

区块链视角下多能源主体储能优化配置模型

朱西平¹,付 迁¹,文 红²,钟 宇¹,苏作新¹,姚显億¹

(1. 西南石油大学 电气信息学院,四川 成都 610500;2. 电子科技大学 航空航天学院,四川 成都 611731)

摘要:基于区块链技术的能源交易体系能够有效解决传统集中资源配置带来的效率低下、隐私安全等问题,而能源互联网中大量能源主体间频繁的能源交易会大量的交易记录,使能源链变得更长,同时增加了各能源主体间的能源传输成本。基于此,研究了区块链视角下各能源主体的储能优化配置模型,通过配置合适的储能尽可能地实现自给自足。若能源主体有足够的剩余电力则作为卖方出售给其他缺能主体,这样不仅减少了频繁进行能源交易造成的能源浪费以及高额成本,也提升了区域能源的自给自足能力,还减少了能源数据冗余。以IEEE 33节点系统为例,验证了所提资源配置模型的有效性。

关键词:区块链技术;多能源主体;能源交易;资源配置;储能优化

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009003

0 引言

在能源互联网中,传统能源市场中的部分消费者逐渐转变为能源产消者^[1],即管理部分能源资源且能够产生和消耗能源的独立实体,可以是商业建筑、房屋、住宅社区和微电网等^[2]。类似于能源产消者的能源主体参与电力市场交易,正在成为全球电力市场的发展趋势^[3]。若仍采用传统的集中竞价、集中调度、集中结算的方式进行能源交易,不但效率低,而且难以保证交易信息的安全,亦不符合能源互联网“开放、对等、互联、共享”的特性。区块链技术的引入将是解决该问题的一个可行方案。

区块链被视为一个集开放性与透明性为一体的分布式数据库,最初作为比特币交易的底层技术,目前已经初步应用于商业领域,且在能源交易领域也取得了一定的研究成果。文献[4]利用区块链技术将电力交易过程模拟为智能合约生成过程,类比特币的转账方式完成结算,达到了一定的去中心化效果;文献[5-6]指出,区块链技术解决了分布式能源交易中的信任问题,在分析了区块链技术与电力交易的匹配程度的基础上,建立了一种基于智能合约的电力市场交易模型;文献[7-8]简述了基于区块链技术的微电网能源交易方法,并构建了区块链技术支持下的微电网能源交易模型,促进了微电网内部的能源交易;文献[9]应用区块链技术构建了多微电网市场的竞争博弈模型,促进了区域能源的供需协调。

上述文献大多是基于区块链技术建立能源市场交易模型以促进能源交易方面的研究,并未进一步考虑到区块链视角下频繁进行能源交易所带来的一些问题。将区块链技术应用于能源交易领域固然能解决传统集中资源配置所存在的瓶颈问题,但由于大量能源产消者的产生使得能源主体数激增,能源主体间频繁地进行能源交易使得能量流流动频繁,这不仅会造成能源浪费,也会大幅增加能源传输成本。

在多能源主体网络中,各能源主体都可参与能源交易市场。对于供能节点而言,其对能源交易网络的影响较明显,因此实现供能主体资源的优化配置是必要的。文献[10]根据用户的用能偏好促进供能方的资源优化配置;文献[11]将区块链技术应用与含储能系统的需求响应,依靠储能根据既定准则实时响应负荷需求,在达到供需协调的同时,供能方能够实现资源的自动最优配置。

本文提出了区块链视角下的多能源主体储能优化配置模型,以能源互联网中的产消者作为供能主体,通过优化配置其储能来解决多能源主体频繁交易带来的区块链数据冗余与高额传输成本问题。当产消者能够生产足够的能源满足自身负荷需求时,储能能力对资源配置决策的影响较大。若储能能力不足,则出于自身利益必须将剩余电力出售;若储能能力足够,则将进一步评估是否将剩余电力留作下一时段使用或是将剩余电力出售给其他缺能主体。考虑到本文以能源链长度(某时段内能源链的增长长度)以及能源传输成本为优化目标,故需要通过设置合理的交易阈值来加以平衡。若阈值过高,则可能出现部分产消者参与能源交易积极性不高的情况,无法实现区域能源自给自足;若阈值过低,则可能无法达到预期的优化目标。故本文设置了相应的

收稿日期:2020-05-28;修回日期:2020-07-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904905);四川省科技计划项目(2020YFN0019)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904905) and the Science and Technology Program of Sichuan Province(2020YFN0019)

