

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231205

结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法

王桂兰^{1,2}, 曾康为^{1,2}, 刘宏³, 张海晓^{1,2}

(1. 华北电力大学计算机系, 河北 保定 071003; 2. 河北省能源电力知识计算重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 分布式能源的日益普及与随之而来更复杂的能源系统结构, 极大地增加了传统集中式求解能源协同优化问题的难度与成本。分布式优化方法与复杂的能源结构有良好的适配性, 但缺少天然可信的协调中心, 存在主体隐私保护困难、主体间交互数据真伪难辨等问题, 因此提出了结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法。首先, 引入协调者角色组成协调委员会, 并利用无偏随机排序算法选取协调者。之后, 通过分解协调算法将协调优化问题解耦为上下两层的求解最优值问题, 并利用区块链共识算法保障多协调者间可信。然后, 设计了双区块链园区综合能源系统数据存储模型, 保证数据安全和交易链效率。最后, 仿真实验表明结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法可公平选取协调者, 有效实现园区综合能源协同优化、降低节点作恶影响、保护数据隐私, 具有较好的鲁棒性和容错性。

关键词: 综合能源系统; 多主体; 区块链; 能源协同; 协调者

A trustworthy coordination optimization method for a comprehensive energy system in parks based on blockchain

WANG Guilan^{1,2}, ZENG Kangwei^{1,2}, LIU Hong³, ZHANG Haixiao^{1,2}

(1. Department of Computer, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Knowledge Computing for Energy & Power, Baoding 071003, China; 3. Micro Game and Competition Among Devices based on Consensus Algorithm, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Information and Communication Branch, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The increasing popularity of distributed energy and the accompanying more complex energy system structures have greatly increased the difficulty and cost of traditional centralized energy collaborative optimization problems. Distributed optimization methods have good adaptability to complex energy structures, but they suffer from problems such as a lack of natural and trustworthy coordination centers, difficulty in protecting subject privacy, and in distinguishing the authenticity of inter subject interaction data. This paper proposes a trustworthy coordination optimization method for an integrated energy system in a park. It combines with blockchain technology. A coordinator role is introduced to form a coordination committee, and an unbiased random sorting algorithm is used to select coordinators. The coordination optimization problem is decoupled into a two-layer optimal value problem by a decomposition coordination algorithm, and a blockchain consensus algorithm is used to ensure the trustworthiness of multiple coordinators. A data storage model is designed for a comprehensive energy system in a dual blockchain park to ensure data security and transaction chain efficiency. Simulation experiments have shown that the trustworthy coordination optimization method for the comprehensive energy system in the park, combined with blockchain, can fairly select coordinators, effectively achieve comprehensive energy coordination optimization in the park, reduce the impact of node wrongdoing, protect data privacy, and have good robustness and fault tolerance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62171185).

Key words: integrated energy system; multi subject; blockchain; energy synergy; coordinator

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62171185)

0 引言

随着能源革命持续推进、能源技术不断突破,分布式能源设备在园区终端侧的安装率不断提高,用户“自发自用”的供用能方式愈发普及,并多以交易池模式进入分布式能源市场^[1-3]。交易池模式由控制中心收集市场主体信息,根据各方约束求解能源调度问题最优解^[4]。然而,随着分布式能源的普及与能源系统结构的日益复杂,控制中心收集信息与求解优化问题变得更加困难;交易池模式管理、维护海量信息需要第三方管理服务的参与,降低了系统效率,增加了成本^[5]。同时,集中式控制模式限制了参与方对内部数据隐私和自主调度的诉求。因此,一些学者开展了分布式控制的综合能源调度算法研究,主要包含纯分布式和分解协调两类分布式算法。典型的纯分布式算法包括辅助问题原理(auxiliary problem principle, APP)^[6]、最优性条件分解(optimality condition decomposition, OCD)^[7]等算法,分解协调算法中最典型的算法是交替方向乘子法(alternating direction multipliers method, ADMM)^[8]。文献[9]利用 APP 算法解决了多区域有功负荷经济调度问题。文献[10]运用 APP 算法通过对电动汽车个体之间的关系进行解耦,优化了电动汽车个体调度。文献[11]结合 OCD 算法设计了一种动态乘法器,利用完全分散的方式求解多区域分布式经济调度问题。文献[12]利用 ADMM 优化输配电网间的协调规划。文献[13]利用 ADMM 构建了多主体参与的综合能源系统分布式调度模型。以上研究均以数学方法解决分布式优化问题,默认存在协调中心,但综合能源系统中多种主体处于平等地位,不存在天然的协调中心。同时,某些主体可能为谋取不当利益发布虚假信息,系统存在信任危机问题。

区块链具有可追踪、不可篡改、公开透明等特点,适合处理多主体间可信协作问题^[14]。目前已有一些学者将区块链技术应用于能源协同领域。文献[15]提出了一种基于区块链和禀赋效应的主动配电网经济运行方法,提升主动配电网运行的经济性和源荷匹配性。文献[16]提出了一种以凸优化证明共识机制,为核心的新型能源区块链底层技术,突破了区块链在电力系统复杂场景应用的技术瓶颈。文献[17]研究结合区块链的多虚拟电厂优化运行机制,设计了基于主从博弈的多区块链虚拟电厂系统。文献[18]设计了基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度模式。文献[19]结合梯度修正与区块链

方法解决了分布式经济调度问题。文献[20]利用超级账本技术搭建联盟区块链交易平台,以透明、可靠的方式为大用户直购电提供了新思路。以上研究大多仅利用了区块链不可篡改、公开透明的机制,未涉及区块链在能源协同中的深入应用。文献[21]利用区块链解决多能协同问题,但未考虑角色选取算法和区块链协同存储的效率问题,仅涉及一个迭代周期的实验与数据分析,缺乏完整的迭代过程。

本文提出了结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法,仿真实验表明,本文方法可无偏差公平选取协调者,有效实现园区综合能源协同优化、降低节点作恶影响、保护数据隐私,具有较好的鲁棒性和容错性。

1 结合双链技术的园区综合能源系统模型

本文设计了由交易链和协调链构成的双链^[22]结构的园区综合能源协同框架。其中,交易链为传统的综合能源交易区块链网络,实现能源交易的自动化、智能化和透明化,提升能源市场的效率和公平性。协调链用于辅助园区综合能源系统的信息协调优化,由各园区综合能源系统分别维护。能源交易首先在园区各微网间进行,当供求不平衡时,通过外部能源市场交易达成平衡。国内已投入使用的交易链有华电链、国能链等。

本文研究场景为多个微网组成的多园区综合能源系统,每个微网包含 4 种能源(电、气、热、冷),并部署一个区块链节点。区块链节点负责收集所在微网内部的信息,并根据电、冷、热、气能源的价格计算产销量,辅助控制设备的运行。园区综合能源系统架构如图 1 所示,园区内设备分类如表 1 所示。

