

基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制

陈冠廷, 张利, 刘宁宁, 李孟伟, 杨明

(山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要:居民用户是潜力可观的需求响应资源,其参与电力市场可带来显著的安全、经济效益,也将大幅提升分布式能源的消纳能力。针对目前存在的居民用户参与市场渠道不畅、机制缺乏的问题,构建了以能源服务公司代理居民用户参与实时电力市场为基础,面向居民用户开展需求响应的交易机制。能源服务公司以最大化需求响应效益为目标,组织居民用户就可提供响应量、期望补偿电价进行投标与竞价,其中补偿电价设计构成对居民用户的激励机制,同时保证金设计形成投标响应量兑现的保障机制,产生制衡负荷调控效果与保证用电自主权的作用。基于区块链技术,借助以太坊 Rinkeby 网络实现所提交易机制的支持系统。仿真结果证实了所提交易机制的可行性,同时表明区块链技术为解决居民用户需求响应问题提供了很好的实现途径。

关键词:居民用户;能源服务公司;需求响应;交易机制;区块链

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008024

0 引言

近年来,居民用户在电力需求响应方面的巨大潜力日益受到关注^[1]。居民用户的用电灵活性强、自主性大、负荷调节成本低,是优质的需求响应资源^[2]。在分时电价下或参与实时市场时,居民用户将有机会通过需求响应改善自身的经济效益^[3],同时将有助于提升电网的安全运行水平及分布式能源的消纳能力^[4]。针对居民用户的需求响应项目已受到业界关注,如:为了应对降温负荷,江西电网计划向10万居民用户发出邀约,将其纳入电力需求响应范围^[5];"十四五"电力规划也已将居民用户纳入考虑^[6]。因此,如何开展居民用户的需求响应已成为亟待解决的问题。

降低用电成本是吸引居民用户参与需求响应的首要动机,文献[7]以此为目标优化分时电价下家用电动汽车充放电管理,可达到极大降低家庭负荷峰均比的效果。随着可再生能源的发展,特别是家庭屋顶式光伏的普及,居民用户需求响应的潜力增强,文献[8]探讨了能源服务公司(ESC)为此类小体量用户参与市场需求响应提供交易渠道的可行性。通信技术的进步和智能电网的发展为大量居民用户参与需求响应提供了必要的支持条件^[9]。与工商业用户不同,居民用户在参与需求响应时有其特殊性,文献[10]在家庭温控负荷优化调度中关注到用户对约束违背容忍度与用户多样化舒适区间的均衡考虑;文献[11]提出一种考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模方法,为参与需求响应的居民用户提供画像描述。

上述研究更多地关注居民需求响应的效益、潜力以及各种影响因素,但居民用户参与市场交易的

渠道尚不通畅,如何合理激励居民用户参与需求响应的问题尚未得到有效解决。对此,关于含分布式电源的配电网及微电网的相关研究能提供一些很好的启发。文献[12]提出了一种去中心化的配电网运行模式和方法,采用VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖规则组织配电网中的产消者进行实时交易,由周边产消者协助维持配电网的供求动态平衡;文献[13]提出了一种点对点(P2P)交互式微电网的模型,实现了分散方式的能源交易;文献[14]探讨了激励策略和博弈方法等在分散交易中发挥的作用。

ESC是为各类用户提供能源服务的公司,其通过优化资源配置为用户降低能源成本,并与用户共享收益^[15]。在“放开两头,管住中间”的电力体制改革中,ESC发挥居民用户参与市场桥梁作用的优越性逐渐显现。其代理大量专业知识薄弱、体量小的居民用户与市场交互,与用户分享交易收益的经营模式可积极推进配电网的侧市场化。基于此,本文提出了一种ESC代理居民用户参与实时电力市场,通过调整负荷申报量在恰当的交易时机赚取经济收益,并同时面向居民用户开展分散式需求响应的交易机制。该机制设计了投标、竞价、交割、结算、核验5个环节,在激励居民用户参与需求响应的同时,平衡了负荷调控效果与用户用电的自主权。

居民用户需求响应具有数量多、自主性强、隐私性高的特点,这对交易机制技术支持系统的实现提出了较高的要求。区块链技术由于具有去中心化、账户信息加密性强、节点行为追溯性好等特点^[16],在解决此类问题上取得了较好的应用效果。文献[17]考虑到直接控制机制往往不能满足空调用户对用电自主性的要求,提出了一种以分配用电权的方式协调居民用户进行空调负荷调整的机制,并基于区块链技术实现用电权拍卖。由区块链的特点及成功应

用案例可知,区块链的智能合约技术可在简化居民用户参与市场步骤的同时,支持交易过程去中心化,满足用户自主决策的需求;区块链的挖矿技术可实现交易流程的公开透明;区块链的账户信息保密技术可保证居民用户的隐私权。

由此,本文通过 ESC 和居民用户作为以太坊(Ethereum)节点调用区块链智能合约的方式实现了交易机制的各个阶段。最后,在 Ethereum 区块链 Rinkeby 测试网络中部署智能合约模拟整个过程,测试结果证实了所提交易机制的可行性和有效性。

1 面向居民用户的需求响应交易机制

1.1 开展居民用户需求响应的难点

电网对居民用户通过市场参与需求响应以提升能源消纳能力的期望日益迫切,居民用户也有机会从中获得经济收益,但目前居民用户参与市场交易仍存在以下难点。

(1)居民用户因体量小不能直接参与电力市场。电网对电力市场参与者设有准入门槛,虽然近年来市场门槛有所降低,但对于居民家庭这样的小体量用户直接参与市场还有很大距离,短期内无法实现。

