

基于区块链的共享储能联合调频分散交易机制设计

裴佑¹,裴哲义²,邱伟强¹,杨莉¹,董凌^{3,4},王莲芳⁵,林振智¹

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027;2. 国家电力调度控制中心,北京 100031;

3. 青海绿能数据有限公司,青海西宁 810008;4. 清华大学电机工程与应用电子系,北京 100084;

5. 国网青海省电力公司,青海西宁 810008)

摘要:充分利用现有调频资源提高电力系统弹性是扩展系统可再生能源消纳能力的有效途径之一。提出分布式储能以共享储能形式与火电联合调频的商业模式,基于此设计一种计及分布式储能和火电机组偏好的联合调频分散交易机制。结合分散交易机制去中心化的特点,构建包含共识机制、智能合约的联盟链架构,并提出考虑交易主体隐私的交易信息分类管理方法。算例结果验证了所提分散交易机制实现资源优化配置的有效性,且多次市场模拟后的交易量和总社会效益稳定,与未考虑交易主体偏好的集中交易模式相近。

关键词:区块链;分散交易机制;火储联合调频;共享储能;交易主体偏好

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110018

0 引言

在全球能源转型不断深入的背景下,可再生能源发电占比不断提高。由于风力、光伏发电存在天然的不稳定性,这使得电力系统转动惯量减小,调频压力增加。储能尤其是电池储能系统具有快速和精确的响应能力,其单位功率的调频效率较高^[1],可减少电力系统旋转备用的容量和火电碳排放。2020年,我国辅助服务领域已投运的储能项目累计装机规模占我国储能市场已投运项目总规模的18%,且五年内储能调频装机量年均增长率保持在8%,未来储能调频需求将达到1.5~2 GW^[2]。预计到2025年,新型储能装机规模将达到30 GW^[3]。

储能参与调频已经具备了一定的技术基础、应用场景和政策支持,但目前的商业模式和配套交易机制尚未完善。目前的储能调频商业模式分为绑定火电机组或新能源电站联合调频、独立调频和聚合商聚集分布式储能调频3种^[4]。山西、福建、广东、江苏、甘肃等地调频辅助服务市场规则中均将储能纳入市场主体,主要采用火储联合调频和独立调频模式^[5]。目前国内储能调频项目以火储联合调频为主,通过类似合同能源管理EMC(Energy Management Contracting)的模式投资运营。EMC模式有利于促进火储联合调频的达成,但该模式是一种将合作双方长时间捆绑的商业模式。在现有的火储联合调频和独立调频模式下,储能参与调频的容量门槛一般为5~10 MW,而用户侧的分布式储能大多为0.2~2 MW,国内针对小微储能的调频商业模式和交

易机制尚未成熟^[6]。

相关学者提出共享储能的理念,即分离储能的所有权和使用权,储能所有者将闲置储能租赁给有需求的客户,实现设备共享。文献[7]提出基于共享储能的需求侧能量控制策略,以降低电网的运行成本和负荷峰值。文献[8]提出将共享储能作为虚拟化资源出售给用户的商业模式,即用户通过购买储能降低能源成本。现有关于共享储能的研究主要关注发电侧储能参与新能源消纳以及用户侧储能参与能量共享,而没有关注分布式储能与火电机组联合调频的商业模式和交易机制。

分布式小微共享储能与火电机组联合调频交易和用户侧产消者能源交易都具有交易主体多、单笔交易量少、交易频次高的特点,且前者买、卖双方交易主体还具有一定的交易记录、信用等偏好。扩建现有或新建集中交易平台进行分布式小微共享储能与火电机组联合调频交易的工作量大、建设成本高,且难以考虑买、卖双方的交易偏好性^[9-10]。分散交易模式可以最大限度地赋予消费者在电力交易中的主动参与权,体现不同储能的交易偏好和交易策略^[11]。区块链技术是通过密码学形成的一个集体维护的分布式数据库,具有去中心化、去信任化、高安全性等特点^[12]。目前已有一些研究将区块链技术应用于支撑小规模、密集型的分布式能源交易和数字资产交易。文献[13]提出一种基于区块链的分散电能拍卖机制,论证了区块链技术在减少交易中介成本、保证公平公正性和快速实时结算上的优势。文献[14]以区块链作为支撑,设计基于信用的分布式微电网交易匹配机制,并提出去中心化数据管理方法。目前基于区块链的电力交易框架多为电能交易,且没有考虑具体分散交易特点进行定制化设计。

针对上述问题,本文提出分布式小微共享储能

收稿日期:2021-05-23;修回日期:2021-08-26

基金项目:国家电网公司科技项目(5419-202034054A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5419-202034054A-0-0-00)

通过将储能使用权租赁给火电机组进行联合调频的模式。为节省建设、运行和维护集中交易平台的高额成本,并充分考虑储能所有者的不同交易偏好和策略,提出基于区块链的分散交易机制。充分考虑共享储能分散交易下不同主体偏好和隐私保护需求等特点,提出将交易数据分类上链存储。算例仿真验证了所提交易机制能够充分体现交易主体偏好并实现稳定匹配。在不同供需比和市场规模下形成的市场价格均合理、稳定,且交易量和市场总福利与未充分考虑市场主体偏好的集中交易相近。

1 火电机组-共享储能联合调频

在现行的调频市场规则下,通过量化调节速率指标、调节精度指标和响应时间指标等参数评估机组调频性能 K_p ,并基于 K_p 计算调频补偿费用。火电机组单独调频时,由于机组自身机械惯性的限制,不能精确地跟踪高频信号,存在调节延迟、调节偏差、调节反向等问题。火储联合调频是利用储能 ms 级响应、高精度调节、双向调节等性能优势,辅助火电机组调频,由火电机组进行统一优化控制^[15]。

火电机组调频性能提升百分比 α 与机组配置储能比例 β 的关系如式(1)所示,其在一定范围内大致呈二次函数的关系。若机组配置储能比例不小于最大储能配置比 β_{max} ,则调频性能进入饱和区不再提升^[16], β_{max} 约为 1%~1.5%。

$$\alpha = \begin{cases} x_1\beta^2 + x_2\beta + x_3, & 0 \leq \beta < \beta_{max} \\ \alpha_{max}, & \beta \geq \beta_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 — x_3 为调频性能函数的系数; α_{max} 为机组调频性能极限值。

火电机组 j 进行火储联合调频得到的额外收益 U_j^{AGC} 为:

$$U_j^{AGC} = \alpha_j K_j^{P0} p D_j \quad (2)$$

式中: α_j 为火电机组 j 配置储能后的调频性能提升比例; K_j^{P0} 为火电机组 j 单独运行时调频性能; p 为调频市场的出清单价; D_j 为火电机组 j 的调频里程。

共享储能联合调频模式下,火电机组实质上承担了储能资源聚合商的角色,通过市场化交易支付储能所有者租赁费,获得相应的储能控制权并用于辅助调频,减少建设自备储能的成本。我国现有的火储联合调频试点项目和美国 PJM(Pennsylvania-New Jersey-Maryland) 储能系统快速调频服务市场的成功展现了该商业模式良好的前景。