1.1 目标函数

本文以园区综合能源系统的总经济运行成本最小为目标,总运行成本 c_{total} 由式(1)计算得出。

$$\min c_{\text{total}} = \sum_{t \in S_T} (\rho_{im,t}^E E_{im,t}) + (\rho_{im,t}^G G_{im,t}) + \sum_{t \in S_T} \sum_{j \in S_{\text{CNT}}} c_{j,t} \quad (1)$$

式中: S_T 表示时段集合; $\rho_{im,t}^E$ 、 $\rho_{im,t}^G$ 分别表示时段 t 微网 m 中设备 i 从外部进口的电、气价格; $E_{im,t}$ 、 $G_{im,t}$ 分别表示时段 t 微网 m 中设备 i 外部进口电、气量; S_{CNT} 表示产消设备集合; $c_{j,t}$ 表示时段 t 产消设备 j 的成本。

1.2 平衡约束和设备约束

园区电、气、热、冷多种能源各自的供需平衡约束如式(2)所示。

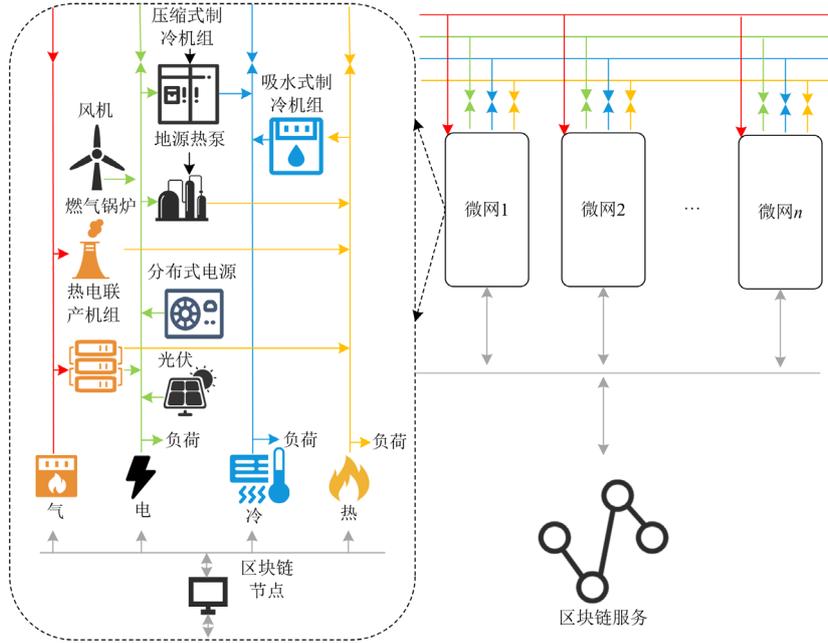


图 1 园区综合能源系统结构

Fig. 1 Integrated energy system structure of the park

表 1 系统设备

Table 1 Equipment situation within the system

设备	种类	功能
能量转换设备	压缩式制冷机组(compression electric refrigerator group, CERG)	电转冷
	地源热泵(ground source heat pump, GSHP)	电转冷、热
	热电联产机组(combined heat and power unit, CHP)	气转电、热
	燃气锅炉(gas boiler, GB)	气转热
	吸水式制冷机组(water absorption refrigerator group, WARG)	热转冷
能源产消设备	分布式电源(DG)	生产电
	负荷(load, L)	消耗电、热、冷

$$\begin{cases} E_{im,t} + \sum_{i \in S_{CNV}} E_{i,t} - \sum_{j \in S_{CNT}} u_{j,t}^E - \sum_{k \in S_{UNC}} u_{k,t}^E = 0 \\ G_{im,t} + \sum_{i \in S_{CNV}} G_{i,t} = 0 \\ \sum_{i \in S_{CNV}} H_{i,t} - \sum_{j \in S_{CNT}} u_{j,t}^H - \sum_{k \in S_{UNC}} u_{k,t}^H = 0 \\ \sum_{i \in S_{CNV}} C_{i,t} - \sum_{j \in S_{CNT}} u_{j,t}^C - \sum_{k \in S_{UNC}} u_{k,t}^C = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $E_{i,t}$ 、 $G_{i,t}$ 、 $H_{i,t}$ 、 $C_{i,t}$ 分别为时段 t 能量转换设备 i 的电、气、热、冷输出量； $u_{j,t}^E$ 、 $u_{j,t}^H$ 、 $u_{j,t}^C$ 分别为时段 t 产消设备 j 的电、热、冷消费量； S_{CNV} 为能量转换设备集合； S_{UNC} 为不可控能量产消设备集

合； $u_{k,t}^E$ 、 $u_{k,t}^H$ 、 $u_{k,t}^C$ 分别为时段 t 不可控能量产消设备 k 的电、热、冷消费量。

园区各设备运行约束均以二次函数形式建模，其中： η^a 和 η^b 分别表示单输入单输出设备的二次项系数和一次项系数； η^{a_1} 、 η^{a_2} 和 η^{b_1} 、 η^{b_2} 分别表示单输入多输出设备的二次项系数和一次项系数。

1) 压缩式制冷机组的约束

$$\begin{cases} C_{i,t} = \eta_{i(\text{CERG})}^a (-E_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{CERG})}^b (-E_{i,t}) \\ -E_{i,t} \leq E_i^{\text{in max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\eta_{i(\text{CERG})}^a$ 、 $\eta_{i(\text{CERG})}^b$ 为压缩式制冷机组设备 i 的电转冷效率参数； $E_i^{\text{in max}}$ 为机组设备电输入量上限。

2) 地源热泵的约束

$$\begin{cases} H_{i,t} = \eta_{i(\text{GSHP})}^{a_1} (-E_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{GSHP})}^{b_1} (-E_{i,t}) \\ C_{i,t} = \eta_{i(\text{GSHP})}^{a_2} (-E_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{GSHP})}^{b_2} (-E_{i,t}) \\ -E_{i,t} \leq E_i^{\text{in max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\eta_{i(\text{GSHP})}^{a_1}$ 、 $\eta_{i(\text{GSHP})}^{b_1}$ 为地源热泵设备 i 的电转热效率参数； $\eta_{i(\text{GSHP})}^{a_2}$ 、 $\eta_{i(\text{GSHP})}^{b_2}$ 为地源热泵设备 i 的电转冷效率参数。

3) 热电联产机组的约束

$$\begin{cases} E_{i,t} = \eta_{i(\text{CHP})}^{a_1} (-G_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{CHP})}^{b_1} (-G_{i,t}) \\ H_{i,t} = \eta_{i(\text{CHP})}^{a_2} (-G_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{CHP})}^{b_2} (-G_{i,t}) \\ -G_{i,t} \leq G_i^{\text{in max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\eta_{i(\text{CHP})}^{a_1}$ 、 $\eta_{i(\text{CHP})}^{b_1}$ 为热电联产机组设备 i 的气转电效率参数; $\eta_{i(\text{CHP})}^{a_2}$ 、 $\eta_{i(\text{CHP})}^{b_2}$ 为其气转热效率参数; $G_i^{\text{in max}}$ 为机组设备气输入量上限。