交易奖励机制。最后,详细说明了本文所提优化模型的求解流程,并以IEEE 33节点系统为算例进行了仿真验证。

1 区块链视角下的能源交易体系

能源互联网中除了包含传统的能源生产者与消费者,能源产消者作为新兴的能源主体也参与到电力市场交易中,且数量众多,一方面使得参与能源市场交易的多方主体之间的供需关系更加复杂;另一方面,能源主体数量激增使得交易数据呈指数级增加,若仍沿用传统的中心化能源配置方式集中处理并储存海量数据,不仅会使系统的效率低下,也会大幅提升系统遭受攻击的风险^[12]。基于区块链技术的能源交易体系可以为海量能源主体之间创造对等交易网络,参与主体共同对数据进行核验以及维护,这样在提升交易效率的同时也保证了交易的安全性。图1以能源产消者($P_1, P_2, \dots, P_N$)为例展示了基于区块链技术的多能源主体交易网络。

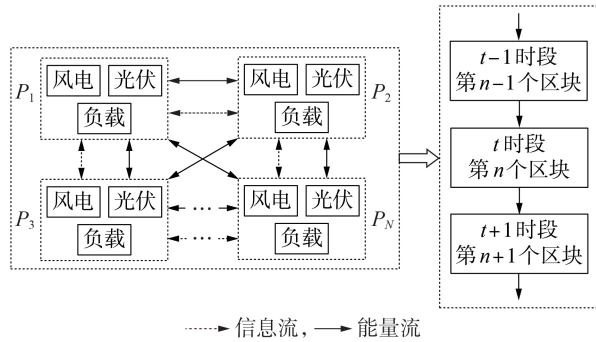


图1 基于区块链技术的多能源主体交易网络

Fig.1 Multi-energy entity transaction network based on blockchain technology

图1显示了区域内各产消者通过风能、光伏发电生产电能,若能够满足自身负荷需求,则其可以转变为生产者,将多余能源出售给其他缺能主体;但若无法自给自足,则其转变为消费者,向其他供能主体购能。各主体之间可以利用智能合约达成交易。交易完成后,将该笔交易写入区块链网络,并用哈希(Hash)函数生成的密码散列链接成能源链。以形成的交易对(P_1, P_2)为例,买方 P_2 将购能所需资金转入卖方 P_1 指定的账户, P_1 验证相关信息的合法性(哈希值),验证通过后将作为一个新的区块同步到能源链中^[13]。如此基于区块链技术的多能源主体交易网络中的所有能源主体都有发布交易的权利,新的区块不断产生,能源链将变得更加冗长,使得数据的维护管理难度加大,同时多个交易对之间频繁进行能源交易调度不仅会造成能源浪费,还会使得能源传输成本增加。

2 区块链视角下多能源主体优化配置模型

2.1 基于区块链技术的储能优化配置模型

在基于区块链技术的多能源主体交易网络中,各能源主体都可以发布交易信息。为了解决多能源主体频繁交易造成的能源链冗长以及高额传输成本问题,本文主要通过优化产消者的储能配置策略以达到资源的最优配置。

基于区块链技术的多能源主体交易网络需要实时数据予以支撑,可以利用智能仪表实时采集产能、用能以及能源交易数据^[14]。能源产消者具有产能、用能、储能以及售能4种属性。定义能源产消者集合为 Π_p 。假定在 t 时段内产消者 $P_i (P_i \in \Pi_p)$ 的产能能力固定,分别用 $E_{P_i}^g(t)$ 、 $E_{P_i}^l(t)$ 、 $E_{P_i}^s(t)$ 表示其在 t 时段内的产能量、用能量、储能量(本文中 t 时段内的储能量统一表示上一时段的剩余储能量),则产消者 P_i 可出售的能源为 $E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t)$ 。为了方便描述,本文将单纯的电力用户视为储能和供能能力为0的产消者。

本文以能源链长度 L_{el} 最短以及能源传输成本 C_{et} 最低为优化目标,这主要是根据产消者的能源配置策略决定的。另外,为了保证区域负荷供应,需添加激励函数来鼓励各能源主体积极参与能源交易。优化目标可表示为:

$$\begin{aligned} \min l \sum_t \sum_{P_m \in \Pi_p} \sum_{P_n \in \Pi_p, n \neq m} \alpha_{P_m, P_n}^t + \\ c \sum_t \sum_{P_m \in \Pi_p} \sum_{P_n \in \Pi_p, n \neq m} \alpha_{P_m, P_n}^t E_{P_m, P_n}^t d_{P_m, P_n} - W = \\ \min L_{el} + C_{et} - W \end{aligned} \quad (1)$$