不同于电力交易的商品同质化特性,在共享储能和火电机组的交易中,储能是以控制权转移的形式租赁给火电机组的。卖家(分布式储能)选择交易对象具有偏好性,包括买家(火电机组)的历史交易信息、信用分和租赁总量等因素,分析交易机制对市

场表现的影响时应考虑市场主体的偏好。

2 基于区块链的分散交易市场机制

电力市场中的交易机制分为集中交易机制和分散交易机制。集中交易机制由交易平台主导,买、卖双向平台申报投标容量和价格,按社会福利最大化的目标出清市场。分散交易机制下,市场主体具有充分的主导权,买、卖双方均以实现自身效益最大化为目标,根据市场信息自行选择交易对象,并通过谈判确定成交价格。

集中交易机制比分散交易机制效率更高,能实现社会效益最大化,但在该交易机制下交易中心或平台需获取所有交易对象的信息,交易标的物为同质化商品,且市场主体无法决定交易对象及成交价格,交易结果难以体现用户个性化交易意愿。分散交易机制虽然不一定能得到社会福利最大化的方案,但可充分考虑不同主体的偏好,使市场主体能积极主动地寻求交易,及时发现价格信号并调整交易策略,最终达到市场均衡状态。此外,在该交易机制下市场主体不必公开所有信息,交易隐私性得到保障^[17]。

图 1 为基于区块链技术考虑火电机组侧和储能

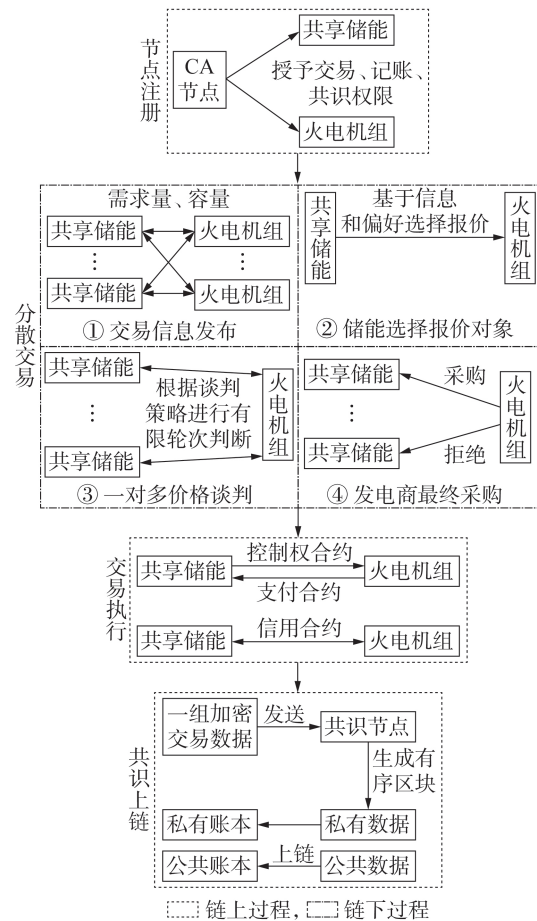


图 1 基于区块链的分散交易机制流程框图

Fig.1 Block diagram of decentralized trading mechanism process based on blockchain

侧各交易主体偏好的分散交易机制流程框图。

2.1 共享储能与火电机组的分散交易机制设计

相较于火电机组所需储能容量而言,单个分布式储能容量较小,因此结合实际控制问题,假设共享储能容量不可分割,须整体出租,且交易达成后不允许更改,交易标的为共享储能设备使用权,报价为单单位功率每小时的租赁价格,租赁时长为4 h,交易截止期为租赁周期开始前1 h。由于信息和时间限制,假设每个交易时段各储能所有者最多有机会与 T_N 家火电机组谈判,每个谈判机会定义为1个交易轮次,最大交易轮次为 T_N 。

交易时段开始时,火电机组节点在区块链平台发布对储能的需求信息,储能节点发布可租赁容量信息,并从区块链平台中查询火电机组的需求量、信用等信息,根据自身交易偏好和历史成交记录,选择一家火电机组作为报价对象。然后,交易双方进行若干回合价格谈判,火电机组根据谈判结果,以自身效益最大化为目标选择租赁的共享储能。每轮交易结束后,火电机组更新需求信息,未成交的储能继续选择报价对象。市场各主体根据不断更新的市场信息,持续进行分散交易,直到交易时段结束。

2.2 基于联盟链架构的联合调频区块链设计

2.2.1 考虑交易主体准入的联盟链架构

按是否有准入许可将区块链分为非许可链和许可链。按参与组织数量可将许可链分为联盟链和私有链。联盟链一般用于多个组织或机构之间,而私有链本质上是一种中心化的数据库系统,记账权限仅由单个组织或机构控制。在共享储能与火电机组的交易场景中,参与节点一般由不同的企业或运营商部署,且只有满足基本交易门槛的储能和火电机组才能加入区块链网络,因此本文采用联盟链架构。

本文采用Hyperledger Fabric架构,在区块链网络中设置一个认证节点CA(Certificate Authority)负责调频交易通道中所有共享储能节点、火电机组节点的准入和授权,并向链上节点颁发唯一的数字签名。这些共享储能节点和火电机组节点称为对等节点。

2.2.2 联合调频智能合约设计

智能合约通过图灵完备的可编程功能、真实可信的交易信息读取,在底层框架中实现信息和价值的同步流通^[18]。Hyperledger Fabric中的智能合约实质是在每个对等节点上的分布式交易程序,根据交易规则和策略自动执行,并更新账本状态。

在交易时段结束后,达成交易的火电机组和共享储能分别用数字签名对交易进行确认,智能合约验证后自动完成费用结算以及储能控制权的转移。火电机组节点上的结算合约通过读取交易单价和交易量,对交易费用进行清算,将租赁费用从火电机组账户转移到共享储能账户。储能设备均通过物联网

技术接入区块链网络中,并拥有唯一资源定位符和对应的访问控制策略,访问控制策略决定了特定地址的节点才能控制储能的充放电功率。在验证费用到达账户后,储能节点上的资源共享合约通过修改访问控制策略,将火电机组节点的地址添加到可访问地址中,并在租赁时间结束后自动失效,实现有时限的储能控制权限转移。在租赁时间结束后,智能合约根据火电机组和储能节点的行为更新各节点的交易信用分。信用分评判依据为储能设备在火电机组节点的控制下是否越过约定荷电状态SOC(State Of Charge)限值,以及共享储能节点是否私自控制储能的充放电功率。

2.2.3 计及共享储能与机组信用匹配度的共识算法

Hyperledger Fabric架构对数据上链过程进行了优化设计:在数据共识前,先将交易信息发往背书节点进行交易模拟并附上背书节点数字签名;对等节点在存入区块前会先验证区块中的交易是否有背书节点的签名以及在共识过程中是否被修改,被篡改的交易数据会被标记为无效数据。该设计有效避免了共识节点作恶的情况,因此可以选择只考虑故障节点但效率更高的崩溃容错类共识算法。