4) 燃气锅炉的约束

$$\begin{cases} H_{i,t} = \eta_{i(\text{GB})}^a (-G_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{GB})}^b (-G_{i,t}) \\ -G_{i,t} \leq G_i^{\text{in max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\eta_{i(\text{GB})}^a$ 、 $\eta_{i(\text{GB})}^b$ 为燃气锅炉设备 i 的气转热效率参数; $G_i^{\text{in max}}$ 表示锅炉设备气输入量上限。

5) 吸水式制冷机组的约束

$$\begin{cases} C_{i,t} = \eta_{i(\text{WARG})}^a (-H_{i,t})^2 + \eta_{i(\text{WARG})}^b (-H_{i,t}) \\ -H_{i,t} \leq H_i^{\text{in max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\eta_{i(\text{WARG})}^a$ 、 $\eta_{i(\text{WARG})}^b$ 表示吸水式制冷机组设备 i 的热转冷效率参数; $H_i^{\text{in max}}$ 表示机组设备热输入量上限。

6) 分布式电源

分布式电源属于出力可调的能量生产设备, 其成本函数 $c_{j,t}$ 可由式(8)计算得出。

$$\begin{cases} c_{j,t} = \alpha_{j(\text{DG})} (-u_{j,t}^E)^2 + \beta_{j(\text{DG})} (-u_{j,t}^E) + \varphi_{j(\text{DG})} \\ -u_{j,t}^E \leq u_j^{\text{Eout max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_{j(\text{DG})}$ 、 $\beta_{j(\text{DG})}$ 、 $\varphi_{j(\text{DG})}$ 分别表示分布式电源设备 j 二次项系数、一次项系数和常数项; $u_j^{\text{Eout max}}$ 为电源设备电输出量上限。

式(3)一式(8)均是局部设备级约束, 式(2)是微网间的耦合。将式(2)松弛到目标函数式(1), 将所有的设备都划分到所属的微网, 可得式(9)。

$$\begin{aligned} L = & \sum_{t \in S_T} [(\rho_{im,t}^E - \lambda_t^E) E_{im,t} + (\rho_{im,t}^G - \lambda_t^G) G_{im,t}] + \\ & \sum_{m \in S_M} \sum_{t \in S_T} (\lambda_t^E E_{m,t} + \lambda_t^G G_{m,t} + \lambda_t^H H_{m,t} + \lambda_t^C C_{m,t}) + \\ & \sum_{m \in S_M} \sum_{t \in S_T} \sum_{j \in S_{\text{CNT}} \cap S_m} c_{j,t} = B(\lambda, \mathbf{R}_{im}) + \sum_{m \in S_M} L_m(\lambda, \mathbf{R}_m, \mathbf{c}_m) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: λ_t^E 、 λ_t^G 、 λ_t^H 、 λ_t^C 分别表示第 t 个时段约束电、气、热、冷 4 种能源供需平衡的拉格朗日乘子; S_M 表示微网集合; S_m 表示微网 m 内的设备集合; $E_{m,t}$ 、 $G_{m,t}$ 、 $H_{m,t}$ 、 $C_{m,t}$ 分别表示时段 t 微网 m 从其他微网进口的电、气、热、冷量; λ 表示全时段各能源拉格朗日乘子向量; \mathbf{R}_{im} 表示全时段系统从外部源进口的能源量向量; \mathbf{R}_m 表示全时段微网 m 从其他微网进口的能源量向量; \mathbf{c}_m 表示全时段微网 m 的设备成本函数向量。

则原优化问题可分解为式(10)、式(11)所示的子问题。

$$\begin{aligned} \min L_m(\lambda, \mathbf{R}_m, \mathbf{c}_m) = & \sum_{t \in S_T} \left(\lambda_t^E E_{m,t} + \lambda_t^G G_{m,t} + \right. \\ & \left. \lambda_t^H H_{m,t} + \lambda_t^C C_{m,t} \right) + \sum_{t \in S_T} \sum_{j \in S_{\text{CNT}} \cap S_m} c_{j,t} \quad (10) \\ \min B(\lambda, \mathbf{R}_{im}) = & \sum_{t \in S_T} [(\rho_{im,t}^E - \lambda_t^E) E_{im,t} + (\rho_{im,t}^G - \lambda_t^G) G_{im,t}] \quad (11) \end{aligned}$$

子问题(10)由各微网独立求解, 其约束根据微网内部设备情况, 包含式(2)和式(3)一式(8)中的部分或全部约束。子问题式(11)由上层协调者代理求解, 根据系统的能源供需不平衡情况调整 λ 。

2 结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法

本文将园区综合能源协同问题分解为独立又相互耦合的上下两层, 上层协调微网间的耦合子问题, 下层微网节点独立求解本节点内子问题, 上下两层迭代求解系统最优值。相应地, 区块链节点也分为上下两层, 上层区块链节点由被选取的协调者组成, 承担微网间协调计算任务, 下层区块链节点承担微网内计算任务。如图 2 所示, 结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法的流程包含 5 个阶段。

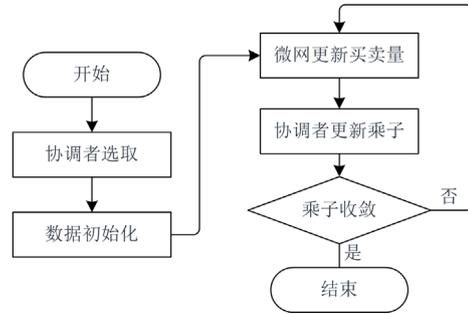


图 2 结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化流程
Fig. 2 Trustworthy coordination and optimization process of comprehensive energy system in parks combined with blockchain

1) 协调者选取阶段。在园区各微网约定时间, 由约定的微网节点发送选取协调者请求, 矿工将其打包到交易链上, 开始本轮协调优化流程。

2) 数据初始化阶段。上层协调者(上层区块链节点)初始化表示全时段各能源(电、气、热、冷)价格的拉格朗日乘子 $\lambda^{(0)} = \{\lambda_t^{E,0}, \lambda_t^{G,0}, \lambda_t^{H,0}, \lambda_t^{C,0}\}$, 并向园区内各微网发布; 同时, 初始化迭代步长 γ 以及误