(2)原有的统一电价不具有激励响应作用。现行的居民电价的收费标准相对固定,难以激发居民用户参与需求响应的积极性。居民根据实时电价调整用电量,虽可获取一定的经济收益,但要求参与市场响应的居民用户需掌握一定的电力知识,并要实时关注电价走向,这对于普通居民用户有很大的难度。

(3)居民用户有数量众多、自主响应的特点,难以与电网调控负荷的总体目标保持一致。居民用户的特点决定了其需求响应有很大的自主性,如何组织大数量的居民用户主动参与需求响应且保证负荷控制效果是开展居民用户需求响应的难点。

1.2 面向用户的需求响应交易机制

考虑目前开展居民用户参与需求响应存在的难点,交易机制的设计应实现以下目标:

(1)应有相关代理者对居民用户的需求响应进行组织,聚合为达到准入门槛的体量后参与市场;

(2)应简化居民用户的参与流程,并保证居民用户在是否参与、何时参与需求响应方面的自主性;

(3)应建立激励制度鼓励居民用户参与需求响应及对不履约用户的惩罚制度,以保证负荷控制效果;

(4)当居民用户参与需求响应的意愿强烈时,应以社会总效益最优为目标,通过竞争确定居民用户的参与优先级。

为了实现上述目标,由 ESC 代理大量居民用户参与实时市场是一种可行的方式,需建立 ESC 面向居民用户的需求响应交易机制。假设 ESC 与居民用户签订售电服务合同,以统一电价为居民用户供电,

但 ESC 有权根据实时市场电价情况设定若干个需求响应时段(每个需求响应时段的时长为 10 min),组织居民用户自愿提交在未来某时段内可响应负荷量和期望补偿价格的投标,并在每个需求响应时段通过竞价确定需求响应量。

面向居民用户的需求响应交易机制见图 1。

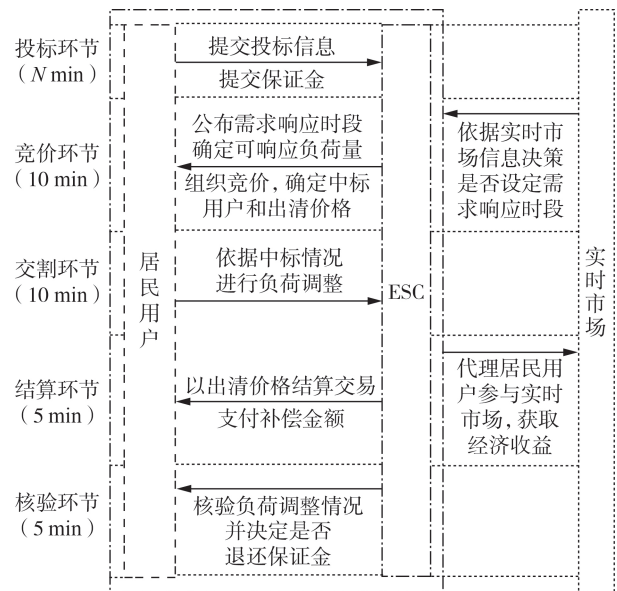


图1 面向居民用户的需求响应交易机制

Fig.1 Demand response trading mechanism for residential users

(1) 投标环节。

居民用户可在交易开放的任意时刻向 ESC 提交未来交易时段内可响应的负荷量和期望的补偿价格,并根据规则同步提交保证金。

(2) 竞价环节。

当 ESC 根据实时市场情况确定需求响应时段后,在该时段开始前 10 min 向居民用户公布该需求响应时段区间,并在该 10 min 内闭锁用户投标,即该 10 min 内所有接受到的投标信息不可参与该时段的竞价。

需求响应时段开始前 5 min, ESC 针对该需求响应时段内居民用户的有效投标进行竞价,确定响应量和补偿价格。

(3) 交割环节。

在需求响应时段内,已中标的用户按中标量进行负荷调整,未中标的用户则可自行安排用电。ESC 通过家庭智能电表采集居民用户在需求响应时段的负荷增减行为。

(4) 结算环节。

对于中标的用户而言,以出清价格对其中标的可响应量进行结算,并支付补偿金额给中标用户。

(5) 核验环节。

对于未中标的居民用户而言,直接退还其保证

金。对于中标的居民用户而言,根据智能电表数据确定其实际调整的负荷量,若完成中标响应量,则判定为“已履约”并退还保证金;若未完成中标响应量,则判定为“未履约”并扣除保证金。

由ESC进行代理的模式为小体量的居民用户提供了参与市场的渠道。交易机制的投标环节和交割环节保证了居民用户的用电自主权,并提升了参与交易的便捷性,使居民用户在参与交易的时间和频率上具有很大的自由度;竞价环节和校验环节保证了ESC对需求响应的负荷控制效果;结算环节通过经济补偿手段激励居民用户参与需求响应。

在上述交易机制的基本框架下,若考虑居民用户因设备波动可能产生的“未履约”情况,可通过比较一个由用户投标补偿电价、用户信用积分加权平均得出的综合性指标来进行竞标,以优化信用管理。不失一般性,本文不再详述该方面的实现方式。

1.3 机制优势

相比于现行的市场交易机制^[18],本文设计的面向居民用户需求响应的交易机制具有以下优势。

(1)准入优势。电力批发市场有很高的准入门槛,即使配电零售市场也有一定的准入门槛,普通居民用户无法参与,本文所提需求响应交易机制可通过ESC的代理调动居民用户群体中数量可观的潜在响应资源。