Raft算法是一种强一致性的崩溃容错类共识算法,与比特币系统中的工作量证明PoW(Proof of Work)算法不同的是,其无需耗费大量节点算力,也无需额外发行交易代币,可在故障节点不超过一半的情况下保证交易系统的正常运行。在Hyperledger Fabric中,参与共识的节点又称为排序节点。为提高共识效率,不需要区块链上的所有节点都参与排序服务,因此,本文设置调频交易市场中交易信用最高的 m 个储能节点和 n 个火电机组节点为排序节点,通常这类高信用节点有更强的意愿维护市场稳定运行。在Raft算法中,主、从节点间通过心跳机制保持联络和传输数据,各节点上均有一个倒计时器,其时间是随机的。排序服务初始化时,所有节点均为从节点,倒计时器率先超时的从节点变为候选节点并向其他节点发出投票申请。各从节点只有1票且会支持先收到的投票申请,获得超过半数支持的候选节点即当选为主节点。经过选举会从 $m+n$ 个节点中随机产生1个主节点,其余的 $m+n-1$ 个节点为从节点。若主节点故障或失去联络,10~500 ms后系统会以相同的方式自动选出新的主节点。

图2为交易数据上链的完整流程。先将市场成交信息发往背书节点进行交易模拟并附上数字签名,背书节点随后将其返回客户端。客户端将背书后的交易数据发往主节点,由主节点通过心跳机制发往从节点。当超过一半的排序节点确认接受交易数据后,即认为排序服务达成了共识。然后由所有的排序节点将交易信息打包成有序区块并发往具有

记账权限的对等节点,对等节点验证数字签名以及数据是否被篡改后将数据上链。

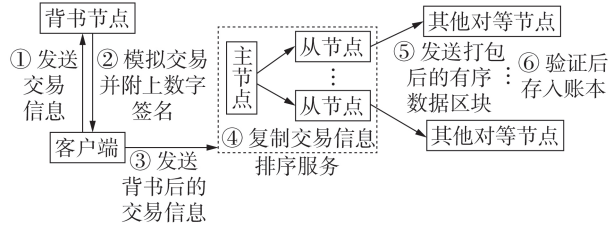


图2 计及共享储能与火电机组信用匹配度的共识流程

Fig.2 Consensus flowchart considering credit matching between shared energy storage and thermal power

2.2.4 交易数据分类存储

在交易数据上链存储时,若区块链上每个节点都存储全部的交易数据,则会导致数据隐私泄露、区块链同步性能不足和存储冗余等问题。随着未来交易量和数据量的剧增,区块链节点由全部存储到部分存储将会成为发展趋势。

本文按数据的隐私性将数据分为公共数据和私有数据,并通过集合技术将各节点上的分布式账本分为公共账本和私有账本,实现数据分类存储。其中,公共数据为交易过程中公开的交易信息,包括火电机组对储能的需求量和交易信用分、共享储能的出售容量及其他属性。这些信息需所有节点进行备份存储,且所有节点都有查询权限。私有数据包括各节点自身的交易记录和报价信息,私有数据的真实内容仅存储在达成交易的共享储能和火电机组双方的私有账本上,而其 Hash 值则存储在链上所有节点的公共账本中,只有交易双方可查询私有数据的真实内容。在交易执行阶段,由交易双方节点上的智能合约读取私有数据内容并进行账户支付和控制权转移。若后续交易双方出现争议,则可选择将私有数据的真实内容共享给第三方节点进行 Hash 验证。私有数据上链同样需通过排序节点的验证,但排序节点只能查询数据加密后的 Hash 值,并将其打包成有序区块后发往其他节点存储于公共账本中。

3 共享储能与火电机组的交易模型

3.1 基于多项 Logit 模型的储能报价对象选择模型

交易时段开始时,共享储能 i 在区块链平台上公开交易信用分 C_i^{Er} 、储能容量 C_i^{Ea0} 等交易信息,火电机组 j 在区块链平台上公开交易信用分 C_j^{Gr} 、最大需求容量 C_j^{Ga} 等交易信息。

共享储能在每轮交易中如何选择报价对象是一个离散选择问题。多项 Logit 模型 MNL (MultiNomial Logit model) 是一种稳定通用的离散选择模型,在市场领域通常用于分析消费者对不同商品、服务的选择偏好。本文运用 MNL 模拟实际分散交易市场中

共享储能选择火电机组的过程。其中,共享储能作为决策者,方案数为火电机组数量,方案属性包括成交记录、信用度、火电机组需求量和随机因素。

3.1.1 共享储能报价选择因子

选择报价对象时,储能节点从私有账本中读取过去的成交记录。交易忠诚度高的储能倾向于先向曾多次交易且成交价格较高的火电机组报价。成交分值 $r_{i,j,h}$ 衡量了第 h 次交易中共享储能 i 与火电机组 j 的交易,由报价情况、成交轮次、成交价格决定:

$$r_{i,j,h} = \begin{cases} r_{i,j,h}^0 \lambda_{i,j,h}^{cle} / \bar{\lambda}_i & r_{i,j,h}^0 > 0 \\ r_{i,j,h}^0 & r_{i,j,h}^0 \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_{i,j,h}^0$ 为第 h 次交易中共享储能 i 与火电机组 j 的成交分基准值,其在首轮成交、非首轮成交、报价未成交、未报价下的取值分别为 2、1、-1、0; $\lambda_{i,j,h}^{cle}$ 为第 h 次交易中共享储能 i 与火电机组 j 的成交单价; $\bar{\lambda}_i$ 为共享储能 i 的平均成交单价。

共享储能在选择报价对象时会考虑最近 H 次的成交情况,且成交记录的影响程度遵循“重近轻远”的信息处理原则,共享储能 i 和火电机组 j 的交易记录匹配分 $K_{i,j}^{tran}$ 为:

$$K_{i,j}^{tran} = \sum_{h=1}^H e^{-\frac{h}{H}} r_{i,j,h} \quad (4)$$

具有交易信任度偏好的共享储能会考虑火电机组的交易信用分,其可在区块链平台直接查询。共享储能 i 有一个信用接受下限 C_i^{Er0} ,当火电机组 j 的交易信用分低于 C_i^{Er0} 时,即认为两者信任度不匹配,则共享储能 i 和火电机组 j 的信用匹配分 $K_{i,j}^{cre}$ 为:

$$K_{i,j}^{cre} = \begin{cases} C_j^{Gr} & C_j^{Gr} \geq C_i^{Er0} \\ 0 & C_j^{Gr} < C_i^{Er0} \end{cases} \quad (5)$$

火电机组的需求量可供所有储能节点查询,且在每个交易轮次实时更新。共享储能具有需求量偏好,其选择受火电机组需求量和已购储能量的影响。为提高成交概率,共享储能在首轮交易中向需求大的火电机组报价。而在后续交易轮次中,已购储能比例小的火电机组会更迫切购买储能,故共享储能更倾向于向这类火电机组报价。第 T 轮交易时共享储能 i 和火电机组 j 的需求匹配分 $K_{i,j,T}^{cap}$ 为:

$$K_{i,j,T}^{cap} = \begin{cases} 1 - C_i^{Ea0} / C_j^{Ga} & T = 1 \\ 1 - \sum_{t=1}^{T-1} m_{j,t} C_{i,j,t}^{Ea} / C_j^{Ga} & T > 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_{i,j,t}^{Ea}$ 为火电机组 j 在第 t 轮交易中向共享储能 i 购买的容量; $m_{j,t}$ 为火电机组 j 在第 t 轮交易中购买的共享储能数量。