差常数 ε 。

3) 微网更新买卖量阶段。下层微网(下层区块链节点)根据当前拉格朗日乘子(超半数上层协调者下发的一致乘子)求解式(10), 获得最优买卖量, 并提交到上层节点。

4) 乘子更新阶段。上层协调者通过共识机制对下层各微网的能源买卖量进行确认, 并打包到协调链上, 根据园区内各微网的能源买卖量代理求解当前系统电、气量缺口, 如式(12)所示; 由不平衡量更新乘子, 如式(13)所示。

$$E_{im,t} = \begin{cases} 0, \rho_{im,t}^E - \lambda_t^{E,i} > \varepsilon \\ E_{immid,t}^E, |\rho_{im,t}^E - \lambda_t^{E,i}| \leq \varepsilon \\ E_{imax,t}^E, \rho_{im,t}^E - \lambda_t^{E,i} < -\varepsilon \end{cases} \quad (12)$$

$$G_{im,t} = \begin{cases} 0, \rho_{im,t}^G - \lambda_t^{G,i} > \varepsilon \\ G_{immid,t}^G, |\rho_{im,t}^G - \lambda_t^{G,i}| \leq \varepsilon \\ G_{imax,t}^G, \rho_{im,t}^G - \lambda_t^{G,i} < -\varepsilon \end{cases}$$

式中: $E_{immid,t}$ 、 $G_{immid,t}$ 分别为各微网的电、气需求缺口; $E_{imax,t}$ 、 $G_{imax,t}$ 分别为外部电、气源进口量上限。

$$\begin{cases} \lambda_t^{E,i+1} = \lambda_t^{E,i} - \gamma(E_{im,t} - \sum_{l \in S_M} E_{l,t}) \\ \lambda_t^{G,i+1} = \lambda_t^{G,i} - \gamma(G_{im,t} - \sum_{l \in S_M} G_{l,t}) \\ \lambda_t^{H,i+1} = \lambda_t^{H,i} + \gamma \sum_{l \in S_M} H_{l,t} \\ \lambda_t^{C,i+1} = \lambda_t^{C,i} + \gamma \sum_{l \in S_M} C_{l,t} \end{cases} \quad (13)$$

5) 判断乘子是否收敛阶段。如式(14)所示, 若两次乘子更新结果小于设定的初始误差, 则收敛, 能源协同达到最优; 否则, 下发更新后的乘子 $\lambda^{(i+1)}$, 转到下一轮更新买卖量阶段。

$$|\lambda^{(i+1)} - \lambda^{(i)}| < \varepsilon \quad (14)$$

3 结合双链技术的协调者选取方案及实现

园区综合能源系统中各微网节点是平等主体, 上层协调者节点从各园区微网主体中选出, 接收所负责协调园区内微网节点的能源买卖量信息, 各协调者达成共识后判断能源系统供需是否平衡, 若是则达成能源平衡, 能源协同达到最优。否则, 根据系统不平衡量迭代更新拉格朗日乘子, 得到最优能源价格, 下发给下层微网, 继续下一轮迭代求解。

协调者选取是能源协同任务求解过程中重要的一环, 若由单独某个微网节点担任, 则缺少监督, 并有作恶风险, 多个微网节点共同担任协调者, 可相互监督、降低作恶风险。同时, 协调者节点应在

各园区微网节点间公平选取。文献[23-24]的协调者选取机制可保证公平选取, 但被选取者可预测, 仍存在串通作恶风险。本文提出的无偏随机选择算法, 不仅可以公平选取协调者, 而且协调者选取结果不可预测, 降低了下层微网节点与协调者串通谋取不当利益的风险。

3.1 协调者选取方案

本文无偏随机协调者选取方案如图3所示。其中, “协调者池”由注册到系统中的微网节点组成, 在协调者池中选取协调者。同时, 为了防止其恶意行为, 为每个候选协调者引入信誉值来衡量其行为, 每个候选协调者在登记时赋予初始信誉值。由无偏随机协调者选取算法选出的协调者组成“协调者委员会”, 共同承担能源协同的任务。图3中的“协调者选取智能合约”由打包的矿工自动调用。区块链为交易链, 区块信息包含: 前一区块的哈希值(Prev_Hash)、时间戳、默克尔树根(Tx_Root)及随机数 Nonce 的值。

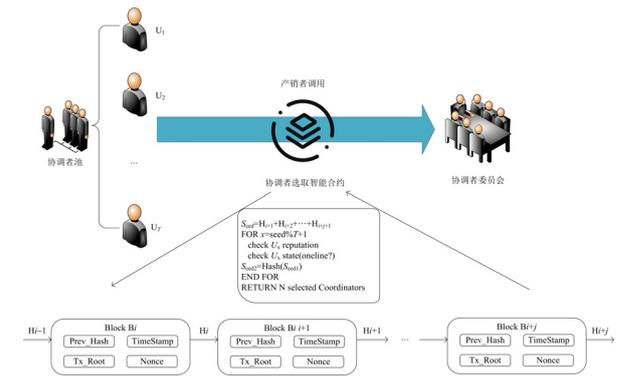


图3 协调者选取方案

Fig. 3 Coordinator selection process

无偏随机协调者选取方案的具体步骤如下。

1) 调用“请求”接口。在园区各微网约定时间, 由约定的微网节点发送选取协调者请求并由矿工打包到交易链。

2) 矿工自动调用“选取”接口, 选取协调者。

3) 等待区块生成。交易链生成 K_s 个交易区块后, 协调者选取智能合约自动调用“选择”接口, 选择 N 个在线协调者。

4) 等待其他 K_c 个区块确认前 K_s 个区块, 其中 $K_s + K_c = K$, K_s 和 K_c 均可变, 其值取决于区块链自身的属性。为确保种子 S_{ced} 不可操纵和不可预测, 本文令 $K_s = 10$ [25]。一般情况下, FISCO BCOS 默认在一个区块后面添加 3 个后续区块来确认发布区块的有效性, FISCO BCOS 链上 $K_c = 3$ 。

5) 计算 S_{ced1} 。将 K 个块中的前 K_s 个块的哈希值的和作为 S_{ced1} 。

6) 基于 S_{ced1} 选取协调者。基于当前 S_{ced1} 选出协调者池中信誉值为正且处于“在线”状态的一个候选协调者。

7) $S_{ced2} = \text{Hash}(S_{ced1})$ 。根据 S_{ced2} 选出第 2 个协调者, 直到选出所需的 N 名协调者。待选取协调者的数量至少是所需 N 的 10 倍, 以确保算法的有效输出和随机性。

由于几乎不可能破解 S_{ced} , 所以本文提出的选择算法是随机且无偏的, 任何收益方都不能操纵选择结果以在委员会中占据优势。

3.2 协调者选取智能合约

管理协调者池的协调者智能合约对园区综合能源系统微网用户设计了“注册”、“请求”、“选择”、“反转”和“确认”接口, 用于从池中选择 N 个协调者。

1) “注册”接口: 微网节点通过“注册”接口加入到协调者池中。

2) “请求”接口: 请求选取协调者的接口, 在协调者选取智能合约被矿工打包到交易链上时, 自动调用“请求”接口, 并在等待生成 K 个交易区块后自动调用“选择”接口。