(2)去中心化优势。ESC在交易网络中也只是普通节点,一旦ESC完成智能合约部署,整个交易就变为去中心化交易,其对交易过程的影响甚至小于某些报价低、电量大的居民用户。而目前市场机制中的交易平台必须是交易中心,是完全的中心化交易。

(3)便捷优势。在现行电力市场交易机制中,即使取消市场准入门槛,居民用户也需了解电力知识、摸清市场规律并实时关注交易,才能从中获益。ESC代理的交易机制在一定程度上将居民用户从判断实时市场形势、与市场交互等复杂流程中解脱,使居民用户能方便地参与市场,响应积极性强。

2 交易机制中的竞价模型

本文以最大化ESC与居民用户的需求响应效益为目标构建竞价模型。

2.1 目标函数

需求响应交易竞价模型的目标函数可表示为:

$$\max \{ R^{\text{HU}} + R^{\text{ESC}} \} \quad (1)$$

其中, R^{HU} 为交易前后居民用户的收益增量,与调整负荷收益和不舒适度成本(居民用户因调整负荷而产生不舒适度的经济量化)相关,如式(2)所示; R^{ESC} 为交易前后ESC的收益增量,与中标补偿电价和中标电量相关,如式(5)所示。

$$R^{\text{HU}} = R^{\text{income}} - C^{\text{discomfort}} \quad (2)$$

$$R^{\text{income}} = (E_r + \Delta E_c) \Delta p_r \Delta t \quad (3)$$

$$C^{\text{discomfort}} = \omega (\Delta p_r)^2 \Delta t \quad (4)$$

$$R^{\text{ESC}} = \left(|E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}}| - E_r \right) \Delta p_r \Delta t \quad (5)$$

其中, R^{income} 为居民用户因调整负荷获得的经济收益; $C^{\text{discomfort}}$ 为居民用户的不舒适度成本; E_r 为居民用户的中标补偿电价; ΔE_c 为居民用户调整负荷前后单位电量的成本变化; Δp_r 为居民用户实际响应负荷量的绝对值; Δt 为响应时间; ω 为居民用户对调整负荷所产生舒适条件变化的敏感系数; E_{RT} 为实时电价; E_{CT} 为ESC对居民用户的销售电价。

将式(2)~(5)代入式(1),可得目标函数为:

$$\max \left\{ -\omega (\Delta p_r)^2 \Delta t + \left(\Delta E_c + |E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}}| \right) \Delta p_r \Delta t \right\} \quad (6)$$

其中, ω 、 Δt 、 E_{RT} 、 E_{CT} 均为常数,当居民用户进行负荷转移响应时有 $\Delta E_c = 0$,当居民用户进行负荷调整响应时有 $\Delta E_c = E_{\text{CT}}$,目标函数的决策变量为 Δp_r 。

2.2 约束条件

竞价模型需要满足的约束条件包括以下2类。

(1)经济约束,即收益不等式约束。需求响应交易前后,要保证居民用户和ESC的收益不为负,即:

$$R^{\text{HU}} \geq 0 \quad (7)$$

$$R^{\text{ESC}} \geq 0 \quad (8)$$

(2)物理约束,即可响应负荷量约束。

a. 居民用户可响应负荷量不应超过其负荷总量,即:

$$0 \leq \Delta p_c^{\text{HU}} \leq \sum_{i=1}^{N_1} p_i^{\text{total}} \quad (9)$$

其中, Δp_c^{HU} 为居民用户可响应负荷量; $p_i^{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N_1} p_i^{\text{total}}$ 为居民用户的负荷总量, p_i^{total} 为与ESC签订服务合同的居民用户 i 的负荷总量, N_1 为与ESC签订合同的居民用户总数。

b. ESC的可响应负荷量不可超过该时段内投标用户的投标负荷总量,即:

$$0 \leq \Delta p_c^{\text{ESC}} \leq \sum_{i=1}^M \Delta p_i^{\text{bid}} \quad (10)$$

其中, Δp_c^{ESC} 为ESC的可响应负荷量; $\Delta p_i^{\text{bid}} = \sum_{i=1}^M \Delta p_i^{\text{bid}}$ 为该时段内居民用户的投标负荷总量, Δp_i^{bid} 为居民用户 i 的投标负荷量, M 为投标的居民用户总数。

c. 基于交易机制设计,ESC的可响应负荷量应与居民用户中标负荷量相等,即:

$$\Delta p_c^{\text{ESC}} = \sum_{i=1}^T \Delta p_i^{\text{win}} \quad (11)$$

其中, $\Delta p_i^{\text{win}} = \sum_{i=1}^T \Delta p_i^{\text{win}}$ 为该时段内居民用户的中标负荷总量, Δp_i^{win} 为居民用户 i 的中标负荷量, T 为中标的居民用户总数。对于中标的居民用户而言,有

$$\Delta p_i^{\text{win}} = \Delta p_i^{\text{bid}}.$$

2.3 竞价决策

交易机制中,居民用户的实际响应负荷量 Δp_i 应与ESC的可响应负荷量 Δp_c^{ESC} 保持一致,当将居民用户的不舒适度成本与调整负荷量之间的关系设定为二次函数时,目标函数为决策变量 Δp_i 的二次函数。 Δp_i 为连续变量,故可对目标函数进行分段线性化,采用线性规划方式进行优化求解。采用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件进行推导,得到ESC在几种情况下的竞价决策如表1所示。

