

基于区块链的空调负荷用电权分配: 模式与方法

贾乾罡, 陈思捷*, 严正, 平健

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Blockchain-enabled Power Usage Quotas Allocation Method for Air Conditioning Loads

JIA Qiangang, CHEN Sijie*, YAN Zheng, PING Jian

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),

Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: An air conditioning load is an important demand response resource, which can provide demand response capabilities driven by price signals and direct control. Existing price-driven mechanisms are often unable to accurately meet preset load reduction targets, whereas direct control mechanisms are usually unable to respect users' autonomy. A power usage quotas allocation mechanism for air conditioning loads was proposed, including four stages, i.e., submission, reduction, transaction, and settlement. It ensures user's autonomy while being able to achieve expected load reduction targets. In addition, this paper proposed a method to implement the mechanism based on blockchain, which ensures the transparency and security of the mechanism. Based on blockchain technology, the power company only needs to set the load control target rather than directly dispatching air conditioning load. Air conditioner users collectively dispatch their responsive loads on blockchain, reducing the burden of the power company. The simulation results on Ethereum private chain show the effectiveness of this mechanism.

KEY WORDS: blockchain; air conditioning load; demand response; power usage quotas

摘要: 空调负荷是一类重要的需求响应资源, 其参与需求响应的方式主要包括价格引导和直接控制两种。现有的价格引导机制通常难以精确达到预设的负荷削减目标, 而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。该文以空调负荷为主体, 引入用电权提交、削减、交易、校核机制, 在达到预期负荷削减目标的同时保障用户的用电自主权。此外, 该文提出基于区块链的上述机制实现方法, 该方法保证了机制的透明性与安全性。基于区块链技术, 电网公司无需

深入参与空调负荷管理, 只需要发布负荷控制目标, 由各空调用户在区块链上自组织需求响应, 减轻电网公司的负担。最后, 以太坊私有链测试结果证明了机制的可行性。

关键词: 区块链; 空调负荷; 需求响应; 用电权

0 引言

近年来, 空调负荷逐渐成为电力系统峰荷的重要组成部分^[1]。空调负荷季节性变化明显, 往往集中在夏季^[2]的数月时间内; 且因房屋的储热特性, 短时间关停空调或调整其设定温度不会对用户产生严重影响^[3]。因此, 空调负荷是重要的需求响应资源^[4]。空调负荷需求响应项目已在我国广泛开展, 如上海市黄浦区虚拟电厂项目^[5]; 上海市电网调度部门通过控制或引导商业建筑中包括空调在内的多种设备的用电行为, 以实现调峰效果, 参与用户由国网上海市电力公司结算经济补偿^[6]。这些项目保证了电网在负荷高峰期间的安全稳定运行。

空调负荷参与需求响应的机制主要分为价格引导型和直接控制型两类。前者利用市场电价调节用户的用电需求。文献[7]采用鲁棒优化法分析在需求响应不同时段电价具有高度相关性时, 温控负荷的用电计划; 文献[8]采用随机优化和鲁棒优化相结合的方法, 评估温控负荷在价格引导型需求响应中的管理策略; 文献[9]提出一种响应尖峰电价的温控负荷控制策略。后者以经济补偿换取电力公司对用户空调的直接控制权。文献[10]介绍一种基于直接负荷控制的空调状态排序模型; 文献[11]提出虚拟发电厂的概念, 并用直接负荷控制的手段管理大型温控负荷用户; 文献[12]提出一种分布式居民住宅负荷的直接负荷控制方案。需要指出的是, 价格引导型机制保证了用户的用电自主权, 但通常无法

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905000); 国家电网公司科技项目(SGTJDK00DWJS1800232); 国家自然科学基金项目(U1866206)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2018YFB0905000); State Grid Corporation of China Research Program (SGTJDK00DWJS1800232); National Natural Science Foundation of China (U1866206).