3.1.2 共享储能报价概率

综上,共享储能会根据交易忠诚度、交易信任度和需求量 3 种偏好选择报价对象。为体现共享储能选择火电机组的不同偏好,本文采用共享储能 i 的交

易忠诚度权重值 ω_i^{tran} 、交易信任度权重值 ω_i^{cre} 和需求权重值 ω_i^{cap} 量化3种属性的影响程度,共享储能 i 的权重 ω_i 为:

$$\omega_i = [\omega_i^{\text{tran}}, \omega_i^{\text{cre}}, \omega_i^{\text{cap}}] \quad (7)$$

则在第 T 轮交易中共享储能 i 选择向火电机组 j 报价的偏好函数 $U_{i,j,T}$ 为:

$$U_{i,j,T} = V_{i,j,T} + \varepsilon_{i,j} \quad (8)$$

$$V_{i,j,T} = \omega_i^{\text{tran}} K_{i,j}^{\text{tran}} + \omega_i^{\text{cre}} K_{i,j}^{\text{cre}} + \omega_i^{\text{cap}} K_{i,j}^{\text{cap}} \quad (9)$$

式中: $V_{i,j,T}$ 为第 T 轮交易中共享储能 i 选择向火电机组 j 报价的综合匹配偏好值; $\varepsilon_{i,j}$ 为共享储能 i 选择向火电机组 j 报价的市场随机因素。

MNL假设随机项 $\varepsilon_{i,j}$ 服从二重指数分布,第 T 轮交易中共享储能 i 向火电机组 j 的报价概率 $p_{i,j,T}$ 为:

$$p_{i,j,T} = \frac{e^{V_{i,j,T}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{i,j,T}}} \quad (10)$$

式中: J 为市场中的火电机组总数。

3.2 考虑交易轮次和交易完成度的价格谈判模型

共享储能确定报价对象后,火电机组和共享储能间需经谈判达成合理的价格。鲁宾斯坦恩模型是广泛应用于经济领域的典型双边交易模型,可用来描述买、卖双方讨价还价的过程。本文基于该模型模拟分散交易中火电机组和共享储能的谈判过程。

设共享储能和火电机组之间最大谈判回合数为 k_{max} ,共享储能 i 接受的价格范围为 $[\lambda_i^{\text{Emin}}, \lambda_i^{\text{Emax}}]$, λ_i^{Emax} 、 λ_i^{Emin} 分别为共享储能 i 最高、最低接受价格。最低接受价格 λ_i^{Emin} 与储能调频成本有关。储能最大充放电循环次数为 N_{fail} ,单次调频成本 C_i^{fm} 为储能电池损耗成本,由等效充放电循环次数 n_{eq} 计算得到:

$$C_i^{\text{fm}} = \frac{n_{\text{eq}}}{N_{\text{fail}}} (C_{\text{in}} + C_{\text{ma}}) \quad (11)$$

$$\lambda_i^{\text{Emin}} = (1 + r_i^{\text{min}}) C_i^{\text{fm}} \quad (12)$$

式中: C_{in} 、 C_{ma} 分别为一次性投资成本、运行维护成本; r_i^{min} 为共享储能 i 的最低期望收益率。最高接受价格 λ_i^{Emax} 为:

$$\lambda_i^{\text{Emax}} = (1 + r_i^{\text{max}}) \bar{\lambda}_i \quad (13)$$

式中: r_i^{max} 为共享储能 i 的最高期望收益率。

由于谈判机会的存在,共享储能 i 一般会在第1轮报价中报预期最高价格 λ_i^{Emax} ,随后通过谈判得到双方可以接受的价格。考虑到共享储能交易量较小,假设所有共享储能均采用线性报价策略,则共享储能 i 在第 k 轮谈判的报价 $\lambda_{i,k}^{\text{E}}$ 为:

$$\lambda_{i,k}^{\text{E}} = \lambda_i^{\text{Emax}} - \frac{k-1}{k_{\text{max}}-1} (\lambda_i^{\text{Emax}} - \lambda_i^{\text{Emin}}) \quad (14)$$

火电机组根据自身期望获得的最高收益率和最低收益率构建报价区间 $[\lambda_j^{\text{Gmin}}, \lambda_j^{\text{Gmax}}]$, λ_j^{Gmax} 、 λ_j^{Gmin} 分别为火电机组 j 的最高、最低报价,由式(15)得到。

$$\begin{cases} \lambda_j^{\text{Gmax}} = (1 - b_j^{\text{min}}) \frac{\Delta R_j}{C_j^{\text{Ga}}} \\ \lambda_j^{\text{Gmin}} = (1 - b_j^{\text{max}}) \frac{\Delta R_j}{C_j^{\text{Ga}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: b_j^{min} 、 b_j^{max} 分别为火电机组 j 的最低、最高期望收益率; ΔR_j 为火电机组 j 购买所需最大容量储能获得的收益。

理想情况下,假设所有的火电机组均采用线性递增的报价策略。火电机组 j 在首轮报价中选择最低价 λ_j^{Gmin} 。事实上,火电机组的报价策略受市场交易情况影响,因此需引入火电机组 j 的价格修正因子 δ_j ,以模拟该机组在谈判过程中的价格调整策略。

定义交易完成度 χ_j 为火电机组 j 已购储能量与其最大需求量的比值,即:

$$\chi_j = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{m_{j,t}} C_{i,j,t}^{\text{Ea}} / C_j^{\text{Ga}} \quad (16)$$

火电机组在不同交易轮次会有预期达成的交易完成度。当火电机组在当前交易轮次下没有达到预期的交易完成度时,其会加大价格让步幅度以提高成交概率,从而快速购买到储能;反之则会减小价格让步幅度。用价格修正因子 δ_j 修正火电机组 j 的报价策略,如式(17)所示。

$$\delta_j = (T/T_N)^{\phi_j \chi_j^{\frac{T_N}{N-T}}} \quad (17)$$

式中: ϕ_j 为火电机组 j 的影响因子常数,表示火电机组 j 报价策略受到市场交易情况的影响程度。

综上,火电机组 j 在第 k 轮谈判的报价 $\lambda_{j,k}^{\text{G}}$ 为:

$$\lambda_{j,k}^{\text{G}} = \lambda_j^{\text{Gmin}} + (1 - \delta_j) \frac{k-1}{k_{\text{max}}-1} (\lambda_j^{\text{Gmax}} - \lambda_j^{\text{Gmin}}) \quad (18)$$