表1 ESC的竞价决策

Table 1 Bidding decision of ESC

Δp^{bid} 的取值范围	是否设定为需求响应时段	Δp_c^{ESC} 的取值
$\Delta p^{\text{bid}} = 0$	否	0
$0 < \Delta p^{\text{bid}} \leq \frac{\Delta E_c + E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}} }{2\omega}$	是	Δp^{bid}
$\Delta p^{\text{bid}} > \frac{\Delta E_c + E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}} }{2\omega}$	是	$\frac{\Delta E_c + E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}} }{2\omega}$

可知,社会总效益与ESC的可响应负荷量 Δp_c^{ESC} 的关系如图2所示(图中社会总效益的单位为元, Δp_c^{ESC} 的单位为kW)。在竞价决策中,当居民用户投标负荷量 $\Delta p^{\text{bid}} \leq (\Delta E_c + |E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}}|)/(2\omega)$ 时,需求响应处于供不应求的市场状态,此时社会总效益随着响应负荷量的增大而增大,ESC决策的可响应负荷量应使所有投标用户中标,以使社会总效益达到最高;当居民用户参与需求响应的积极性高时投标负荷量 $\Delta p^{\text{bid}} > (\Delta E_c + |E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}}|)/(2\omega)$ 时,需求响应处于供过于求的市场状态,ESC应决策响应负荷量 $\Delta p_c^{\text{ESC}} = (\Delta E_c + |E_{\text{RT}} - E_{\text{CT}}|)/(2\omega)$,这样虽然无法使全部用户参与响应,但可使社会总效益达到最高。

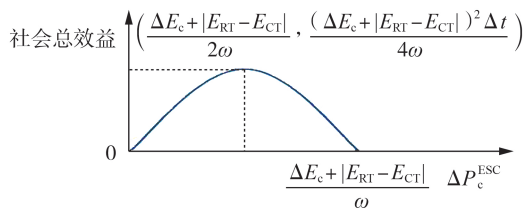


图2 社会总效益变化曲线

Fig.2 Change curve of total social benefits

需说明的是,模型结果是将居民用户的不舒适度成本与调整负荷量的关系设定为二次函数进行竞价决策得到的,若更加细化地设定二者间的关系,则决策结果还将与敏感系数 ω 等参数有关。

3 基于区块链的交易机制实现方法

3.1 基于区块链的交易机制框架

基于区块链的交易机制运行框架见图3,居民用

户和ESC同时作为Ethereum节点与智能合约交互。

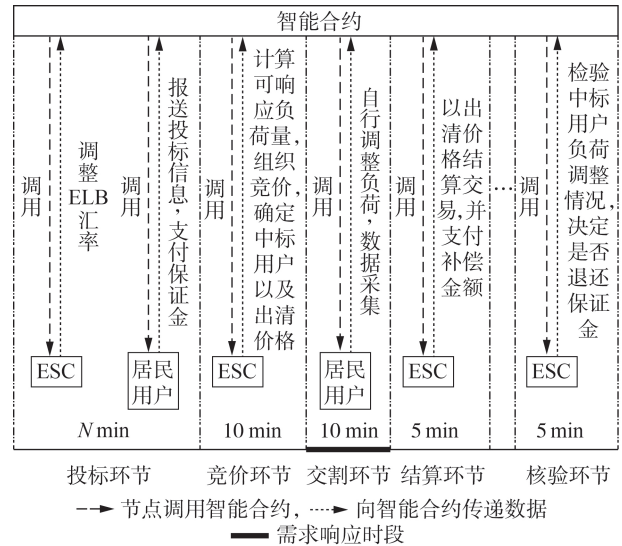


图3 交易机制的运行框架

Fig.3 Operation framework of trading mechanism

3.2 框架组成部分

(1)交易货币。

为了解决以太坊(ETH)汇率波动问题,本文使用solidity智能合约语言openzeppelin第三方库中的token代币函数,建立电力专属代币(ELB)进行交易,每日交易开始前,ESC只需根据ETH对人民币的汇率修改人民币对ELB的汇率(通过set函数传入汇率参数),即可保证每日交易结算不受汇率波动影响。

(2)智能合约。

整个智能合约调用solidity语言openzeppelin第三方库中的Ownable函数,保证ESC和用户只有权利调用自身权限范围内的函数,ESC可调用ELB函数、计算(Calculate)函数、排序(Sort)函数、竞价(Bid)函数、结算(Settle)函数、核验(Check)函数;用户可调用报价(Quote)函数、保证金支付(Margin)函数、报送(Report)函数。交易机制流程图见附录中图A1。各环节的函数介绍具体如下。

a. 投标环节。

①ELB函数:ESC借助token代币函数在每天的00:00时刻根据ETH对人民币的汇率修改token货币对ETH的汇率。

②Quote函数:居民用户可在一天内的任意时刻调用Quote函数向ESC提交未来某时段内可响应的负荷量和期待的补偿价格。

③Margin函数:居民用户可调用Margin函数根据想要参与需求响应的电器的额定功率等数据计算提交保证金。

b. 竞价环节。

④Calculate函数:ESC调用Calculate函数根据居民用户的投标情况计算可响应负荷量。

⑤Sort 函数:ESC 可调用 Sort 函数在交易阶段对用户的投标信息进行排序以供出清操作。

⑥Bid 函数:ESC 调用 Bid 函数根据可响应负荷量划定中标用户和出清价格。

c. 交割环节。

⑦Report 函数:中标用户在需求响应时段自行根据中标量调整负荷,智能电表采集用户的用电情况,调用 Report 函数向智能合约报送中标用户交割环节负荷与竞价环节负荷的调整量。

d. 结算环节。

⑧Settle 函数:ESC 调用 Settle 函数以出清价格结算交易,支付补偿金额给中标用户。

e. 核验环节。

⑨Check 函数:ESC 调用 Check 函数核验中标用户的实际用电情况,对于中标且正常履约或未中标的居民用户,返回布尔值 true,并退还保证金;对于未履约的居民用户,返回布尔值 false,并扣除保证金。