3) “选择”接口: 候选协调者存在“在线”、“离线”、“选中”和“忙碌”4 种状态, 图 4 展示了协调者角色的状态转换过程。候选协调者能够将其状态转换为“在线”或“离线”, 以指示是否可被选择。协调者池中的地址按注册顺序存储并以列表进行管理。

4) “反转”接口: 用于候选协调者状态转换, 从“选中”状态反转回“在线”状态。

5) “确认”接口: 用于候选协调者的确认, 候选协调者被选中后需要“确认”, 然后成为协调者, 其状态变为“忙碌”。

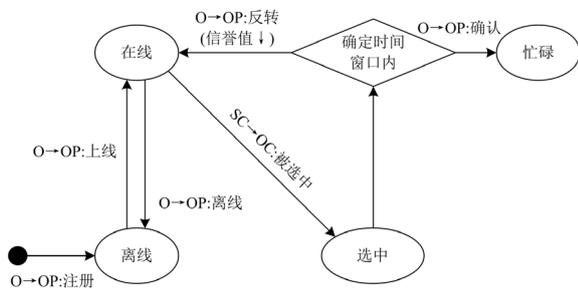


图 4 协调者角色的状态转换

Fig. 4 State transition of the coordinator role

图 4 中协调者的 4 个状态说明如下。

1) “在线”: 微网在注册后加入协调者池中,

仅自身可将其状态变为“在线”。

2) “选中”: 协调者池中在线微网持续监控自己在交易链上的状态, 一旦协调者选取智能合约选择其为协调者, 它的状态就会变成“选中”。

3) “忙碌”: 在确认时间窗口, 例如 2 min 内, “选中”状态的候选协调者确认该选择, 调用“确认”接口后, 其状态变为“忙碌”。

4) “离线”: 处于“在线”状态的候选协调者在无法担任协调者任务时, 可以主动“离线”以避免被选中。

在状态转换过程中, 当候选协调者不可用或不能及时确认状态时, 一些候选协调者可能不会主动将“在线”状态变为“离线”。当某个智能合约选择协调者时, 若选中的候选协调者无法在确认时间窗口内确认加入, 该候选协调者将一直处于“选中”状态。“选中”状态要反转回“在线”状态, 候选协调者必须利用“反转”接口, 调用“反转”接口时会消耗信誉值, 如果信誉值小于等于零, 那么该候选协调者将不再被选取。

4 算例分析

4.1 仿真环境

本文实验中使用虚拟机模拟多个微网区块链节点, 硬件环境配置如下: 处理器 Core(TM) i5-12400 2.50 GHz 1 核, 内存为 2 GB, 操作系统为 Ubuntu 20.04.4 LTS。

4.2 算例设定

本文设有 9 个综合能源系统园区, 共 90 个微网。其中, 某综合能源系统园区 A 包含 12 个微网。设园区 A 有: 4 类单输入单输出设备^[26]——4 个吸水式制冷机组(WARG)、5 个压缩式制冷机组(CERG)、2 个燃气锅炉(GB)、3 个分布式电源(DG), 详细参数如表 2 所示; 2 类单输入多输出设备——7 个热电联产机组(CHP)和 4 个地源热泵(GSHP)设备, 详细参数如表 3、表 4 所示(表 4 中 CHP 设备的输出上限 1 对应电能输出上限, 输出上限 2 代表热能输出上限; GSHP 设备的输出上限 1 对应热能输出上限, 输出上限 2 代表冷能输出上限)。其他综合能源系统园区内设备参数与园区 A 类似。

园区 A 一天 24 h 的风机、光伏出力如图 5 所示, 电、热、冷总负荷量如图 6 所示, 外部电、气源各时段价格如图 7 所示。

4.3 选取协调者实验

本文多园区微网节点共 90 个, 设注册到协调者池中的在线微网有 60 个, 待选取协调者数目为 5。执行选取算法后得到如表 5 所示的结果, 前 10 个

区块的 Hash 值之和为 S_{ced1} ，由本文无偏随机算法选出的候选协调者编号为 4、42、33、48、37。

表 2 单输入单输出设备参数

Table 2 Single input single output device parameters

设备类型	η^a	η^b	输入上限	输出上限	所属微网
WARG1	-0.0005	0.8	80	60.8	1,3,4,11,12
WARG2	-0.000 25	0.8	160	121.6	5,8
WARG3	-0.001	0.8	40	30.4	2,7,9,10
WARG4	-1.1111×10^{-4}	0.8	360	273.6	6
CERG1	-0.003 75	3	40	114	1,2,4,12
CERG2	-0.0075	3	20	57	3
CERG3	-0.000 94	3	160	456	5,8
CERG4	-0.0025	3	60	171	7,11
CERG5	-0.000 83	3	180	513	9,10
GB1	-0.001 188	0.95	40	36.1	7
GB2	-9.90×10^{-5}	0.95	480	433.2	8
DG1	0.056 818 182	255	660	396	1
DG2	0.094 656 616	395.6	1194	895.5	5
DG3	0.162 935 065	566.2	380	187.5	6

表 3 单输入多输出设备能量转换效率参数

Table 3 Energy conversion efficiency parameters of single input multiple output devices

设备类型	η^{a1}	η^{a2}	η^{b1}	η^{b2}
CHP1	-0.000 127	-0.000 14	0.405	0.445
CHP2	-8.75×10^{-5}	-9.3×10^{-5}	0.42	0.45
CHP3	-2.24×10^{-5}	-2.45×10^{-5}	0.43	0.47
CHP4	-4.43×10^{-5}	-4.79×10^{-5}	0.425	0.46
CHP5	-0.0001	-0.000 11	0.4	0.45
CHP6	-5.06×10^{-5}	-5.50×10^{-5}	0.405	0.44
CHP7	-0.000 127	-0.000 14	0.405	0.445
GSHP1	-0.107 14	-0.107 14	3	3
GSHP2	-0.1875	-0.1875	3	3
GSHP3	-0.053 57	-0.053 57	3	3
GSHP4	-0.093 75	-0.093 75	3	3

表 4 单输入多输出设备输入输出上限参数与所属微网

Table 4 Upper limit parameters of single input multiple output devices and their associated microgrids

设备类型	输入上限	输出上限 1	输出上限 2	所属微网
CHP1	160	61.56	67.64	1,3,4,7,9
CHP2	240	95.76	102.6	2
CHP3	960	392.16	428.64	6
CHP4	480	193.8	209.76	5,8
CHP5	200	76	85.5	10,12
CHP6	400	153.9	167.2	11
CHP7	160	61.56	67.64	1,3,4,7,9
GSHP1	1.4	3.99	3.99	1,3,4,7,9,10,11,12
GSHP2	0.8	2.28	2.28	2
GSHP3	2.8	7.98	7.98	5,8
GSHP4	1.6	4.56	4.56	6