其中, l 为合法交易完成后添加在能源链上的区块长度; α_{P_m, P_n}^t 为布尔变量, t 时段产消者 P_m 与 P_n 之间的交易成立时有 $\alpha_{P_m, P_n}^t = 1$,不成立时有 $\alpha_{P_m, P_n}^t = 0$; c 为能源传输单价; E_{P_m, P_n}^t 、 d_{P_m, P_n} 分别为 t 时段产消者 P_m 与 P_n 之间的实时能源交易量以及两者之间的距离; W 为激励函数,是为了鼓励拥有大量剩余储能的能源主体将多余能量出售给其他缺能主体,而仅有少量储能的个体自给自足即可。对于卖方 P_i 而言,规定函数 W 与其交易次数 N_d 以及能源交易量有关,则函数 W 可以表示为:

$$W = \left(\beta \frac{\log_{N_{P_i}} N_d}{1 + \log_{N_{P_i}} N_d} + 0.1 \right) \times \sum_t \sum_{P_i \in \Pi_p} (E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t)) \gamma_{P_i}^t \quad (2)$$

$$\gamma_{P_i}^t = \begin{cases} 0 & 0 \leq E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t) < \theta \\ 1 & E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t) \geq \theta \end{cases} \quad (3)$$

其中, N_{P_i} 为某时段参与交易的能源主体数; β 为激励

因子; γ'_{P_i} 用以限制函数 W 的适用范围; θ 为储能量出售阈值,只有当产消者的剩余能量不小于该阈值时才将其出售,用以平衡交易次数。根据 θ 的取值范围,可分为以下3种情况:①当 $E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t) \geq \theta$ 时, $\gamma'_{P_i} = 1$,即产消者 P_i 将剩余能量尽可能出售给其他缺能主体;②当 $0 < E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t) < \theta$ 时, $\gamma'_{P_i} = 0$,交易时没有额外的奖励,故产消者 P_i 尽可能不参与能源交易市场,而是将剩余能量存储用于自给自足;③当 $E_{P_i}^l(t) \geq E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t)$ 时,产消者 P_i 不具备供能能力,若有需要则作为消费者购买所需的能量。

根据以上3种情况,当产消者的产能能力相对稳定时,储能量的大小对其能源配置决策有较大的影响;此外,合理的储能量出售阈值 θ 也能起到相应的约束作用。若 θ 取值过大,可能会使得各产消者参与能源交易的积极性过低,难以满足区域负荷供应需求;若 θ 取值过小,无法起到减少能源交易次数以及降低能源传输成本的作用。因此需选取合适的 θ 值以平衡负荷需求与能源交易次数。

2.2 相关约束条件

(1) 线路传输约束。

在能源交易完成的过程中,信息流、能量流在交易双方之间流动。在通常情况下,线路信息传输容量足够大,因此本文只列写了线路的能量传输约束如式(4)所示,产消者 P_m 与 P_n 之间的能源交易量不能大于线路的最大传输容量 $C_{cl,max}$,以确保能量传输的安全性。

$$E_{P_m, P_n}^l \leq C_{cl, max} \quad (4)$$

(2) 能源产消者的自身约束。

本文主要是通过优化能源产消者的储能配置策略来达到优化目标,规定其储能量应遵守式(5)所示约束。

$$E_{P_i}^s(t) \leq E_{s, max} \quad (5)$$

式(5)表明各产消者在 t 时段内的储能量不能大于最大储能量 $E_{s, max}$ 。此外,理论上当 $E_{s, max}$ 足够大时, N_d 将无限大,即出现某个能源主体垄断供能的情况,但这种情况在多能源主体对等交易网络中是不允许的,会扰乱市场秩序,因此规定:

$$0 \leq N_d \leq N_{d, max} \quad (6)$$

其中, $N_{d, max}$ 为单一能源主体的最大可交易次数。

(3) 边界约束。

$$L_{el} \leq L_{el, max} \quad (7)$$

$$C_{et} \leq C_{et, max} \quad (8)$$

$$W \leq W_{max} \quad (9)$$

式(7)和式(8)分别表示能源链长度不能超过其上限值 $L_{el, max}$ 、能源传输成本不能超过其上限值 $C_{et, max}$,

两者的上限值均在缺能主体的负荷需求得到满足且交易次数达到最大时取得;式(9)表示激励函数 W 不能超过其最大值 W_{max} 。

(4) 其他约束。

对于产能量较高的产消者而言,若其有足够的剩余能量,为了最大化自身利益可以将其出售给其他缺能主体;若其下一时段的负荷需求不能自给自足,仍需向其他主体购能。故产消者集合 Π_P 可以进一步分为卖方集合 Π_S 与买方集合 Π_B ,分别如式(10)和式(11)所示。

$$\Pi_S = \{P_i \in \Pi_P \mid E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t) \geq \theta\} \quad (10)$$

$$\Pi_B = \{P_i \in \Pi_P \mid E_{P_i}^g(t) + E_{P_i}^s(t) < E_{P_i}^l(t)\} \quad (11)$$

在任意时段,至少要保证能源的供需平衡,即有足够的剩余能量(如式(12)所示),且有相当一部分产消者参与能源交易(如式(13)所示),以提升区域能源的自给自足能力。

$$\sum_{P_m \in \Pi_S} (E_{P_m}^g(t) + E_{P_m}^s(t) - E_{P_m}^l(t)) \geq \sum_{P_n \in \Pi_B} (E_{P_n}^l(t) - E_{P_n}^s(t) - E_{P_n}^g(t)) \quad (12)$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_{max} \quad (13)$$