(3)钱包账户。

居民用户可通过多种 Ethereum 钱包应用进行交易,包括 Ethereum 官方客户端的 Mist 钱包、基于网页的轻钱包 MyEtherWallet、基于浏览器的 Metamask 钱包等,用户注册钱包账户后将拥有唯一的钱包地址,将其作为节点参与交易。

(4)信息记录。

Ethereum 区块链中信息记录以挖矿的方式完成,矿工可以是网络中的任意节点,其组成了区块链网络系统。当区块内的信息被多数交易参与者认可时,才会被存入共享链中。矿工们通过求解一道数学难题来争夺最终的记账权,成功求解的矿工将获得奖励。

本文交易机制中的挖矿流程如图4所示。区块链挖矿技术的引入使居民用户和ESC的交易行为公开,且提供了不可磨灭和透明的动作记录。矿工挖矿信息均由居民用户和ESC的主动行为产生,对用户身份资料有很强的保密性,这保证了居民用户的用电自主权和隐私性。

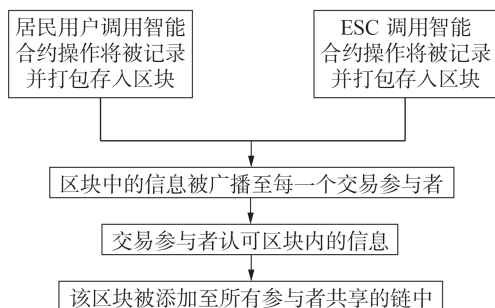


图4 交易过程的信息记录

Fig.4 Information recording in transaction process

3.3 区块链技术在交易机制中的体现

(1)区块链去中心化技术在交易机制中的体现。

在ESC部署智能合约后,其与居民用户均为区块链中的普通节点,不可控制交易过程且受全体用户监督。无法在非公开条件下修改智能合约最大限度地削弱了ESC的权限,保证了交易过程的全监督性和去中心化。

(2)区块链挖矿技术在交易机制中的体现。

居民用户对交易过程透明性、公开性的需求通过区块链挖矿技术得到了很好地实现。挖矿本质上是一种监督性行为,区块链平台保证了在全自动的交易机制“车间”入口处放置“摄像头”(节点行为记录),人员的进出和操作会被全程“录像”并上传至网内所有节点(挖矿),这种方式保证了机制的透明性和公开性。

(3)区块链加密技术在交易机制中的体现。

需求响应交易涉及居民用户家庭的用电行为,交易过程需具备一定的隐私性。区块链技术具有的对称、非对称等加密功能^[19]使居民用户的身份信息和交易信息得到了较好的保护。

综上所述,区块链技术本身所具有的兼顾交易过程透明性、用户隐私保护性的特征在解决居民用户需求响应交易过程中存在的问题发挥了很好的优势。

4 算例仿真

4.1 仿真场景

本文的仿真场景设定为冬季济南市某ESC与10个居民用户签订了2020年全年的电力服务合同,按照合同ESC向用户供电的电价为0.52元/(kW·h)。2020年2月1日19:00—19:30的实时市场电价为0.5769元/(kW·h)。ESC在19:00时刻做出如下决策:将设定19:15—19:25为需求响应时段。本文的仿真场景中居民用户的需求响应方式为可转移负荷,居民用户用电的刚需性强,可中断负荷难以准确反映居民用户的实际用电需求。相较而言,可转移负荷更贴合实际情况居民用户可能的需求响应行为。2种负荷的模拟只涉及常量 ΔE_c 的数值变化,重复性高,目前对于可转移负荷的处理方式也可延伸至可中断负荷的模拟中,故本文算例不再赘述对可中断负荷的模拟,仿真程序框架见附录中图A2。

在2月1日的00:00时刻,ESC已依据2020年2月1日的ETH对人民币的汇率1 ETH=1411元,设置ETH对ELB的汇率为1 ETH=1.411×10⁶ ELB,固定人民币对ELB的汇率为1元=1000 ELB,交易中使用ELB进行竞价和结算。

ESC和居民用户均使用Metamask钱包,并在Rinkeby测试网络上进行模拟,算例中符合约束条件的投标用户的综合调负荷敏感系数 $\omega=1.005$ 。投标

信息、核验阶段居民用户的实际负荷差均由 python 随机数函数生成,将负荷偏差为 5% 以上的居民用户判定为“未履约”。逆需求投标、不履约的概率值均设定为 15%,用于模拟现实交易中的居民用户行为。

4.2 仿真过程

(1) 投标环节(2020年2月1日 00:00—19:05)。

10个居民用户在当日的投标情况如表2所示。

(2) 竞价环节(2020年2月1日 19:05—19:15)。

ESC 根据 2.3 节中的优化决策计算公布 19:15—19:25 为需求响应时段,期望响应负荷量为 28.3 kW。10个居民用户中用户 B 的投标信息为增负荷,用户 E、I 的投标时段不在该需求响应时段中,因此他们不参与此次竞标。