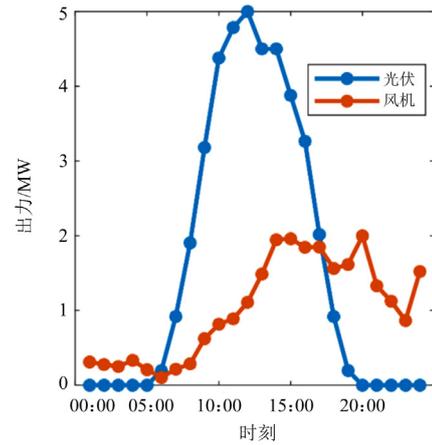


图 5 风机、光伏出力

Fig. 5 Wind turbine and PV output

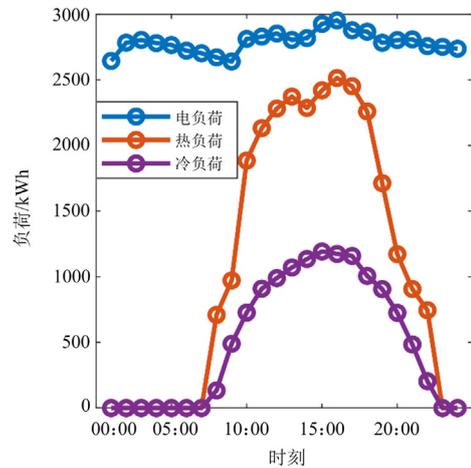


图 6 电、热、冷总负荷量

Fig. 6 Total load of electricity, heat, and cooling

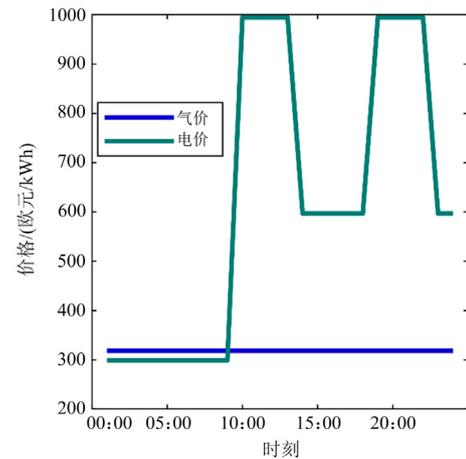


图 7 外部电、气源各时段价格

Fig. 7 Prices of external electricity and gas sources at different time periods

表 5 初始 S_{ced} 与选取结果Table 5 Initial S_{ced} and selection results

S_{ced1}	1517f2b3dc39c1742c51cef529802a5baafdd ab05065001dd8dbe25e2f884290
被选取的候选 协调者编号	4、42、33、48、37

4.4 不同初始乘子算法性能分析

区块链技术提升了系统安全性, 但需要消耗一定的通信时间, 这会降低运行效率^[23]。由于全天求解规模较大, 无法详细反映协调优化过程, 所以选取某一时段测试园区 A 能源协同优化的效果。

为测试本文算法的性能, 将初始乘子设为与收敛值偏差较大的值和偏差较小的值, 以便观察对收敛结果的影响。如图 8(a)所示, 在 11:00—12:00 时段内, 初始乘子值为(150, 545, 230, 240, 220)(与收敛值偏差较大), 迭代 430 次时乘子收敛到(318, 572.5, 320.4, 320.9, 213.40), 迭代次数较多。如图 8(b)所示,

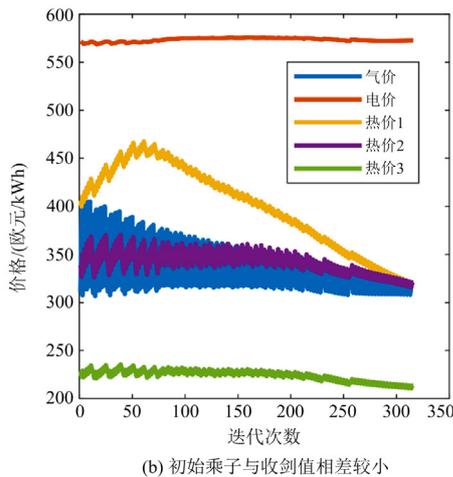
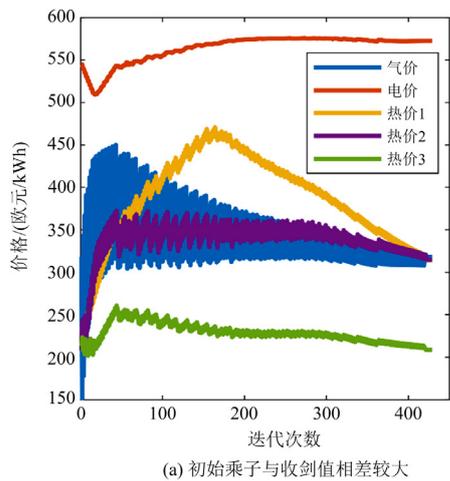


图 8 园区 A 在 11:00—12:00 时段内乘子的更新过程

Fig. 8 Update process of 11:00—12:00 multipliers in Park A period

在 11:00—12:00 时段内, 初始乘子值为(310, 570, 405, 340, 230)(与收敛值偏差较小), 迭代 316 次时收敛到(318, 572.5, 320.4, 320.9, 213.4), 迭代次数明显减少。

园区 A 每一轮求解消耗时间见表 6, 图 8(a)场景下的模型最终求解时间稳定在 43~47 min, 图 8(b)场景下的模型最终求解时间稳定在 39~41 min, 总求解时间为小时级别, 由此可得, 乘子初始值偏差较大时也能满足求解需求。

表 6 园区 A 每一轮求解过程消耗时间

Table 6 Time consumption for each round of solving process in Park A

s		
微网求解子问题时间	协调者求解时间	通信时间
0.5~0.8	0.1~0.3	3~5

4.5 不同微网数量算法性能分析

除了设定恰当的初始乘子外, 微网数量较少时的求解时间也会显著减少。设综合能源园区 B 有 8 个微网, 参数与园区 A 微网 1—8 的参数一致。园区 B 在 11:00—12:00 时段内, 初始乘子为(338, 242, 517, 462)时, 第 278 轮收敛到(317.9, 289.2, 482.6, 418.3), 如图 9 所示, 园区 B 每一轮求解消耗时间见表 7, 模型最终求解时间稳定在 15~20 min。对比表 6、表 7 可知, 由于微网数量减少, 微网间通信时间明显减少。