其中, θ_{max} 为储能量出售阈值的最大限值,在达到区域最低供能需求时取得。

2.3 模型分析与求解

本文的优化目标是实现能源链长度最短以及传输成本最低,可以通过优化各能源产消者的储能配置策略实现,即在满足区域负荷供应需求的前提下,通过选取合适的 θ 值以及配置合适容量的储能设备 $E_{s, max}$ 值来尽可能降低能源交易次数。而 γ'_{P_i} 也是用以平衡交易次数,故目标函数式(1)可以等效为:

$$\begin{cases} \max \sum_t \sum_{P_i \in \Pi_P} \gamma'_{P_i} \\ \text{s.t. 式(2)—(13)} \end{cases} \quad (14)$$

在满足区域负荷供应需求的前提下,售能主体通过合理配置储能来获取更高的交易奖励,同时达到降低交易次数进而减少能源频繁传输所产生的高额成本以及缩短能源链长度的目的。即当 $W \rightarrow W_{max}$ 时,若能源链长度 $L_{el} < L_{el, max}$ 以及能源传输成本 $C_{et} < C_{et, max}$,则该模型能够取得局部最优解。该优化模型问题属于非确定性多项式(NP)难问题,很难用常规的方法进行求解,因此本文采用迭代搜索的方法求解其满足条件的解^[15],求解流程如图2所示。

某时段交易开始后,获取各能源主体的实时状态并判断能源主体的类别, N_{sp} 的初始值为能源卖方集合 Π_S 中产消者的数量,并令 $E_{P_i}^r(t) = E_{P_i}^g(t) +$

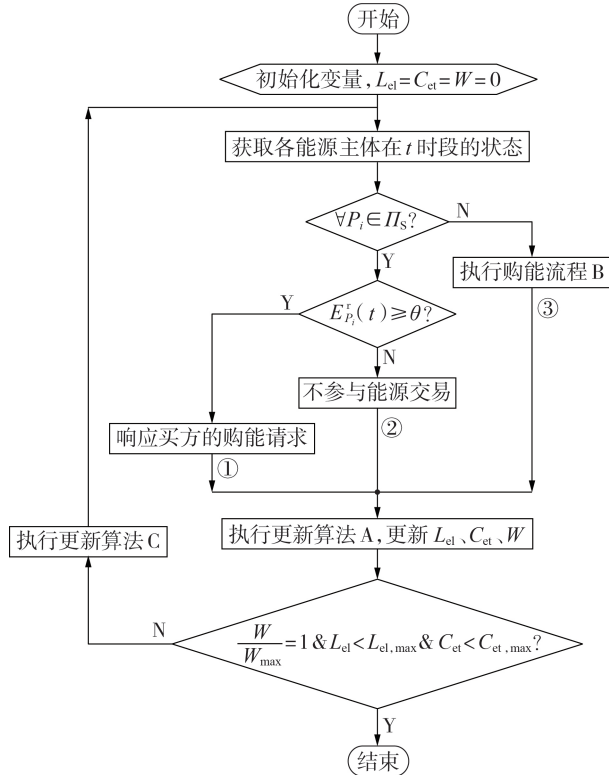


图2 多能源主体交易模型的求解流程

Fig.2 Solution process of multi-energy entity transaction model

$E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^l(t)$ 。对于卖方而言,当 $E_{P_i}^r(t)$ 取不同范围内的值时,产消者 P_i 出于自身利益做出不同的决策(进行即时交易或者将剩余能量留作下一时段备用),分别更新相应的 C_{el} 、 L_{el} 、 W 的值,具体的更新算法 A 见附录 A。

买方执行的购能流程 B 如附录 B 中图 B1 所示。图中, $E_{P_i}^r(t) = E_{P_i}^l(t) - E_{P_i}^s(t) - E_{P_i}^t(t)$; S' 为一个有序集合,表示接收购能请求的卖方集合,内部的卖方主体按照与买方 P_n 之间的距离升序排列而成。若 P_m 无法完全满足 P_n 的购能需求,则 P_n 继续与其他卖方交易,直至需求得到满足。 $A_{arr} = [A_{arr}[0], A_{arr}[1]]$ 为一个二维数组, $A_{arr}[0]$ 、 $A_{arr}[1]$ 分别用于存储每次交易完成后根据式(1)计算所得的 L_{el} 、 C_{el} 的值。

每次决策完成后,当不满足终止条件时,执行附录 C 中的更新算法 C,更新卖方主体在下一时段的储能 $E_{P_m}^s(t+1)$,并继续进行交易。其中 θ' 为迭代步长, ε 为可调参数,用以控制迭代步长。若所有主体交易完成后仍未达到终止条件,需按实际需求更新 θ' 值;当满足终止条件时,表明式(14)所示模型取得可行解,证明该优化策略是有效的。另外,还需通过对比多个可行解,以获得该优化模型的最优解。