3.3 基于效益最大化的火电机组采购策略

若第 k 轮谈判时共享储能 i 报价 $\lambda_{i,k}^{\text{E}}$ 低于火电机组 j 报价 $\lambda_{j,k}^{\text{G}}$,则谈判成功,其成交价格 $\lambda_{i,j}^{\text{cle}}$ 为:

$$\lambda_{i,j}^{\text{cle}} = \frac{1}{2} (\lambda_{i,k}^{\text{E}} + \lambda_{j,k}^{\text{G}}) \quad (19)$$

对于谈判成功的共享储能 i ,火电机组 j 可根据其效用函数和成交价格,以收益最大化为目标,决定签约或者拒绝。根据式(2),火电机组 j 在第 T 轮交易购买储能的效用函数为:

$$U_{j,T} = f_j \left(\sum_{i=1}^{m_{j,T}} x_{i,T} C_{i,j,T}^{\text{Ea}} + \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{m_{j,t}} C_{i,j,t}^{\text{Ea}} \right) K_j^{\text{P0}} D_j p \quad (20)$$

式中: f_j 为火电机组 j 的调频性能增长函数; $m_{j,T}$ 为火电机组 j 在第 T 轮交易中谈判成功的储能数量; $x_{i,T}$ 为机组在第 T 轮交易是否采购共享储能 i 的状态变量, $x_{i,T} \in \{0, 1\}$,其值为1表示采购,为0表示不采购; $C_{i,j,T}^{\text{Ea}}$ 为在第 T 轮交易中与火电机组 j 谈判成功的共享储能 i 容量。

火电机组 j 在第 T 轮交易中的最优采购策略为:

$$\begin{cases} \max U_{j,T} - \sum_{i=1}^{m_{j,T}} x_{i,T} \lambda_{i,j}^{ele} C_{i,j,T}^{Ea} \\ \text{s.t. } x_{i,T} C_{i,j,T}^{Ea} + \sum_{i=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{m_{j,i}} C_{i,j,i}^{Ea} \leq C_j^{Ga} \\ \lambda_{i,k}^E \leq \lambda_{j,k}^G \end{cases} \quad (21)$$

4 算例分析

假设:市场最大交易轮次 $T_N=3$,最大谈判回合数 $k_{max}=4$;火电机组、共享储能主体数量分别为 10、50 个;火电机组需求总量为 80.8 MW;共享储能功率在 0.5~2 MW 之间,总量为 70 MW。火电机组其他相关参数见附录 A 表 A1,共享储能其他相关参数见附录 A 表 A2。市场单位调频里程出清单价为 7.5 元 / MW。在 MATLAB R2019a 环境下,调用 CPLEX 求解器求解。基于 Hyperledger Fabric1.4 架构搭建区块链网络结构,由于区块链本身可视性较差,采用 Hyperledger Explorer 构建可视化的监控界面,区块链的部署信息和单个区块内的交易数据信息分别见附录 A 图 A1、图 A2。

4.1 市场交易结果

附录 A 图 A3 为在不考虑历史交易记录情况下 3 次市场交易的成交情况。由图可见,由于信息的缺乏,共享储能和火电机组之间的交易具有很高的偶然性,绝大部分共享储能均是在首轮中成交的,后 2 轮交易中只有少量的共享储能成交,其原因为:由于共享储能配置量对火电机组调频性能值的影响,在火电机组已购部分储能的情况下调频性能值趋近于饱和,继续购买共享储能带来的额外收益会低于购买成本;出价较低的共享储能和出价较高的火电机组在首轮已达成交易,部分在首轮未成交的共享储能报价较高,无法与火电机组就成交价格达成一致。

在相同的市场情况下连续模拟 50 次交易并记录交易信息,共享储能 E_5 的交易结果如图 3 所示。在前 10 次交易中,共享储能 E_5 的成交次数较少且收益不高。这是由于前期交易信息缺乏,共享储能 E_5 没有找到价格匹配的火电机组。在第 20~38 次交易过程中,共享储能 E_5 与多家火电机组以不同的价格

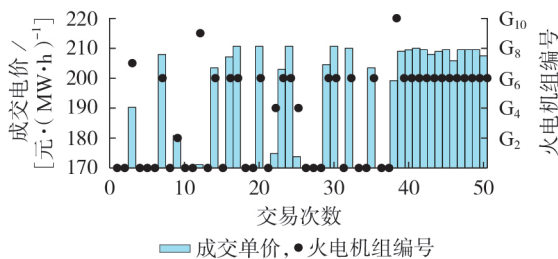


图 3 共享储能 E_5 的交易结果

Fig.3 Trading results of Shared Energy Storage E_5

达成交易,并获得市场价格信息。其中共享储能 E_5 与火电机组 G_6 的成交价格最高,因此在后续第 39~50 次交易中,共享储能 E_5 均选择继续向火电机组 G_6 进行报价并形成了稳定匹配。

共享储能 E_5 、 E_{15} 、 E_{25} 、 E_{35} 的容量和价格相同,但偏好不同。共享储能 E_5 和 E_{15} 仅有交易忠诚度偏好,共享储能 E_{25} 同时具有交易忠诚度和交易信任度偏好,共享储能 E_{35} 同时具有交易忠诚度和需求量偏好。附录 A 表 A3 给出了这些储能在 50 次交易中的成交情况。由表可知:共享储能 E_5 和 E_{15} 由于只有交易忠诚度偏好,因此在报价选择上只考虑交易记录,在交易过程中更容易达成交易,成交次数更高且均与出价较高的火电机组 G_6 形成了稳定匹配;共享储能 E_{25} 的成交对象均是信用分高于 9 的火电机组,共享储能 E_{35} 的成交对象均是功率大于 600 MW 的火电机组,均符合其交易偏好,但由于交易偏好过多导致交易对象受限,共享储能 E_{25} 和 E_{35} 的成交次数均显著低于共享储能 E_5 和 E_{15} ,且在 50 次交易中没有形成稳定匹配对象。

4.2 历史成交记录对火电机组收益的影响

在考虑 / 不考虑历史成交记录下各连续模拟 50 次交易,附录 A 图 A4 为最后 10 次交易 H_1-H_{10} 的结果和相应火电机组的收益。在不考虑历史成交记录的情况下,由于共享储能在报价对象的选择上是随机的,各火电机组的收益波动非常大。而在考虑历史成交记录的情况下,由于共享储能会选择向有成交记录且成交价格较高的火电机组报价,买、卖双方在价格上更趋近于一致;在谈判过程中双方可以基于历史交易记录及时发现价格信号,市场整体的成交率和成交量非常稳定,各火电机组收益基本保持不变;此外,在该情况下,市场成交率和火电机组的收益均显著高于不考虑历史成交记录的情况。

4.3 不同参数设置下的市场成交情况

在保持市场供需比不变的情况下,将市场规模(火电机组 / 共享储能的数量)分别设置为 6 / 30、10 / 50、20 / 100 台,其他市场条件设置不变,进行 50 次交易模拟,共享储能交易情况如图 4 所示。定