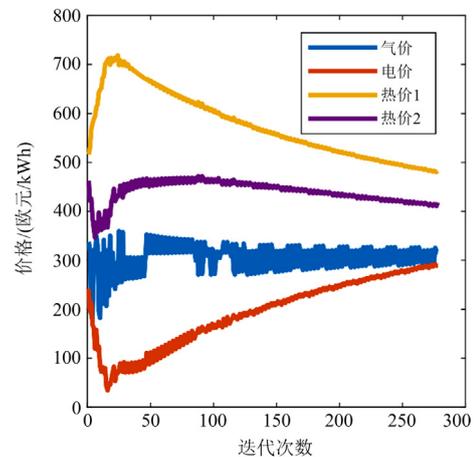


图 9 园区 B 在 11:00—12:00 时段内乘子的更新过程

Fig. 9 Update process of 11:00—12:00 multipliers in Park B period

表 7 园区 B 每一轮求解过程消耗时间

Table 7 Time consumption for each round of solving process in Park B

s		
微网求解子问题时间	协调者求解时间	通信时间
0.5~0.8	0.1~0.3	2~3

4.6 微网节点与协调者串谋篡改乘子分析

若微网节点与协调者串谋篡改乘子，减少其他微网资源出口量，可使自己获得更大的售出份额，获取更多利益。

本文能源系统协调过程通过具有原子性的区块链智能合约自动完成，同时选取算法的协调者不可预测，使得微网无法预先得知协调者身份，极大地增加了微网与协调者串谋的难度。此外，若某协调者下发篡改乘子，各微网也不会采纳，而是采取超半数协调者下发的一致乘子。

4.7 协调者主动作恶分析

各微网节点在迭代时，每一轮均计算自己的能源买卖量并提交到区块链网络，若某协调者修改能源买卖量，可能会使某些微网的利益受损。

在本文结合区块链的能源协同方法下，各微网上传能源买卖量后，协调者委员会对其达成共识后，再进行后续步骤。若一个或多个协调者篡改能源买卖量，共识过程可最大程度地降低作恶影响，提供较好的容错性。

为分析协调者主动作恶的影响和验证系统的容错性，本文进行了以下实验。

实验在 FISCO BCOS 平台进行，利用其自带的 PBFT 共识算法完成共识，其要求 $2f + 1$ 个验证节点达成共识，其中 f 为拜占庭错误数量。

PBFT 共识流程如图 10 所示。

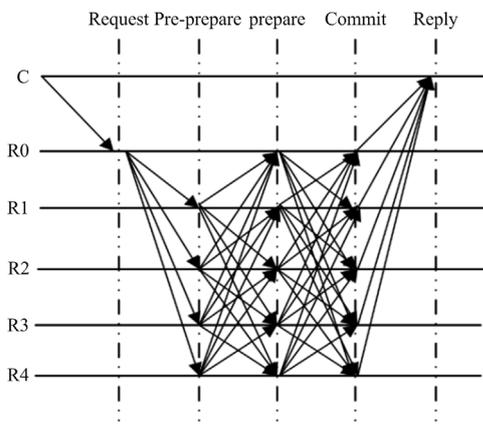


图 10 PBFT 共识流程

Fig. 10 PBFT consensus process

1) 提议者收到客户端 C 的请求后向其余验证者节点(除提议者之外的其他协调者)发送电需求数据包。

2) 验证者节点在收到数据包后对数据包进行验证和签名。

3) 验证者节点向其他验证者广播签名后的数

据包。

4) 当有 $2f + 1$ 个验证者节点收到相同的数据包时，就会进入到 Prepare 阶段。在 Prepare 阶段，验证者节点会再次对数据包进行验证，确认数据的合法性。

5) 当有 $2f + 1$ 个验证者节点确认该数据包合法时，就会进入到 Commit 阶段。在 Commit 阶段，验证者节点会再次对数据包进行验证，并将该数据包写入到区块链中。

协调者委员采用 4.3 节中的实验结果，包括微网节点 4、42、33、48、37，下面分析不同数量协调者节点作恶情况下协调者委员会的共识过程。

1) 1 个协调者节点作恶

设节点 42 为作恶节点。在第 2 步中，其修改电需求数据，并发送签名后的数据包(篡改包)。在第 3 步中，向其他验证者节点广播篡改包，其他 4 个验证者节点发送真实数据包。第 4 步在 Prepare 阶段，其他 4 个验证者节点接收相同的 4 个真实数据包并验证，节点 42 的篡改包被忽略，进入到 Commit 阶段对真实数据包达成共识，防止了单个协调者作恶。

2) 2 个协调者节点作恶

设 2 个节点篡改数据，在第 2 步中，这 2 个节点修改电需求数据，发送篡改包。在第 3 步中，这 2 个节点向其他节点广播篡改包，则其他节点收到了不一致数据包。在第 4 步 Prepare 阶段，验证者节点仅收到 3 个相同的数据包(少于 $2f + 1$, $f = 2$)，无法进入到 Commit 阶段，共识过程失败，无共识结果。

3) 3 个协调者节点作恶

设 3 个节点篡改数据，在第 2 步中，这 3 个节点修改电需求数据，发送篡改包。在第 3 步中，这 3 个节点向其他节点广播篡改包，则其他节点收到了不一致数据包。在第 4 步 Prepare 阶段，若 3 个作恶节点进行了串谋，发送相同的篡改数据，则验证者节点收到 3 个相同的篡改数据包(少于 $2f + 1$, $f = 2$)，无法进入到 Commit 阶段，共识过程失败，无共识结果；若 3 个作恶节点未进行串谋，发送不相同的篡改数据，则验证者节点收到 2 个相同的正常数据包(少于 $2f + 1$, $f = 2$)，无法进入到 Commit 阶段，共识过程失败，无共识结果。

4) 4 个协调者节点作恶

设 4 个节点篡改数据，在第 2 步中，这 4 个节点修改电需求数据，发送篡改包。在第 3 步中，这 4 个节点向其他节点广播篡改包，则其他节点收到了不一致数据包。在第 4 步 Prepare 阶段，若 4 个

作恶节点进行了串谋, 发送相同的篡改数据, 则验证者节点收到 4 个相同的篡改数据包(少于 $2f+1$, $f=1$), 误认为诚实节点为作恶节点, 篡改成功; 若 4 个作恶节点未进行串谋, 发送不相同的篡改数据, 则验证者节点收到 0 个相同的正常数据包, 无法进入到 Commit 阶段, 共识过程失败, 无共识结果。

本文实验共有 5 个协调者节点。由上可见: 单个协调者作恶不影响正常共识过程; 2 个或 3 个协调者作恶或 4 个协调者未串谋作恶时(诚实验证者节点数量 $< 2f+1$)无法达成共识; 4 个协调者串谋作恶时会达成共识, 作恶成功。即作恶协调者节点数目小于协调者总数的 $1/3$ 时, 对系统无影响; 超过此数目时, 系统无法得到最优解。本文的协调者选取算法使各节点不能预知协调者身份, 很难出现多个协调者串谋作恶, 因此不会出现作恶成功的情况。

5 结论

本文提出了结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法, 仿真实验表明, 本文方法可无偏差公平选取协调者, 有效实现园区综合能源协同优化、降低节点作恶影响、保护数据隐私, 具有较好的鲁棒性和容错性。本文的主要贡献如下所述。