准确达到预期的负荷削减目标；直接控制型机制保证了负荷控制的准确性，但往往不能满足空调用户的用电自主权。

为平衡负荷控制准确性和用户用电自主性，本文提出一种基于用电权的需求响应机制。用电权(power usage quotas, PUQs)是(电力供应紧张时)用户在某时段所拥有的负荷配额。机制分为4个阶段：用电权提交阶段、削减阶段、交易阶段、校核阶段。用电权削减和校核保证了负荷控制的准确性；用电权提交和交易保证了用户的用电自主权。具体机制将在第1节论述。

由于空调用户群体数量庞大且地理位置分散，且交易过程对网络的安全性、透明性的要求很高；集中管理的方式一方面占用了电网公司的有限计算资源，另一方面不利于交易的安全透明。因此，理想的管控平台应该具备以下特性：分散自治，网络所有的参与者共同维护平台的运行；安全透明，平台能够抵御一定程度的恶意攻击并接受各方监督。以泛在电力物联网的硬件设备为基础，区块链技术有望满足以上特性。

区块链在能源网络中的研究尚在起步阶段。文献[13]结合能源互联网的若干场景给出区块链的应用案例；文献[14]提出使用区块链应对完全竞争市场下辅助服务交易的安全可信问题；文献[15]提出一种能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法；文献[16]研究一种基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系。上述文献分析了区块链技术的原理，并给出其在能源网络某些具体场景下的应用案例。但是，区块链技术在需求响应领域的应用潜力并未被深入发掘。

本文将区块链技术应用到电力需求侧的创新发展中：从用电权入手，研究区块链技术在空调负荷需求响应领域的具体应用机制。这是对中共中央总书记习近平在中共中央政治局第十八次集体学习时所强调的“把区块链作为核心技术自主创新重要突破口，加快推动区块链技术和产业创新发展”的实践探索。同时，该机制与国家电网公司“三型两网”的思想紧密契合，如图1所示。硬件层由泛在电力物联网^[17]中的物理输配电网以及量测、存储和通信设备构成；平台层包含区块链的信息网络以及数据结构；应用层包括本文提出的负荷控制机制。总的来看，硬件层为平台层提供硬件基础，并与之信息交互，平台层为应用层提供平台支撑以实

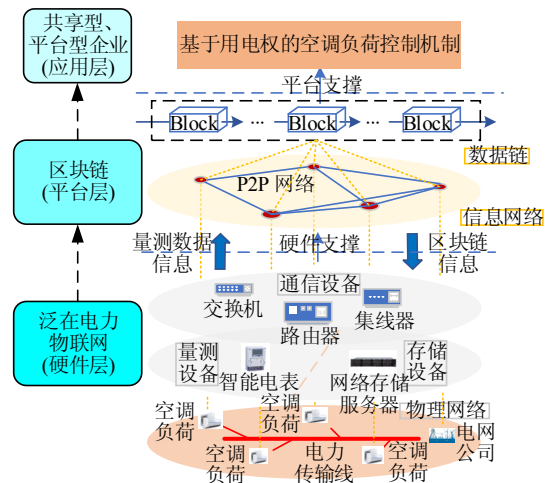


图1 区块链与“三型两网”的关系

Fig. 1 Relationship between blockchain and “3 functions and 2 networks”

现其具体功能。电网公司在区块链平台上无需深度参与空调负荷管理，只需发布控制目标，由空调用户自组织、自协调需求响应，减轻了电网公司的集中计算负担，增强了机制的安全性、透明性，是共享型、平台型电网企业的体现。

本文在以太坊区块链上部署智能合约模拟整个过程，测试结果表明了机制的可行性和有效性。

1 基于用电权的空调负荷控制机制

1.1 机制概述

电网公司与用户签订需求响应项目长期合同，补偿定价方法由电网公司和用户在合同中确定，本文不做讨论。项目期限内，电网公司有权设定若干次“需求响应时段”，用户在该时段需要按指令削减自身负荷。在每次需求响应时段，电网公司和用户按照本机制的规则实现负荷削减目标。

机制以空调用户用电权为主线，通过4个阶段实现需求响应时段的负荷削减。

1) 用电权提交阶段。

空调用户向电网公司提交本次需求响应时段的预期负荷值作为其初始用电权，并按照规则提交保证金。预期负荷值是空调用户对自身的用电成本以及温度不舒适度综合考量的结果，目的是使自身综合成本(见式(1))最低。

2) 用电权削减阶段。

① 电网公司须依据既定的用户队列顺序削减其初始用电权。项目内首次启动需求响应时段时，电网公司随机生成用户队列顺序；否则，电网公司将上次需求响应时段中被削减初始用电权的用户