3 算例分析

为了验证本文所提基于区块链技术的多能源主

体储能优化配置模型的有效性,在实验室环境下对 IEEE 33 节点系统进行模拟测试,且默认就近供能原则。将各节点视为能源主体,假定该配电系统共有 13 个普通电力用户、20 个产消者参与到多能源主体交易中,系统网络拓扑如图 3 所示(图中记节点 0 处的电力用户为 P_0 ,节点 1 处的产消者为 P_1 ,其他与之类似)。假定各产消者的产能能力 $E_{P_i}^s(t)$ 固定为 $5 \text{ kW} \cdot \text{h}$,研究分析 08:00—20:00 时间范围(分为 12 个时段,单位时段时长 1 h)内的储能配置情况。 $N_{d,max}=3$, $E_{S,max}$ 的初始值设为 $5 \text{ kW} \cdot \text{h}$,且假定初始时段各产消者的储能设备为完全储能状态。每个时段内各能源主体的负荷值在 $[5 - 12E_{S,max}/33, 5 + 12E_{S,max}/33]$ 范围内随机产生。对 l 和 c 进行标准化处理,令每笔合法交易写进区块链时能源链递增的长度 $l = 1 \text{ p.u.}$,单位能源传输单位距离时的成本 $c = 1 \text{ p.u.}$ 。为了充分调动各产消者的供能积极性,令 $\beta = 0.6$ 。图 3 中,以 2 个节点之间的线段数作为两点之间的距离(比如节点 1 与节点 18 之间相距 1 个单位长度,节点 1 与节点 19 之间相距 2 个单位长度)。

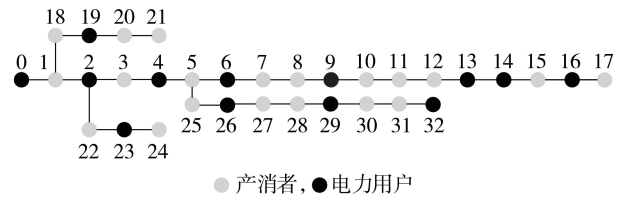


图3 含多能源主体的配电网拓扑结构

Fig.3 Topology structure of distribution network with multi-energy entity

图 4 为多能源主体交易模型示意图。图中节点 30 和节点 31 为满足交易条件的能源主体,节点 30 为节点 29 供能,若存在剩余能量且仍满足交易条件,则可以继续将剩余能量出售给节点 32。此时节点 32 的总负荷需求无法由节点 30 完全满足,则节点 32 与其相距最近的节点 31 进行交易。此外,若产消者节点缺能,也可向与其相距较近的供能节点购能。当交易完成后,区块链各个节点将能源交易量、交易价格、所获奖励、储能配置信息等交易细节数据存储在各个节点中,然后将该笔交易的信息公布至区块链网络,收到该信息的各个区块链节点以 Merkle 树的形式将其记录^[16],如图 5 所示。

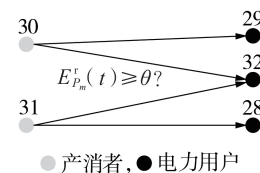


图4 含交易阈值的多能源主体交易示意图

Fig.4 Schematic diagram of multi-energy entity transaction with transaction threshold

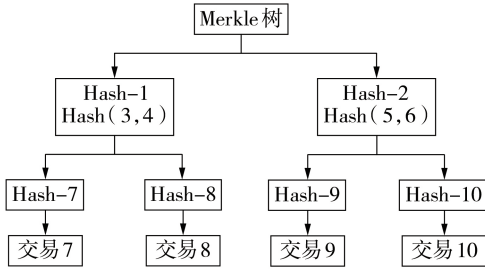


图5 交易信息的记录形式

Fig.5 Recording form of transaction information

为了研究产消者的储能最优配置,须分别求得不同交易阈值下的交易数据。根据边界约束可知,当 $\theta=0$,即不设交易阈值时,各能源主体自由交易直至满足负荷需求,此时可以求得 $L_{el,max}$ 、 $C_{et,max}$ 。分析 W 与交易次数 N_d 之间的相关性如图6所示。