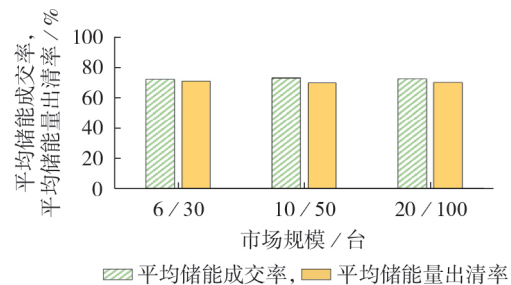


图 4 不同市场规模下的共享储能交易情况

Fig.4 Trading condition of shared energy storage under different market scales

义储能成交率为成交共享储能数量占市场共享储能总数量的比值,储能量出清率为成交共享储能总功率占市场共享储能总量的比值。由图可以看出,随着市场规模的变化,平均储能成交率和平均储能容量出清率维持稳定。

保持火电机组数量为10台,将市场上的共享储能数量从30台增加到70台,分别进行50次交易模拟,附录A图A5给出了共享储能 E_1 在不同市场供需比下的成交情况。可以看出,共享储能 E_1 的成交次数和平均成交单价随市场共享储能数量增加而逐渐下降。这是因为随着市场共享储能数量的不断增加,由于火电机组总需求不变,共享储能间的竞争程度加剧,其在价格谈判过程中处于劣势地位。

改变最大交易轮次,其他市场条件设置不变,连续50次的市场成交情况见表1。可以看出,在最大交易轮次为6时市场成交情况基本达到饱和,因此可根据实际市场时段限制将最大交易轮次设置为6。

表1 不同最大交易轮次下的市场成交情况

Table 1 Market trading condition under different maximum transaction rounds

T_N	平均储能成交率 / %	平均储能量出清率 / %	T_N	平均储能成交率 / %	平均储能量出清率 / %
1	64.4	64.5	6	83.0	85.3
2	72.0	70.2	7	82.8	85.2
3	74.4	71.6	8	83.4	85.6
4	78.2	74.1	9	82.2	84.1
5	80.4	77.4	10	83.1	85.0

4.4 考虑偏好的分散交易机制与不考虑偏好的集中交易机制对比

将市场上火电机组和共享储能数量分别设置为4台和20台。在平台主导的集中交易模式下,假设交易双方均为最理想报价,即火电机组均报最高价格,共享储能均报最低价格。在满足火电机组出价高于共享储能出价的情况下,以社会总效益(联合调频的额外收益减去共享储能参与调频的损耗成本)最大化进行出清。在相同的市场条件下模拟2种交易机制,结果如图5所示。集中交易机制下社会总

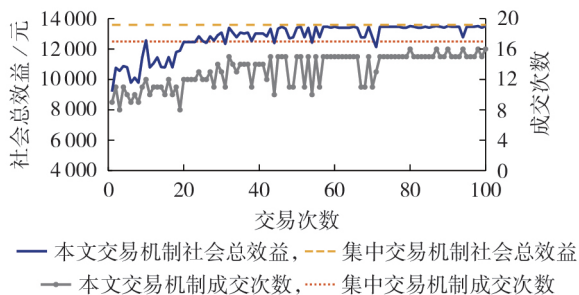


图5 本文交易机制与集中交易机制对比

Fig.5 Comparison between proposed trading mechanism and centralized trading mechanism

效益为13 596.6元,成交次数为17。

随着交易次数的增加,本文提出的基于区块链的分散交易机制可以在充分考虑不同市场主体偏好的情况下,使市场主体及时发现价格信号,实现与集中交易机制近似的市场成交情况和社会总效益。但集中交易机制需要第三方可信任交易机构参与,以北欧电力交易机构和日本电力交易机构为例,其市场主体需缴纳的成员管理费用分别为16 200 € / a、600 000 JPY ¥ / a,此外还需要根据成交价格支付一定比例的手续费。基于区块链的分散交易机制无需构建中心交易机构,可极大地减少交易中介成本。

5 结论

为充分利用储能资源提供调频服务,本文提出分布式微小储能以共享储能的形式参与火储联合调频的模式,并基于此提出适用于共享储能和火电机组匹配的分散交易机制,运用区块链技术支撑去中心化交易模式的正常运行。算例结果表明,所提出的交易机制能够实现共享储能资源的优化配置,火电机组能通过租赁共享储能进行联合调频获得收益。在考虑历史成交记录的情况下,交易双方能快速发现价格信号并获得稳定收益。与传统集中交易机制相比,基于区块链的分散交易机制能节省构建中心平台的交易成本,并在充分考虑市场主体偏好的情况下实现与集中交易机制近似的社会总福利。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵源筱,耿光超,江全元,等. 考虑功率变化速率的储能辅助单机调频控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):141-147. ZHAO Yuanxiao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 141-147.
- [2] 孙玉树,杨敏,师长立,等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术,2020,46(1):80-89. SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [3] 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. [2021-04-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-04/22/content_5601283.htm.
- [4] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):8-16,38. SUN Bingying, YANG Shuilu, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [5] 刘永奇,邹鹏,燕争上,等. 山西电力调频市场机制设计与运营实践[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):175-182. LIU Yongqi, ZOU Peng, YAN Zhengshang, et al. Mechanism design and operation practice of Shanxi power frequency regulation market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 175-182.

- [6] 谢惠藩,王超,刘湃泓,等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化,2021,45(4):172-179.
XIE Huifan, WANG Chao, LIU Paihong, et al. Application of joint frequency regulation technology of energy storage and thermal power in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4):172-179.
- [7] JO J, PARK J. Demand-side management with shared energy storage system in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5):4466-4476.
- [8] ZHAO D W, WANG H, HUANG J W, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1112-1123.
- [9] 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.
- [10] 平健,陈思捷,张宁,等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13):3682-3690.
- [11] SORIN E, BOBO L, PINSON P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2):994-1004.
- [12] 朱西平,付迁,文红,等. 区块链视角下多能源主体储能优化配置模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):47-56.
ZHU Xiping, FU Qian, WEN Hong, et al. Optimal allocation model of multi-energy entity energy storage from perspective of blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):47-56.
- [13] ESMAT A, DE VOS M, GHIASSI-FARROKHFAL Y, et al. A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology[J]. Applied Energy, 2021, 282:116-123.
- [14] 邓明辉,唐郑熠,黄达,等. 基于区块链的微电网电力交易匹配机制[J/OL]. 电力自动化设备. [2021-07-31]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202107017>.
- [15] 张圣祺,袁蓓,徐青山,等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):82-88,95.
ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):82-88, 95.
- [16] 陈丽娟,姜宇轩,汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):52-59.
CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):52-59.
- [17] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5):4005-4014.
- [18] LI Y N, YANG W T, HE P, et al. Design and management of a distributed hybrid energy system through smart contract and blockchain[J]. Applied Energy, 2019, 248:390-405.