1) 本文提出的无偏随机选取算法可随机、公平地选取协调者, 降低了微网与协调者或协调者之间串通作恶的可能性。同时, 通过区块链智能合约实现无偏随机选取算法, 保证能源协同过程自动化。

2) 本文结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法中, 所有微网节点共同合作求解, 解决了集中式控制中心节点计算负担重的问题, 加强了各微网节点的自主调度权。同时, 在迭代计算买卖量过程中, 下层微网节点只需从本地获取所需信息, 自身内部数据的隐私权得到了保护, 提高了系统安全性; 无需与相邻节点进行信息交互, 减少了通信时间, 提高了区块链的运行效率。

3) 本文共识算法可使得小于 $1/3$ 的协调者节点作恶的情景下, 仍可以正常完成协调优化过程, 使系统有一定的鲁棒性。

4) 本文使用双链数据存储模型, 分别存储交易信息和协同信息, 保障数据安全和交易链效率。

本文的区块链采用 FISCO BCOS 平台, 平台的局限性导致本文所提方法的效率受到一定影响, 未来计划设计开发更加适配本文场景的区块链仿真平台。

参考文献

[1] 梁硕, 王艳松. 基于改进云物元模型的工业园区综合能源系统规划方案评价[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 165-176.

- LIANG Shuo, WANG Yansong. Evaluation of an integrated energy system planning scheme for an industrial park based on an improved cloud matter-element model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 165-176.
- [2] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.
- SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [3] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 232-240.
- WANG Chengshan, WANG Shouxiang. The role and challenge of smart microgrid in the integration of distributed energy resources[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 232-240.
- [4] MOLZAHN D K, DÖRFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [5] 张力波, 童立敏, 周德群, 等. 基于区块链的园区能源互联网弱中心化电力交易机制[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 1-9.
- ZHANG Libo, TONG Limin, ZHOU Dequn, et al. Less-centralized electricity transaction mechanism of park energy internet based on blockchain[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 1-9.
- [6] COHEN G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems[J]. Journal of optimization Theory and Applications, 1980, 32: 277-305.
- [7] BISKAS P N, BAKIRTZIS A G, MACHERAS N I, et al. A decentralized implementation of DC optimal power flow on a network of computers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 25-33.
- [8] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine learning, 2011, 3(1): 1-22.
- [9] 葛晓琳, 郝广东, 夏澍, 等. 考虑规模化电动汽车与风电接入的随机解耦协同调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 54-62.
- GE Xiaolin, HAO Guangdong, XIA Shu, et al. Stochastic decoupling collaborative dispatch considering integration of large scale electric vehicles and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 54-62.
- [10] 李强, 韩爱稳, 赵洪山. 基于电网分区和辅助问题原理的电力系统多区域有功负荷经济调度[J]. 继电器, 2006, 34(11): 31-34.
- LI Qiang, HAN Aiwen, ZHAO Hongshan. Multi-region field active load of power system in economic dispatch based on subarea division and auxiliary problem principle[J]. Relay, 2006, 34(11): 31-34.
- [11] LAI X, XIE L, XIA Q, et al. Decentralized multi-area economic dispatch via dynamic multiplier-based Lagrangian

- relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(6): 3225-3233.
- [12] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 18-27.
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 18-27.
- [13] 王杰, 刘念. 多主体综合能源系统分布式优化运行方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 98-104, 115.
WANG Jie, LIU Nian. Distributed optimal operation method of integrated energy system with multi-agents[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 98-104, 115.
- [14] 高志远, 彭林, 李炳林, 等. 新兴 ICT 技术对电力系统自动化的协同支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 160-166.
GAO Zhiyuan, PENG Lin, LI Binglin, et al. Research on the collaborative support of emerging new ICTs for power system automation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 160-166.
- [15] 周鑫, 熊川羽, 柯方超, 等. 基于区块链和禀赋效应的主动配电网经济运行方法[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 58-68.
ZHOU Li, XIONG Chuanyu, KE Fangchao, et al. Economic operation method of active distribution network based on blockchain and endowment effect[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 58-68.
- [16] 平健, 陈思捷, 严正. 适用于电力系统凸优化场景的能源区块链底层技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 108-116.
PING Jian, CHEN Sijie, YAN Zheng. A novel energy blockchain technology for convex optimization scenarios in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 108-116.
- [17] 周步祥, 张越, 臧天磊. 基于区块链的多虚拟电厂主从博弈优化运行[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 1-13.
ZHOU Buxiang, ZHANG Yue, ZANG Tianlei. Blockchain based Stackelberg game optimal operation of multiple virtual power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 1-13.
- [18] 龚钢军, 张桐, 魏沛芳, 等. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1278-1289.
GONG Gangjun, ZHANG Tong, WEI Peifang, et al. Research on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy internet based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1278-1289.
- [19] 邸剑, 臧齐齐, 王桂兰, 等. 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 99-107.
DI Jian, ZANG Qiqi, WANG Guilan, et al. A distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient correction method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 99-107.
- [20] 田雨扬, 卢锦玲, 赵洪山, 等. 基于联盟区块链的直购电交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 139-149.
TIAN Yuyang, LU Jinling, ZHAO Hongshan, et al. Direct purchase electricity transaction model based on a consortium chain[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 139-149.
- [21] 沈泽宇, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的多能协同运行(一): 模型与算法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3214-3223.
SHEN Zeyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Multi-energy synergy and co-optimization based on blockchain (part I): model and algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3214-3223.
- [22] 孟柯, 吴志勇, 黄双喜, 等. 基于区块链的新型云制造服务选择方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(3): 707-718.
MENG Ke, WU Zhiyong, HUANG Shuangxi, et al. Novel cloud manufacturing service selection method based on blockchain[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2023, 29(3): 707-718.
- [23] LI Kejiao, LI Hui, HOU Hanxu, et al. Proof of vote: a high-performance consensus protocol based on vote mechanism & consortium blockchain[C] // 2017 IEEE 19th International Conference on High Performance Computing and Communications, IEEE 15th International Conference on Smart City, IEEE 3rd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/Smart City/DSS), December 18-20, 2017, Bangkok, Thailand: 466-473.
- [24] SU Zhou, WANG Yuntao, XU Qichao, et al. A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4601-4613.
- [25] ZHOU H, OUYANG X, REN Z, et al. A blockchain based witness model for trustworthy cloud service level agreement enforcement[C] // IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications, April 29-May 2, 2019, Paris, France: 1567-1575.
- [26] WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.

收稿日期: 2023-09-13; 修回日期: 2023-12-25

作者简介:

王桂兰(1979—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为区块链技术与应用、大数据分析与应用等; E-mail: hdwgl@ncepu.edu.cn

曾康为(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术的应用; E-mail: 2994505835@qq.com

刘宏(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为云计算、人工智能、大数据驱动技术在电网业财一体化和提质增效等中的应用。E-mail: 56633194@qq.com

(编辑 姜新丽)