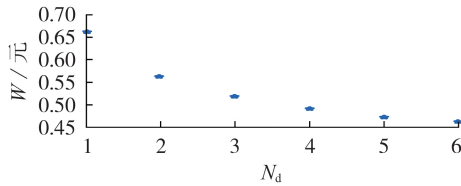
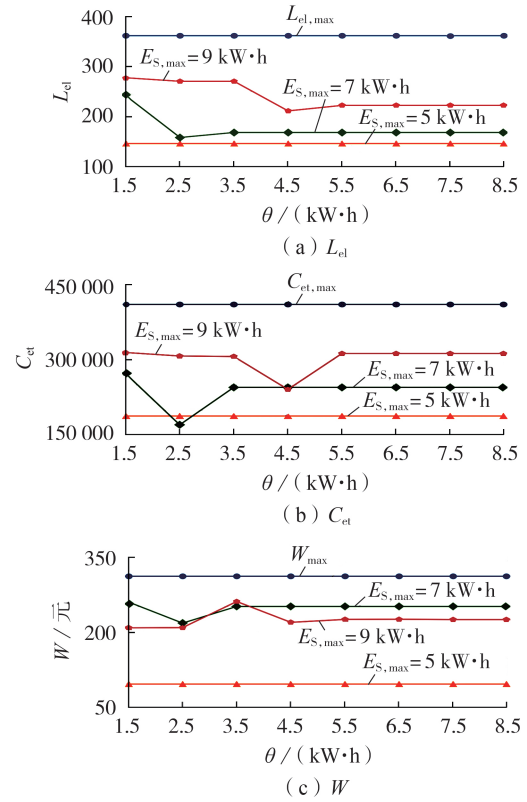
图6 W 与 N_d 之间的相关性Fig.6 Relevance between W and N_d

图6为单一产消者在区域能源主体总数以及总负荷需求相对稳定时所获得的交易奖励 W 与交易次数 N_d 之间的相关性。由图可以看出, W_{max} 在交易次数最少时取得。

关于式(12)和式(13)所示约束,考虑到各产消者有一定的初始储能能量,当 $\theta \approx 1.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时才有明显的约束效果,故将其初始值设为 $\theta_0 = 1.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。此外,结合产能能力以及负荷分布,当 $E_{S,max}$ 取值为5、7、9 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (分别对应储能能力低、中、高3个等级)时的交易结果如图7所示(图中 L_{el} 、 C_{et} 均为标么值),当 θ 达到 θ_{max} ,即达到区域最低供能需求时,各指标的数值不再变化。

由图7(a)可知,当 $E_{S,max} = 5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时,产消者的储能能量十分有限, L_{el} 的值最小,说明各能源主体之间的交易次数很少,再结合图7(c)可知所获交易奖励十分低,说明此时基本都是一对一能源供应,因此能源传输成本 C_{et} 也较小。在该情况下, L_{el} 、 C_{et} 均十分小,同时能够获得的交易奖励过于有限,无法通过平衡 θ 值来达到最优,各产消者的供能积极性不高,并且一对一能源供应也难以保证供能可靠性。当 $E_{S,max}$ 增大时,结合图7(a)、(c)可知,各能源主体之间的交易次数有明显的增加,说明此时各产消者有足够的可供出售的储能能量。此外,由图7可知,当 θ 值较小时,储能能量对指标值的影响很小;而随着 θ 值不断增加,会出现一个明显的拐点,这是因为设置的交易阈值起到了较为明显的约束作用,在拐点处部

图7 不同 $E_{S,max}$ 取值下 L_{el} 、 C_{et} 、 W 的分布情况Fig.7 Distribution of L_{el} 、 C_{et} and W under different values of $E_{S,max}$

分储能能量较少的产消者将存储少量的剩余能量以备后续时段再利用,有效地减少了交易次数,而储能能量较多的产消者相应地可为多个缺能主体供能,此时其获得的奖励明显多于 $E_{S,max} = 5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时所获得的奖励;当 θ 值进一步增大时, L_{el} 与 C_{et} 的值却有明显的增加,这是因为当 θ 值过大时,不满足供能条件的产消者增多,而满足供能条件的产消者可能与用能主体相距过远,此时虽然能源链长度仅大约增长了8%,但是能源传输成本 C_{et} 却增长了29%。

前文讨论了不同 θ 值下各能源主体间的交易情况,可知当 $E_{S,max} = 5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时综合效益不高。由图7(c)可以看出,当 $E_{S,max}$ 增加时,最优 θ 值发生明显前移,图7(a)、(b)中也有相应的体现,因此为了进一步明确 $E_{S,max}$ 的最优取值,比较当 $E_{S,max}$ 分别为7、9 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 时各指标相较于其边界值($L_{el,max}$ 、 $C_{et,max}$ 、 W_{max})的改善率,结果如表1所示。综合图7可知,各指标取最优值时 θ 可能的取值集合为 $\{1.5, 2.5, 3.5, 4.5\} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

对于本文所提优化模型而言, L_{el} 、 C_{et} 的值越小越好,而 W 的值则是越大越好。综合对比表1中各指标的改善率可明显看出,相较于 $E_{S,max} = 9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的取值情况,当 $E_{S,max} = 7 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时各指标的改善率更高,但此时 θ 的具体取值仍不确定,为了保证结果的可靠性,细化 θ 的取值范围进行多次计算,得到3个指标的平均改善率如图8所示。

