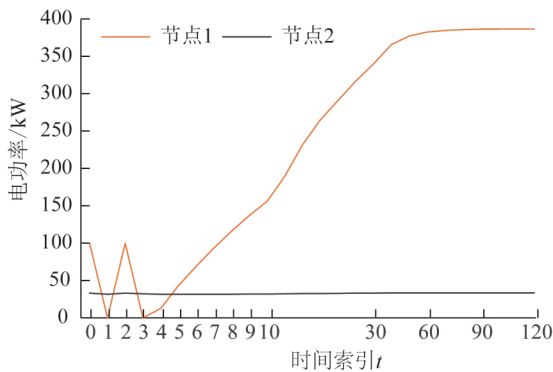
情景 2:在此次交互计算中,该系统受到外部恶意攻击, λ_1 和 μ_3 在通信时遭遇 3 次随机修改: $\lambda_1(15) = 0.67$ 、 $\mu_3(15) = 8.42$; $\lambda_1(60) = 1.41$ 、 $\mu_3(60) = 6.17$ 、 $\lambda_1(120) = 3.47$ 、 $\mu_3(120) = 12.12$ 。对比没有区块链技术支持的 IES 分散式能量交互,一致性变量的收敛过程如图 5 所示。若没有区块链技术支持,在遭遇攻击后,节点的一致性变量均随之发生剧烈波动,收敛时间显著增长。而基于区块链的 IES 分散式能量交互在广播过程中,变量遭遇外部修改,但验证失败,系统报错、算法回滚,重新计算一致性变量,相比于未受攻击的基于区块链的迭代计算过程仅多了 3 个时间



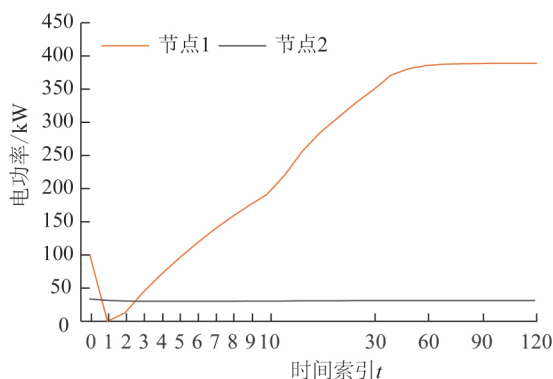
(a)基于区块链的节点热功率出力优化过程



(b)无区块链的节点热功率出力优化过程



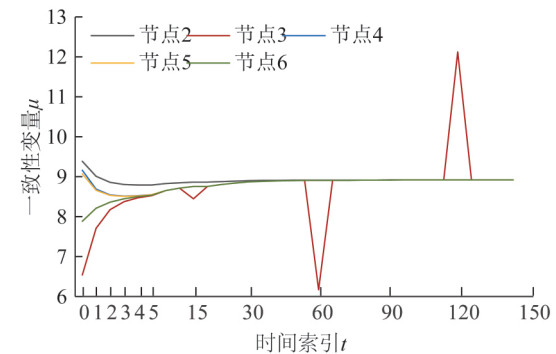
(c)基于区块链的节点电功率出力优化过程



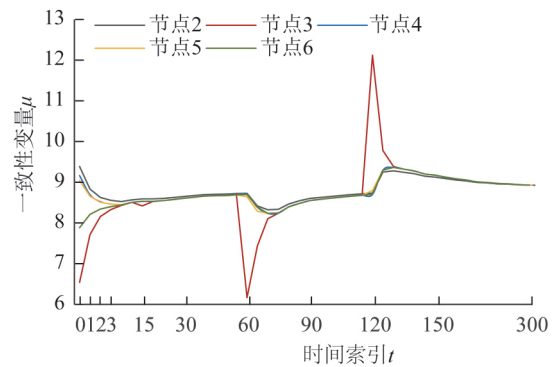
(d)无区块链的节点电功率出力优化过程

图 4 子系统参数遭遇篡改后的系统运行对比

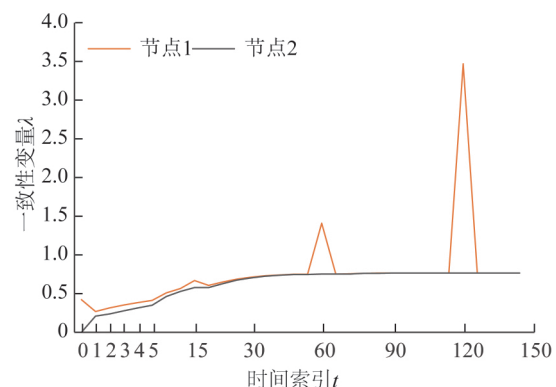
Fig. 4 System operation comparison after subsystem parameters tampered