ESC 为投标用户排序,结果如图 5 所示。按照期望响应负荷量 28.3 kW 组织竞标,并确定出清价格为 50 ELB/(kW·h) 和中标用户(居民用户 F(1) 和 G 的投标补偿电价相同,根据投标时刻的先后顺序确定他们的优先级)。

(3) 交割环节(2020年2月1日 19:15—19:25)。

中标用户调节负荷量并报送负荷调整量数据。

(4) 结算环节(2020年2月1日 19:25—19:30)。

ESC 以出清价格 50 ELB/(kW·h) 结算交易,并支付中标用户补偿金额。

(5) 核验环节(2020年2月1日 23:55—24:00)。

ESC 对居民用户的实际负荷调整量进行核验,以此为依据退还或扣除保证金。

4.3 仿真分析

居民用户的资金结算结果如表 3 所示,中标且履约的居民用户相较于交易前增加了 287.65 ELB 的经济收益,ESC 相较于交易前减少了 195.27 ELB 的经济损失,未履约的居民用户则受到了 245 ELB 的经济惩罚。ESC 和居民用户的经济损益结果见图 6。

每一个中标居民用户和 ESC 在交易前、后的经济变化如图 7 所示。可见,此次能源交易实现了 ESC 服务侧与居民用户需求侧的帕累托改进,使

ESC 的经济损失减少,居民用户的经济收益增加。既通过经济收益激励了居民用户参与需求响应,也通过经济惩罚的手段保证了 ESC 对需求响应的负荷控制效果。

算例结果表明,交易机制简化了居民用户参与需求响应的流程,居民用户只需在任意时刻进行投标信息报送即可参与交易,结算与核验由智能合约自动完成,不需要居民用户进行任何操作,为居民用户提供了方便快捷的交易参与方式。居民用户虽未直接参与市场,却与 ESC 共享参与市场的收益,中标

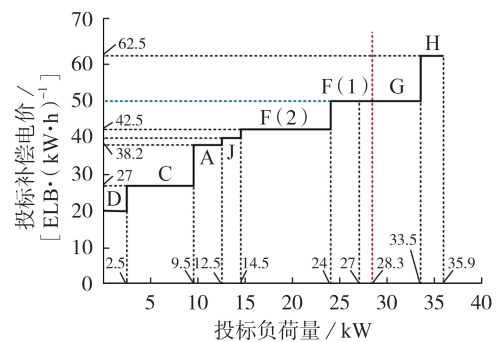


图5 居民用户阶梯型竞标数据

Fig.5 Ladder bidding data of residential users

表3 2020年2月1日居民用户的资金结算结果

Table 3 Capital settlement results of residential users on February 1, 2020

居民用户	中标负荷量/kW	实际响应负荷量/kW	是否履约	退还保证金/ELB	用户总收益/ELB
A	-3.0	-3.1	是	450	35.4
B	0	0.3	是	360	0
C	-7.0	-7.2	是	1200	161
D	-2.5	-2.1	否	0	-245
E	0	-0.22	是	730	0
F(1)	-3.0	-2.93	是	650	0
F(2)	-9.5	-9.56	是	1000	71.25
G	-1.3	-1.31	是	800	0
H	0	-0.2	是	420	0
I	0	-0.09	是	600	0
J	-2.0	-2.1	是	230	20

表2 2020年2月1日居民用户的投标情况

Table 2 Bidding status of residential users on February 1, 2020

居民用户	投标电器的额定功率/kW	保证金/ELB	投标时段	投标补偿电价/[ELB·(kW·h) ⁻¹]	投标负荷量/kW	投标时刻
A	4.5	450	19:10—21:00	38.2	-3.0	07:50
B	3.6	360	19:00—19:25	46.0	2.0	07:59
C	12.0	1200	18:15—19:50	27.0	-7.0	09:20
D	3.2	320	17:15—19:25	20.0	-2.5	10:22
E	7.3	730	19:35—20:00	33.5	-5.5	10:48
F(1)	6.5	650	19:00—19:40	50.0	-3.0	11:20
G	8.0	800	19:15—19:30	50.0	-6.5	14:02
H	4.2	420	16:00—21:00	62.5	-2.4	15:34
I	6.0	600	17:30—18:00	25.5	-4.5	17:29
J	2.3	230	19:15—19:25	40.0	-2.0	18:47
F(2)	10.0	1000	19:00—20:40	42.5	-9.5	18:58