移至队尾，形成本次队列顺序；

②电网公司从队列起点开始，依次削减用户的初始用电权，直至满足负荷削减目标为止。

3) 用电权交易阶段。

被削减初始用电权的用户可以作为用电权买方，未被削减初始用电权的用户可以作为用电权卖方。买卖双方根据自身综合成本，制定各自的报价，参与双向拍卖市场并结算。在双向拍卖^[18]中，买卖双方以价格优先(即卖方报价从低到高，买方报价从高到低)的原则排序。满足卖方最低报价低于买方最高报价的条件时，双方匹配出清，出清价格取二者平均值，数量取二者较小值。当最高买方报价低于最低卖方报价或其中一方队列出清完毕时，双向拍卖终止。随着泛在电力物联网的建设稳步推进，用户可以依靠先进的智能温控器^[19]实现与电网的交互，进而实现定时、多次提交用电权并竞价。

用电权交易阶段结束后，用户进入需求响应时段，用户需将自身实际负荷控制到所持用电权数额以下。

4) 用电权校核阶段。

①电网公司采集用户在需求响应时段的实际负荷数值；

②若用户实际负荷不超过其所持用电权则为“诚实”，反之则为“不诚实”；

③电网公司退还“诚实”用户的保证金，扣除“不诚实”用户的保证金。

阶段 1)、3) 保证了用户的用电自主权，阶段 2)、4) 保证了需求响应的负荷控制效果。

以 A、B、C、D、E、F 共 6 个空调用户参与的需求响应项目为例，阐述机制中各自的用电权变化情况。电网公司发布未来某需求响应时段的负荷削减目标为 8kW。各参与者自主协调过程中用电权变化情况如图 2 所示。

图 2(a)为本次需求响应时段的用户队列顺序；图 2(b)为用户提交的初始用电权；图 2(c)中用户 A、

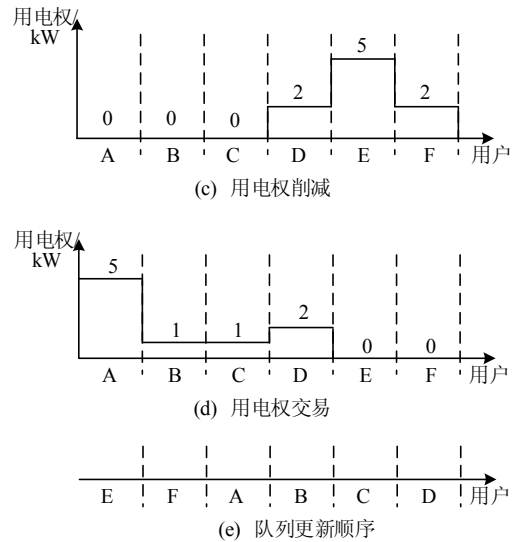
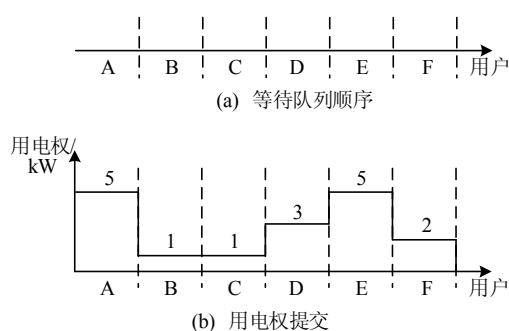


图 2 用电权变化过程

Fig. 2 Change process of users' PUQs

B、C、D 的初始用电权分别被削减 5、1、1、kW，此时负荷削减目标达成，空调群的总用电权还剩余 9kW；9kW 的用电权被市场重新分配，过程如图 3 所示，用户报价越高(越低)，其对温度舒适度的要求越高(越低)，经双向拍卖匹配出清，用电权被转移到了对温度舒适度要求更高的用户：用户 A 以 2 元/kW 的价格向用户 E 购买 5kW 用电权，用户 B、C 分别以 2.2、2 元/kW 的价格向用户 F 购买 1kW 用电权。图 3 中方向不同的阴影分别代表交易后增加的买方、卖方福利，该交易实现了用户侧的帕累托改进，交易后各用户所持用电权数量如图 2(d)所示；图 2(e)为再次更新的用户队列顺序，等待下次需求响应时段。在单个时段的负荷削减过程中，最后一个被削减的用户可能只被削减部分的用电权便被更新到队伍末端。但是由于需求响应项目中包含多轮需求响应时段，且用户队列顺序是循环更新的，从统计学的角度，每个用户有均等的概率成为每轮需求响应时段中最后一个未被完全削减用电权的用户，这保证了机制的公平性。