(a)基于区块链的节点 $\mu_i(t)$ 收敛过程



(b)无区块链的节点 $\mu_i(t)$ 收敛过程



(c)基于区块链的节点 $\lambda_i(t)$ 收敛过程

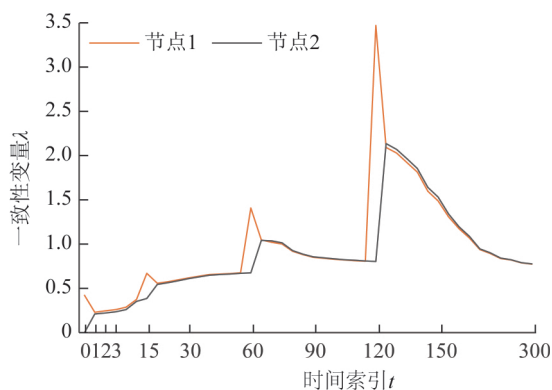
(d)无区块链的节点 $\lambda_i(t)$ 收敛过程

图 5 通信过程遭遇外部攻击时系统运行对比
Fig. 5 System operation comparison when the communication process encounters external attacks

索引。由于存入区块中的数值是正确的信息,也不会对其余节点造成影响。因此,区块链技术也极大提高了分散式交互系统的安全性。

5 总结与展望

本文所提模型在区块链技术与多能交互融合应用方面取得了阶段性成果。

1) 基于区块链的 IES 分散式能量交互在保证主体运营隐私的同时,能有效避免主体私自篡改子系统参数的问题,既实现了系统去中心化也提高了系统的公平性。

2) 基于区块链的 IES 分散式能量交互能抵御外部对通信信息的攻击,确保传递信息的正确性,显著提高了系统的安全性。

但对于应用落地,还需从能量流多时间尺度特性、区块链技术局限性以及系统可持续发展性等多方面进行更深入的探讨和研究。

6 参考文献

- [1] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [2] 苏俊妮,张鑫,赵俊伟,等. 计及需求响应和储能的气电综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 1-8.
SU Junni, ZHANG Xin, ZHAO Junwei, et al. Optimal dispatching of integrated electricity-gas system considering demand response and energy storage [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 1-8.
- [3] WANG M L, ZHANG T, WANG P H, et al. An improved harmony search algorithm for solving day-ahead dispatch optimization problems of integrated energy systems considering time-

- series constraints[J]. Energy and Buildings, 2020, 229: 110477.
- [4] 王磊,姜涛,宋丹,等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 151-159.
WANG Lei, JIANG Tao, SONG Dan, et al. Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 151-159.
- [5] 代贤忠,韩新阳,董益华,等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 1-9.
DAI Xianzhong, HAN Xinyang, DONG Yihua, et al. Multi-source and multi-level coordination optimization method of energy Internet [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 1-9.
- [6] 魏震波,黄宇涵. 计及需求侧管理的多电-气互联综合能源系统分散协调调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 277-285.
WEI Zhenbo, HUANG Yuhuan. Decentralized coordinated dispatch for multiple integrated electricity-gas energy systems considering demand side management [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 277-285.
- [7] WANG L X, JING Z X, ZHENG J H, et al. Decentralized optimization of coordinated electrical and thermal generations in hierarchical integrated energy systems considering competitive individuals[J]. Energy, 2018, 158: 607-622.
- [8] 王海洋,李珂,张承慧,等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5435-5445.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on stackelberg game [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5445.
- [9] 马丽,刘念,张建华,等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3655-3662.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy management of community energy Internet based on leader-followers game[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655-3662.
- [10] 郭斌. 基于一致性的综合能源系统分布式能量管理方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
GUO Bin. Consensus-based distributed energy management method for integrated energy system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [11] 曾鸣,程俊,等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, et al. Preliminary research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.
- [12] 王胜寒,郭创新,冯斌,等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 10-24.
WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: Prospects and ideas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 10-24.
- [13] MÜNSING E, MATHER J, MOURA S. Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks

- [C]//2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Maui, HI, USA: IEEE, 2017: 2164-2171.
- [14] LI Z Y, BAHRAMIRAD S, PAASO A, et al. Blockchain for decentralized transactive energy management system in networked microgrids[J]. The Electricity Journal, 2019, 32(4): 58-72.
- [15] 谭磊, 陈刚. 区块链 2.0 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 22-38.
- [16] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [17] 余维, 顾志豪, 杨晓宇, 等. 异构能源区块链的多能互补安全交易模型[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3193-3201.
SHE Wei, GU Zhihao, YANG Xiaoyu, et al. A model of multi-energy complementation and safety transaction on heterogeneous energy blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3193-3201.
- [18] ZHANG Z A, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [19] YANG S, TAN S, XU J X. Consensus Based Approach for Economic Dispatch Problem in a Smart Grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [20] 陈磊, 徐飞, 王涛, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [21] 邱实. 基于负荷侧响应的含储热热电联产的风电消纳研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
QIU Shi. Research on wind power consumption of CHP with thermal energy storage based on the demand response. [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

收稿日期: 2020-12-31

作者简介:

刘玉成(1972) 男, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制;

段炼(1987) 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制;

班晓萌(1993) 女, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制;

黄伟(1962) 男, 博士, 教授, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制, 电力系统需求侧响应;

左欣雅(1998) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制, 区块链技术;

张莞嘉(1997) 女, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为综合能源系统规划与控制, 微网控制及新能源并网, E-mail: zhangwanjia@ncepu.edu.cn。

(编辑 刘文莹)