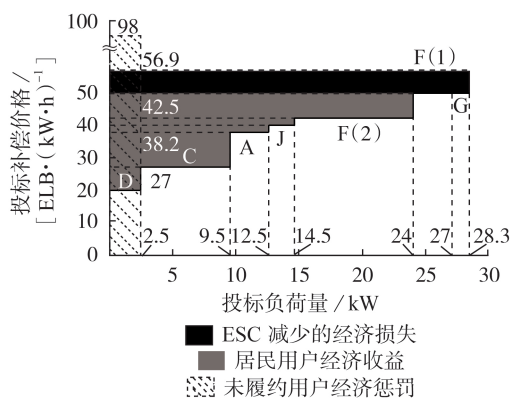


图6 ESC和用户的经济损益

Fig.6 Economic profit and loss of ESC and users

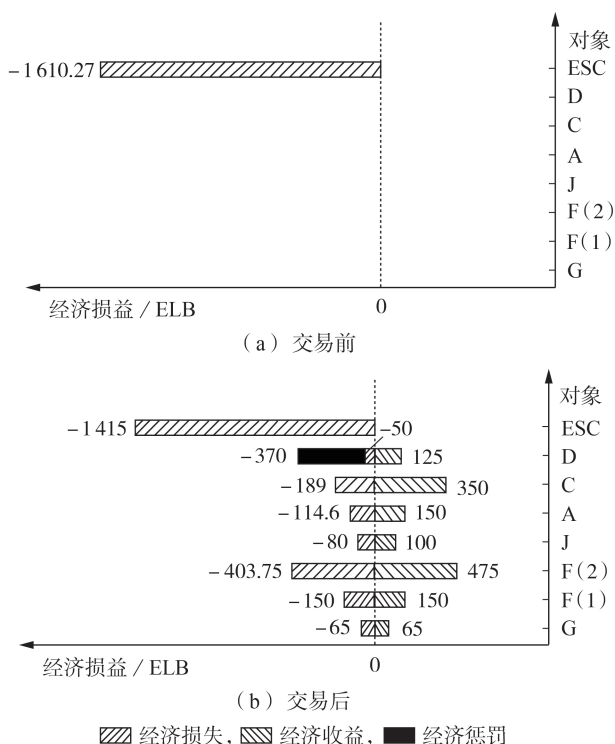


图7 交易前、后ESC和用户的经济损益

Fig.7 Economic profit and loss of ESC and users before and after transaction

且履约的居民用户在交易中获得了单位合同电价9.62%的经济补偿,这将进一步激励居民用户参与需求响应。交易机制在保证居民用户的用电自主权和交易灵活性的基础上,激励了其自觉响应ESC提出的负荷期望,既增强了ESC对需求响应的负荷控制效果,也实现了服务侧和需求侧的经济双赢。ESC和居民用户只需根据决策调用智能合约函数参与交易,每个参与者的执行情况将被矿工记录并存入区块,这保证了交易机制的透明性、安全性和公平性。

5 结论

本文依托区块链技术,设计了面向居民用户需求响应的交易机制。算例仿真结果表明,该机制有

如下优势:

(1)ESC代替居民用户参与市场的方式为体量小的居民用户参与需求响应提供了渠道;

(2)交易机制的设计和区块链智能合约技术简化了居民用户参与交易的流程;

(3)居民用户自主投标、自行调整负荷量保证了其用电自主权;

(4)负荷校核可保证ESC对需求响应的负荷控制效果;

(5)ESC可响应负荷量的确定实现了服务侧和需求侧的帕累托改进,经济收益将激励居民用户主动参与需求响应;

(6)区块链挖矿技术保证了整个交易机制的透明性、安全性和公平性。

本文在基于区块链技术开展ESC面向居民用户需求响应交易方面取得了一定的进展。下一步将继续利用区块链的信息可追溯性实现对居民用户画像,在建立居民用户信用管理、细化居民用户不舒适度成本模型和投标规则设计等方面开展更深入的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):102-111. ZENG Ming,YANG Yongqi,XIANG Hongwei,et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):102-111.
- [2] 葛少云,李吉峰,刘洪,等. 考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):36-44. GE Shaoyun,LI Jifeng,LIU Hong,et al. Modelling of household energy consumption characteristics considering physical features and behavior factors[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):36-44.
- [3] RUI Wang,HUI Tang,XU Yinliang. Distributed cooperative optimal control of energy storage systems in a microgrid[C]// Power and Energy Society General Meeting. Boston,USA:IEEE,2016:1-5.
- [4] 蔡含虎,向月,杨昕然. 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):186-194. CAI Hanhu,XIANG Yue,YANG Xinran. Economic capacity allocation and benefit analysis of integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):186-194.
- [5] 彭海燕,刘向向. 江西电力将邀10万居民参与电力需求响应[EB/OL]. (2019-08-12)[2020-04-15]. <http://shupeidi-an.bjx.com.cn/html/20190812/999318.shtml>.
- [6] 国家能源局. “十四五”电力规划工作启动,重点充分调动需求侧响应资源[EB/OL]. (2020-01-15)[2020-04-15]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200115/1036743.shtml>.
- [7] DUMAN A,GULER C,DEVECI K,et al. Residential load scheduling optimization for demand-side management under time-of-use rate[C]//6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair. Istanbul,Turkey:IEEE,2018:

- 193-196.
- [8] RUZBAHANI H M, RAHIMNEJAD A, KARIMPOUR H. Smart households demand response management with micro grid [C]//Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [9] PAUL S, CHOUDHARY S, PADHY N. A review on residential area demand response analysis in smart grid era [C]//8th Power India International Conference. Kurukshetra, India: IEEE, 2018: 1-6.
- [10] 曾博, 蒋雯倩, 杨舟, 等. 基于机会约束规划的家庭用电设备负荷优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 27-33.
- ZENG Bo, JIANG Wenqian, YANG Zhou, et al. Optimal load dispatching method based on chance-constrained programming for household electrical equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 27-33.
- [11] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 36-44.
- GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Modelling of household energy consumption characteristics considering physical features and behavior factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 36-44.
- [12] 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.
- [13] SABOUNCHI M, WEI J. Towards resilient networked microgrids: blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism [C]//Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] 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.
- [15] NIETO-MARTIN J, BUNN D. Enabling automated transparency for the market participation of ESCOs with blockchain [C]//Power & Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-5.
- [16] DIARRA N. Choosing a consensus protocol for uses cases in distributed ledger technologies [C]//Sixth International Conference on Software Defined Systems. Rome, Italy: IEEE, 2019: 306-309.
- [17] 贾乾罡, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的空调负荷用电权分配: 模式与方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3393-3402.
- JIA Qiangang, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Power distribution of air conditioning load based on blockchain: mode and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3393-3402.
- [18] HOU W G, GUO L, NING Z L. Local electricity storage for blockchain-based energy trading in industrial Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3610-3619.
- [19] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
- ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.