表1 θ 和 $E_{S,max}$ 取不同值时各指标的改善率Table 1 Improvement rate of each index with different values of θ and $E_{S,max}$

$E_{S,max} /$ (kW·h)	$\theta /$ (kW·h)	L_{el} 的改善 率/%	C_{el} 的改善 率/%	W的改善 率/%
7	1.5	33.3	33.0	16.8
	2.5	56.0	58.0	30.0
	3.5	54.3	39.5	18.9
	4.5	54.3	39.5	18.9
9	1.5	23.9	22.9	32.9
	2.5	26.1	25.1	31.6
	3.5	27.8	25.9	16.4
	4.5	41.6	41.1	29.5

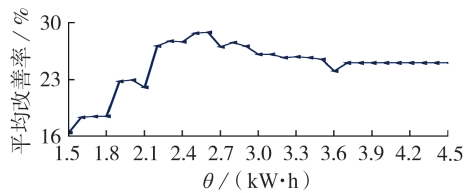


图8 3个指标的平均改善率

Fig.8 Average improvement rate of three indexes

细化 θ 的取值范围后,由图8可知,指标的平均改善率对 θ 的取值变化并不敏感,只有当 θ 达到一定的取值范围时,改善率才有明显的变化,且当 $\theta \approx 2.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时,指标的平均改善率达到峰值,此时交易次数与能源传输成本相较于优化前分别减少了56.0%和58.0%。因此综上可以表明,当 $E_{S,max} = 7 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 且 $\theta = 2.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时,模型的解相对最优。

4 结论

本文研究了区块链视角下的多能源主体储能优化配置模型,旨在解决能源互联网中大量能源主体间频繁进行能源交易所产生的大量交易记录,从而使能源链变得冗长以及使能源传输成本增加的问题。基于此,建立了多能源主体的储能配置优化模型,通过配置合适的储能尽可能地实现能源主体的自给自足,若有足够的剩余电力,则作为卖方将多余能量出售给其他缺能主体,这样不仅减少了频繁的能源交易所造成的能源浪费以及高额传输成本,也提升了区域能源的自给自足能力,还减少了能源交易数据冗余。

但是需要指出的是,本文给出的算例只考虑了有限的能源主体之间的交互,在实际的海量能源主体环境下,能源主体之间的交互关系可能更加复杂多变,因此下一步可考虑扩大实验规模,检验在海量能源主体下所提储能优化配置模型的有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 艾欣,王坤宇,胡俊杰,等. 基于交互能源机制的产消者群分布式调度方法研究[J]. 电网技术,2020,44(5):1766-1777.

AI Xin,WANG Kunyu,HU Junjie,et al. Study on distributed scheduling approach of aggregated prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Power System Technology,2020,44(5):1766-1777.

- [2] LIANG G Q,WELLER S R,LUO F J,et al. Generalized FDIA-based cyber topology attack with application to the Australian electricity market trading mechanism[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):3820-3829.
- [3] WANG J S,SUN S. Research on block chain technology in energy internet[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering,Information Science & Application Technology(ICCIA 2017). Wuhan,China:Atlantis Press,2017:138.
- [4] 韩冬,张程正浩,孙伟卿,等. 基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):89-96.
- HAN Dong,ZHANG Chengzhenghao,SUN Weiqing,et al. Framework design of smart distribution trading platform based on blockchain technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(7):89-96.
- [5] HAHN A,SINGH R,LIU C C,et al. Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions[C]//Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. Arlington,VA,USA:IEEE,2017:1-5.
- [6] APOSTOLOPOULOU D,BAHRAMIRAD S,KHODAEI A. The interface of power:moving toward distribution system operators[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2016,14(3):46-51.
- [7] 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/OL]. 电力自动化设备. (2020-04-21)[2020-05-28]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202005>.
- [8] 杨明通,周步祥,董申,等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):155-161.
- YANG Mingtong,ZHOU Buxiang,DONG Shen,et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):155-161.
- [9] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局域多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):191-203.
- MA Tiannan,PENG Lilin,DU Ying,et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on blockchain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):191-203.
- [10] 余维,杨晓宇,田钊,等. 基于用户偏好的电力资源去中心化配置方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(13):98-104,138.
- SHE Wei,YANG Xiaoyu,TIAN Zhao,et al. Decentralization configuration method of power resources based on user preference[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(13):98-104,138.
- [11] 杨晓东,张有兵,卢俊杰,等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3703-3716.
- YANG Xiaodong,ZHANG Youbing,LU Junjie,et al. Blockchain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(13):3703-3716.
- [12] SHEIKH A,KAMUNI V,UROOJ A,et al. Secured energy trading using Byzantine-based blockchain consensus[J]. IEEE Access,2020,8:8554-8571.
- [13] LIANG G Q,WELLER S R,LUO F J,et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Smart

Grid,2019,10(3):3162-3173.