作者简介:



裴佑

裴佑(1997—),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为共享储能与区块链技术(E-mail: peiyou@zju.edu.cn);

邱伟强(1993—),男,福建龙岩人,博士研究生,主要研究方向为共享储能与区块链技术(E-mail: qwqelectricity@zju.edu.cn);

杨莉(1974—),女,山东泰安人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力市场与电力经济、综合能源系统运行与规划(E-mail: eeyangli@zju.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Design of decentralized trading mechanism for shared energy storage joint frequency regulation based on blockchain

PEI You¹, PEI Zheyi², QIU Weiqiang¹, YANG Li¹, DONG Ling^{3,4}, WANG Lianfang⁵, LIN Zhenzhi¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Dispatching Control Center, Beijing 100031, China; 3. Qinghai Lvneng Data Co., Ltd., Xining 810008, China;

4. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Making full use of existing frequency regulation resource to improve the flexibility of power system is one of the effective ways to expand the renewable energy consumption capacity of system. A commercial mode of joint frequency regulation with distributed energy storage in the form of shared energy storage and thermal power is proposed, on this basis, a decentralized trading mechanism of joint frequency regulation considering the preference of distributed energy storage and thermal power units is designed. Combining with the decentralized characteristic of decentralized trading mechanism, a coalition chain structure including consensus mechanism and smart contract is constructed, and a classification management method of trading information considering the privacy of trading subjects is proposed. Case results verify the effectiveness of the proposed decentralized trading mechanism in realizing the optimal allocation of resource, and the trading volume and total social benefit are stable after multiple market simulations, which is similar to the centralized trading mode without considering the preference of trading subjects.

Key words: blockchain; decentralized trading mechanism; thermal-storage joint frequency regulation; shared energy storage; preference of trading subjects

附录 A:

表 A1 火电机组参数

Table A1 Parameters of thermal power units

火电机组编号	初始调频性能值, 最大值	机组功率/MW	最大调频性能时储能配置量/MW	报价范围/[元·(MW·h) ⁻¹]	交易信用分	日均调节深度/MW	影响因子常数
G ₁	4, 7	1 000	10	[188, 250]	9	3 000	1/2
G ₂	3.8, 6.9	800	9.6	[175, 220]	10	2 500	1/2
G ₃	3.5, 7.1	600	9	[167, 210]	8	2 000	1/2
G ₄	4.1, 7	500	6	[150, 190]	8	1 500	1/2
G ₅	3.8, 7	800	9.6	[167, 230]	9	2 500	1/2
G ₆	3.6, 7.1	600	9	[155, 235]	10	2 000	1/2
G ₇	4.1, 7	500	6	[145, 195]	8	1 500	1/2
G ₈	3.9, 6.9	800	9.6	[185, 235]	9	2 500	1/2
G ₉	3.5, 7.1	500	6	[150, 188]	10	1 500	1/2
G ₁₀	3.6, 7.1	500	6	[160, 210]	10	1 500	1/2

表 A2 共享储能参数

Table A2 Parameters of shared energy storages

共享储能编号	储能功率/MW, 容量/(MW·h)	报价范围/[元·(MW·h) ⁻¹]	交易信用分
E ₁ ,E ₁₁ ,E ₂₁ ,E ₃₁ ,E ₄₁	0.5 , 1	[200, 225]	10
E ₂ ,E ₁₂ ,E ₂₂ ,E ₃₂ ,E ₄₂	1.5 , 3	[205, 230]	9
E ₃ ,E ₁₃ ,E ₂₃ ,E ₃₃ ,E ₄₃	1 , 2	[188, 230]	10
E ₄ ,E ₁₄ ,E ₂₄ ,E ₃₄ ,E ₄₄	2 , 4	[210, 250]	9
E ₅ ,E ₁₅ ,E ₂₅ ,E ₃₅ ,E ₄₅	1 , 2	[170, 225]	10
E ₆ ,E ₁₆ ,E ₂₆ ,E ₃₆ ,E ₄₆	2 , 4	[180, 215]	8
E ₇ ,E ₁₇ ,E ₂₇ ,E ₃₇ ,E ₄₇	1 , 2	[170, 230]	10
E ₈ ,E ₁₈ ,E ₂₈ ,E ₃₈ ,E ₄₈	2 , 4	[200, 150]	10
E ₉ ,E ₁₉ ,E ₂₉ ,E ₃₉ ,E ₄₉	1.5 , 3	[175, 220]	10
E ₁₀ ,E ₂₀ ,E ₃₀ ,E ₄₀ ,E ₅₀	1.5 , 3	[188, 240]	9