作者简介:



陈冠廷

陈冠廷(1996—),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要研究方向为能源区块链、电力市场、电力需求响应(E-mail: chengt1996@126.com);

张利(1967—),女,江苏启东人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力市场、电力需求响应(E-mail: yzhangli@sdu.edu.cn);

刘宁宁(1985—),男,安徽萧县人,助理实验师,硕士,主要研究方向为电力市场、继电保护等(E-mail: liuningning@sdu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response

CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, LI Mengwei, YANG Ming

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Residential users are potential demand response resources and their participation in the electricity market can bring significant security and economic benefits, as well as greatly improve the absorption capacity of distributed energy. In order to solve the current problems of the poor channels and the lack of mechanisms for residential users' participation in the market, a transaction mechanism based on the residential users' participation in the real-time electricity market on behalf of energy service companies is constructed to carry out demand response for residential users. With the goal of maximizing demand response benefits, energy service companies organize residential users bid for the response load capacity and expected compensation electricity price, in which the design of compensation electricity price constitutes an incentive mechanism for residential users, while the design of security deposit forms a guarantee mechanism for the realization of bidding response capacity, which ensures the power consumption autonomy of residential users while achieving the expected load control effect. Based on blockchain technology, the support system of the above-mentioned transaction mechanism is implemented with the help of Ethereum Rinkeby network. Simulative results verify the feasibility of the proposed transaction mechanism, and show that the blockchain technology provides a good way to solve the demand response problem of residential users.

Key words: residential users; energy service company; demand response; transaction mechanism; blockchain

附录

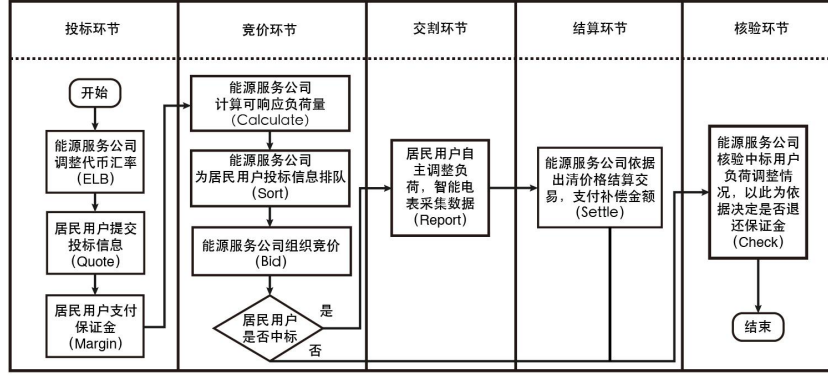


图 A1 基于 Ethereum 的交易机制流程
Fig.A1 Transaction mechanism process based on Ethereum

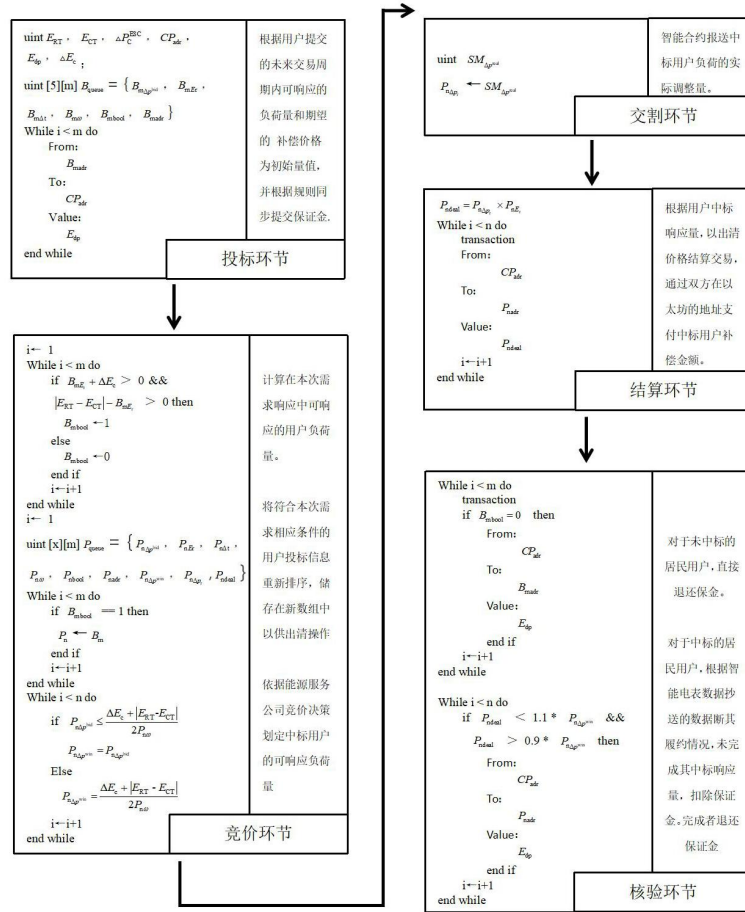


图 A2 程序框架图
Fig.A2 Program diagram