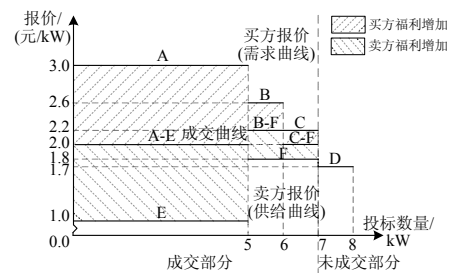


图 3 双向拍卖过程

Fig. 3 Process of double auction

1.2 用户成本模型和出价策略

对理性用户而言，初始用电权的计算以及交易中的报价策略需要数学模型作为支撑，故本文提供下列方法供用户参考。

1) 初始用电权的计算。

用户依据其成本求出用电计划。通常情况下，用户的预期负荷值将使需求响应时段内的“综合成本”达到最低。用户的综合成本由用电成本和不舒适度成本(将温度偏差带来的不舒适程度量化)两部分构成：

$$C^{total} = C^{ele} + C^{discomfort} \quad (1)$$

式中： C^{total} 为用户的综合成本； C^{ele} 为用电成本； $C^{discomfort}$ 为不舒适度成本。

用电成本为

$$C^{ele} = Ep\Delta t \quad (2)$$

式中： E 为该时段的电价； p 为该时段的负荷； Δt 为需求响应时段时长。

不舒适度成本^[20]为

$$C^{discomfort} = w(T^{set} - T^{ideal})^2 \Delta t \quad (3)$$

式中： w 为用户对温度的敏感系数； T^{set} 为空调设定温度； T^{ideal} 为用户最佳体感温度。

在考虑夏季制冷空调单元的情况下，建立房屋的能量方程^[21]。

$$T^{set} + (\alpha\beta\Delta t - 1)T^{ini} + \beta\Delta t p = \alpha\beta\Delta t T^{out} \quad (4)$$

式中： T^{ini} 为时段初的室内温度； T^{out} 为室外平均温度； α 为房屋的热弥散系数； β 为房屋热容 C 的倒数。

约束条件为

$$0 \leq p \leq p_{max} \quad (5)$$

式中 p_{max} 为空调额定功率。

将式(2)—(4)代入式(1)，得出用户的综合成本与负荷的关系：

$$C^{total} = Ep\Delta t + w[\alpha\beta\Delta t T^{out} - (\alpha\beta\Delta t - 1)T^{ini} - \beta\Delta t p - T^{ideal}]^2 \Delta t \quad (6)$$

式中 E 、 Δt 、 w 、 α 、 β 、 T^{out} 、 T^{ini} 、 T^{ideal} 均为常数，综合成本 C^{total} 和负荷 p 的二次关系如图4所示。

图中， W 为综合成本最低点，对应成本为 C_{min} ，负荷为 p_{Cmin} ，用户将提交 p_{Cmin} 作为初始用电权。

2) 报价策略。

在实际双向拍卖市场中，参与者的报价及投标

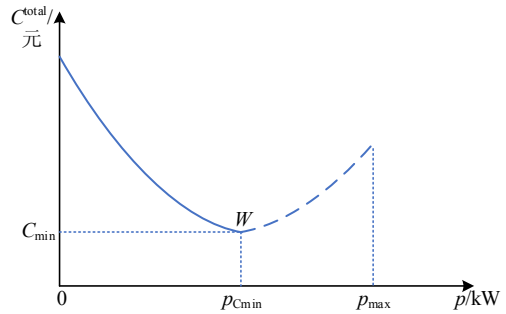


图4 用户综合成本

Fig. 4 Comprehensive cost of a user

数量不可能是连续的曲线，故只能采取分段报价的方式近似报价曲线。

如图5所示，卖方可将最低综合成本对应的用电权 p_{Cmin}^S 至 0 之间的区间分为 m (便于说明，设 $m=2$)段，每段为 Δp^S ；买方可将被削减后的用电权 p^{cut} 到最低综合成本对应的用电权 p_{Cmin}^B 之间的区间等分 n (便于说明，设 $n=3$)段，每段为 Δp^B 。得到报价策略如表1所示。