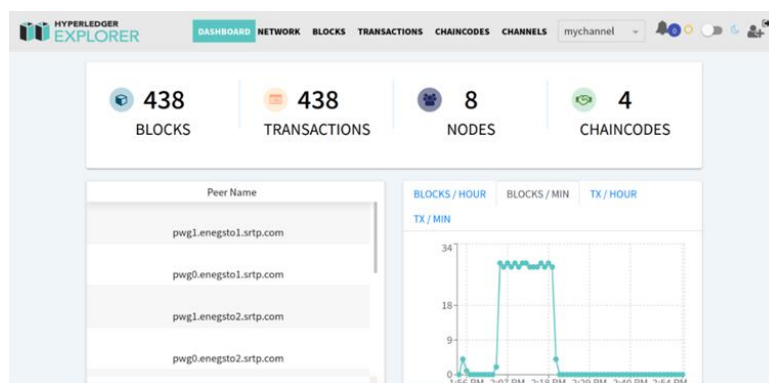


图 A1 区块链信息

Fig.A1 Blockchain information

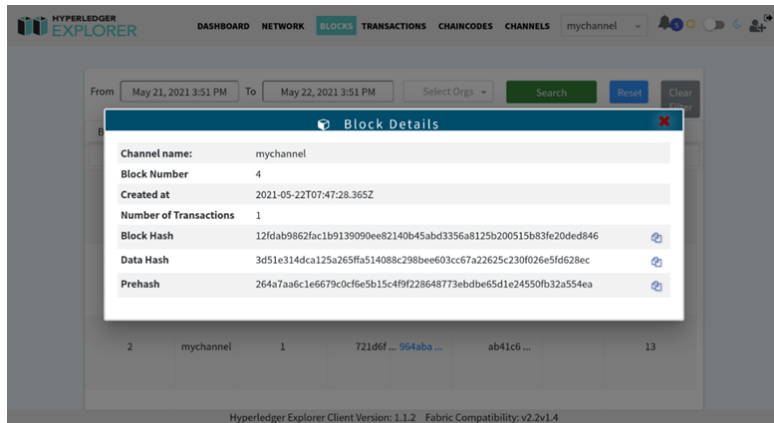


图 A2 区块数据信息

Fig.A2 Block data information

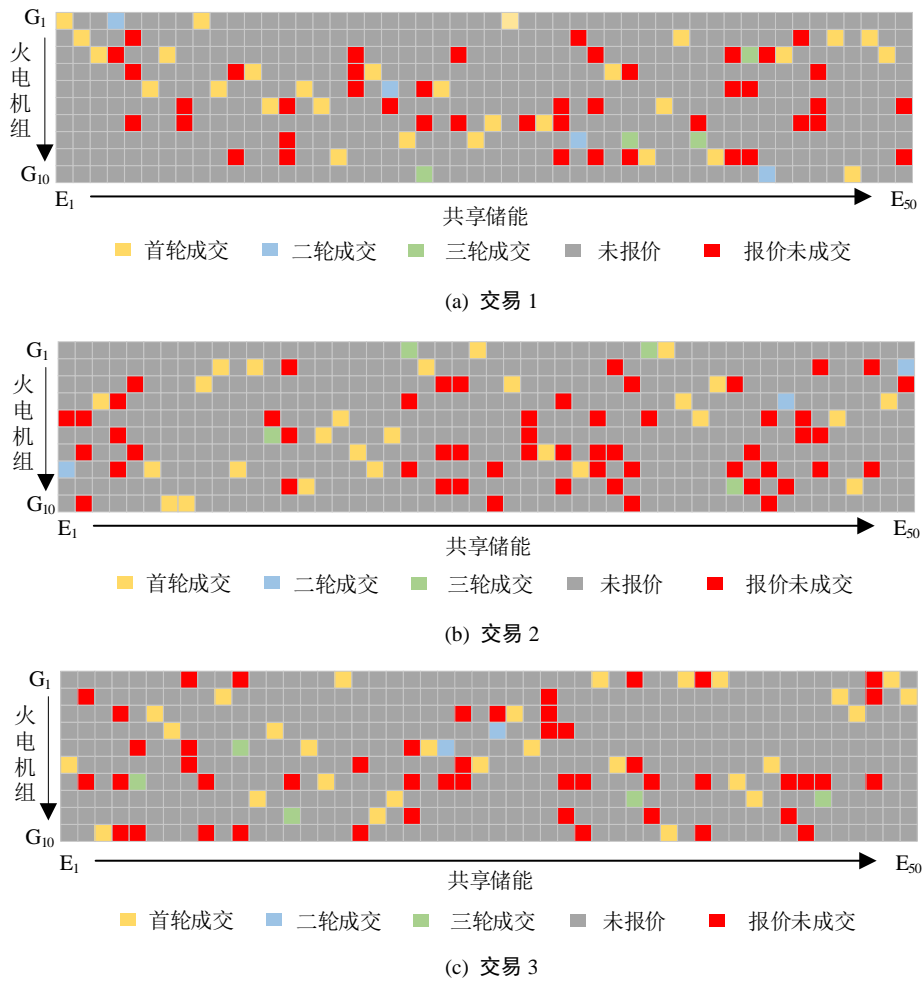


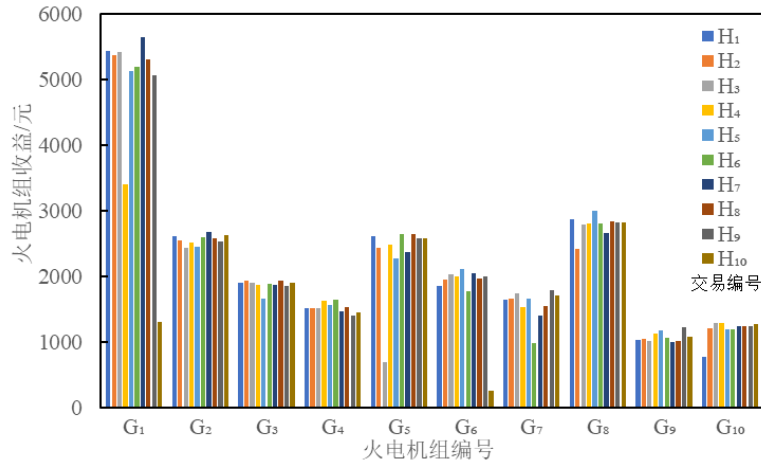
图 A3 不考虑历史交易记录情况下的 3 次市场交易结果

Fig.A3 Three transaction results without considering historical trading record

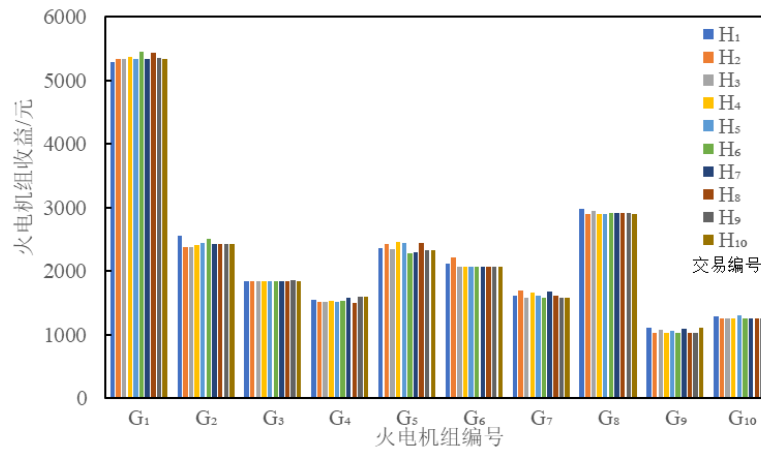
表 A3 不同偏好储能的成交情况

Table A3 Trading condition of energy storage with different preferences

共享储能编号	成交次数	成交对象	稳定匹配对象
E ₅	30	G ₂ , G ₄ , G ₆ , G ₇ , G ₉ , G ₁₀	G ₆
E ₁₅	35	G ₃ , G ₄ , G ₅ , G ₆ , G ₇ , G ₁₀	G ₆
E ₂₅	25	G ₁ , G ₂ , G ₄ , G ₈	—
E ₃₅	18	G ₁ , G ₅ , G ₆	—



(a) 不考虑历史成交记录



(b) 考虑历史成交记录

图 A4 2 种情况下的火电机组收益

Fig.A4 Revenue of thermal power units under two scenarios

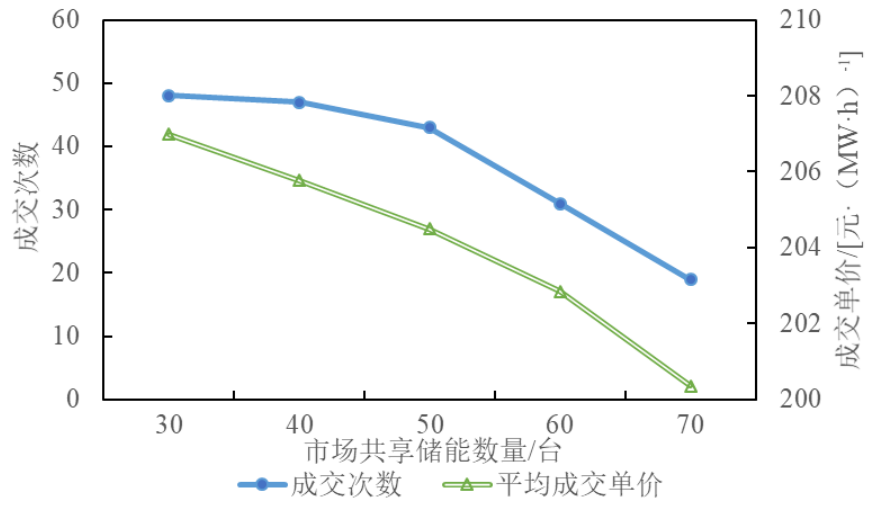


图 A5 不同供需比下共享储能 E_1 的成交情况

Fig.A5 Trading condition of Shared Energy Storage E_1 under different supply and demand ratios