- [14] 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.
- [15] 梅生伟,王莹莹,刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):13-19.
MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.
- [16] 王冰钰,颜拥,文福拴,等. 基于区块链的分布式电力交易机制[J]. 电力建设,2019,40(12):3-10.
WANG Bingyu, YAN Yong, WEN Fushuan, et al. A blockchain based distributed power trading mechanism[J]. Electric Po-

wer Construction, 2019, 40(12): 3-10.

作者简介:



朱西平

朱西平(1971—),男,湖南张家界人,教授,博士,从事能源互联网与能源区块链、无线通信与网络等方面的研究工作(E-mail: 171372240@qq.com);

付 迁(1994—),男,四川达州人,硕士研究生,主要从事能源互联网中的能源调度规划、能量枢纽以及能源区块链方面的研究工作(E-mail: 824985249@qq.com);

文 红(1969—),女,四川成都人,教授,博士,主要从事无线通信与网络方面的研究工作(E-mail: sunlike@uestc.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimal allocation model of multi-energy entity energy storage from perspective of blockchain

ZHU Xiping¹, FU Qian¹, WEN Hong², ZHONG Yu¹, SU Zuoxin¹, YAO Xianyi¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The energy transaction system based on blockchain technology can effectively solve the problems of low efficiency and privacy security brought by traditional centralized resource allocation, while frequent energy transactions among a large number of energy entities in the energy internet will generate a lot of transaction records, which makes the energy chain longer and increases the energy transmission costs among energy entities. Based on this, the optimal allocation model of energy storage from the perspective of blockchain is proposed for each energy entity, which realizes self-sufficiency as much as possible by allocating appropriate energy storage. If the energy entity has enough surplus electricity, it will be sold to other energy-deficient entities as a seller, which not only reduces the energy waste and high cost caused by frequent energy transaction, but also improves the self-sufficiency level of regional energy, and reduces the redundancy of energy data. Taking IEEE 33-bus system as an example, the validity of the proposed resource allocation model is verified.

Key words: blockchain technology; multi-energy entity; energy transaction; resource allocation; energy storage optimization

附录 A：变量更新算法 A

```
if 图 2 中的条件①成立 then
     $L_{\text{el}} \leftarrow L_{\text{el}} + l$ 
     $C_{\text{et}} \leftarrow C_{\text{et}} + cE_{P_m, P_n}^t d_{P_m, P_n}$ 
     $W \leftarrow W$ 
else if 条件②成立 then
     $L_{\text{el}} \leftarrow L_{\text{el}}$ 
     $C_{\text{et}} \leftarrow C_{\text{et}}$ 
     $\sigma = [0.1 + \beta \log_{N_{P_i}} N_d / (1 + \log_{N_{P_i}} N_d)]$ 
     $W \leftarrow W + \sigma E_{P_i}^r(t)$ 
else
     $L_{\text{el}} \leftarrow L_{\text{el}} + \sum A_{\text{arr}}[0]$ 
     $C_{\text{et}} \leftarrow C_{\text{et}} + \sum A_{\text{arr}}[1]$ 
     $W \leftarrow W$ 
end if
```

返回 L_{el} 、 C_{et} 、 W 的值。

附录 B：购能流程 B

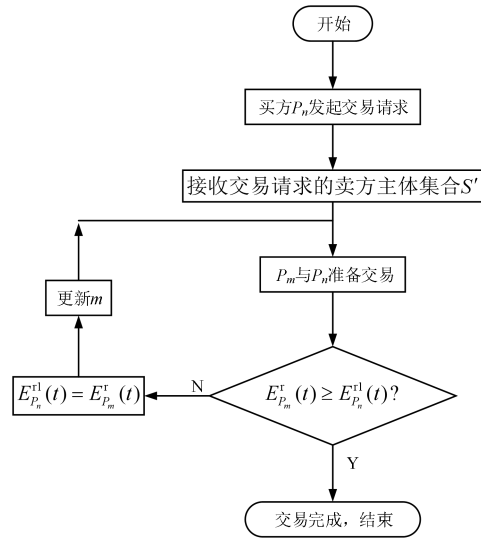


图 B1 买方购能流程 B

Fig.B1 Energy purchasing process B of buyers

附录 C：变量更新算法 C

$N_{\text{sp}} - = 1$

if 所有主体请求执行完毕($N_{\text{sp}} == 0$) then

$$\theta' \leftarrow \theta' + \varepsilon(E_{\text{s,max}} - \theta)$$

$$N_{\text{sp}} \leftarrow \prod S_{\text{size}}(\cdot)$$

else if 图 2 中的条件①成立 then

$$E_{P_m}^{\text{S}}(t+1) \leftarrow E_{P_m}^{\text{r}}(t) - \sum E_{P_m, P_n}^t$$

else if 条件②成立 then

$$E_{P_m}^{\text{S}}(t+1) \leftarrow E_{P_m}^{\text{r}}(t)$$

end