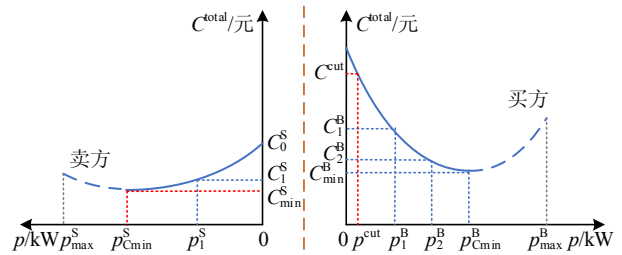


图5 分段报价曲线

Fig. 5 Segmented quotation curve

表1 用户报价策略

Tab. 1 Users' quotation strategy

用户类型	用电权区间/kW	单位报价/(元/kW)	投标数量/kW
卖方	$p_{Cmin}^S \sim p_1^S$	$> (C_1^S - C_{min}^S) / \Delta p^S$	Δp^S
	$p_1^S \sim 0$	$> (C_0^S - C_1^S) / \Delta p^S$	Δp^S
买方	$p^{cut} \sim p_1^B$	$< (C^{cut} - C_1^B) / \Delta p^B$	Δp^B
	$p_1^B \sim p_2^B$	$< (C_1^B - C_2^B) / \Delta p^B$	Δp^B
	$p_2^B \sim p_{Cmin}^B$	$< (C_2^B - C_{min}^B) / \Delta p^B$	Δp^B

需要说明的是，以上方法仅为众多计算方式的一种，用户可以自行选择初始用电权计算方式和报价策略。

2 基于区块链的空调负荷控制方法

2.1 以太坊概览

以太坊：以太坊是图灵完备的有智能合约功能的公共区块链平台，其核心是以太坊虚拟机。

1) 智能合约：智能合约是部署在以太坊虚拟机上的可以实现特定功能的程序。

2) 以太坊账户：以太坊账户分为节点所在的外部账户和智能合约所在的合约账户，智能合约不能自动执行且只能被外部账户调用。

3) 矿工：矿工可以是网络中的任意节点，他们组成了区块链网络系统。矿工负责执行^[22-24]智能合约(首先会运行和校验接收到的交易，然后在以太坊虚拟机上运行被调用的智能合约脚本)，并将信息打包进区块。同时，矿工们通过求解一道数学难题来争夺最终记账权，成功求解的矿工将获得奖励。本文中的矿工为空调用户节点，不包括电网公司节点。

4) 以太坊虚拟机：以太坊虚拟机是智能合约运行的安全环境，每个矿工都在运行以太坊虚拟机。

5) 时间戳：以太坊区块链使用时间戳(unix timestamp)表征区块产生的时序，矿工可以根据区块的时间戳信息判断其中所包含操作的时效性，不属于当前阶段的函数调用信息将不会被矿工执行。

2.2 基于以太坊区块链的机制实现

2.2.1 机制框架

图 6 中，空调用户和电网公司同时作为以太坊节点与智能合约交互：电网公司向智能合约提交负荷控制目标，空调用户向智能合约提交初始用电权信息和报价、投标信息，智能合约在不同阶段削减、交易、并校核用户用电权，节点以自组织、自协调的运行方式实现整个机制的正常运行，这减轻了电网公司的计算负担；合约调用、执行信息由矿工打包进区块，每个节点均可验证区块内的信息，将包含正确信息的区块添加至本地链，这保证了机制安全性、透明性。

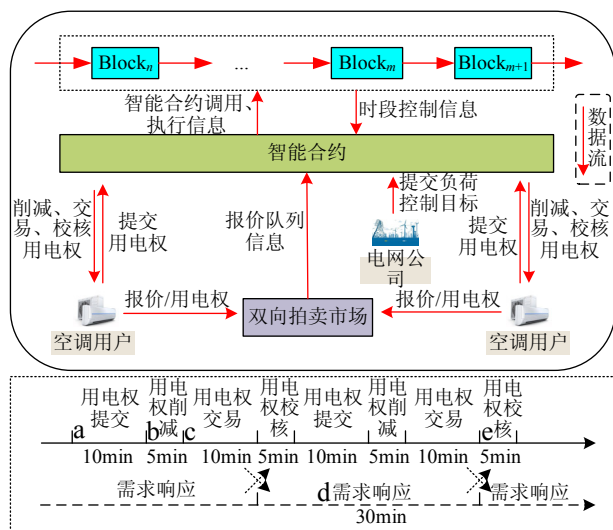


图 6 机制运行框架

Fig. 6 Structure of the mechanism

机制把全天分为 48 个时段，每个需求响应时段为 30min。用电权提交、削减、交易在该次需求响应时段之前，分别为 10、5、10min，用电权校核在该次需求响应时段之后，为 5min。由区块链的时间戳控制智能合约的调用时序。图中上下 2 个时间轴分别表示机制的各阶段及各需求响应时段，二者在时间上是统一的。例如：a、b、c、d 和 e 时段组合起来代表一轮完整的需求响应时段中的机制运行流程。

2.2.2 智能合约

智能合约分为 4 个阶段，分别由不同功能的函数构成，流程图如图 7 所示。

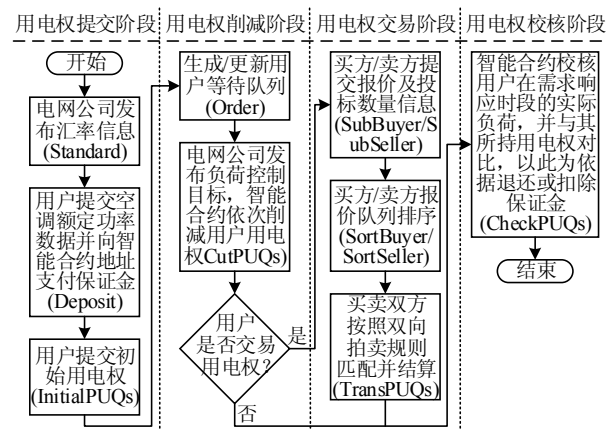


图 7 基于以太坊的需求响应机制流程图

Fig. 7 Flow chart of the demand response mechanism based on Ethereum

1) 用电权提交阶段。

① 标定函数(Standard)：由于以太坊对人民币的汇率波动很大，故本文采用 ERC20 标准自主发行 token，根据人民币对 Ether 的汇率修改 Ether 对该 token 的汇率，从而固定人民币对该 token 的汇率。电网公司调用该函数设定/修改以太坊代币(token)对人民币的汇率，这为交易结算提供了标准。标定信息由矿工打包进区块，每个参与者均可计算验证标定信息，将包含正确标定信息的区块添加至本地链。

② 保证金支付函数(Deposit)：用户调用该函数将个人信息，空调的额定功率值提交至智能合约，并向智能合约所在地址支付保证金。矿工在确认用户保证金支付结果无误后，打包信息进区块。保证金的计算方法：

$$D^{\text{deposit}} = p_{\text{max}} \cdot D \cdot \Delta t \tag{7}$$

式中： D^{deposit} 为用户需缴纳的保证金； D 为保证金

计算系数。

③用电权初始化函数(InitialPUQs): 用户计算综合成本得出最优用电计划并调用该函数, 提交初始用电权。矿工执行函数, 将用户初始用电权信息储存并打包进区块。

2) 用电权削减阶段。

④排序函数(Order): 电网公司调用该函数, 生成/更新等待队列。矿工执行函数并将队列信息存于区块。

⑤用电权削减函数(CutPUQs): 电网公司调用该函数发布预期负荷削减目标。矿工执行函数, 从用户等待队列中依次削减用电权, 直至满足负荷削减目标为止, 最后将用户更新后的用电权信息打包储存进区块。

3) 用电权交易阶段。

⑥报价函数(SubBuyer/SubSeller): 买卖双方调用该函数提交自身的分段报价和用电权投标数量信息。矿工将不同用户的报价投标信息分别加入买方、卖方队列, 并将队列信息打包进区块。

⑦买卖队列排序函数(SortBuyer/SortSeller): 电网公司调用该函数对报价队列排序。矿工执行排序函数, 将买方、卖方序列按照报价降序、升序排序, 将相同的报价按照时间先后排序, 并将排序后的队列信息打包入区块。

⑧匹配函数(TransPUQs): 电网公司调用该函数出清买卖双方队列。矿工执行函数, 将买卖双方队列按照双向拍卖规则匹配, 为成交的用户转账结算。矿工将转账信息和更新后的用户用电权数据打包进区块。流程如图8所示。

4) 用电权校核阶段。

⑨校核结算函数(CheckPUQs): 电网公司在需求响应结束后调用该函数校核空调用户行为。矿工执行函数, 对比用户在本次需求响应时段的实际负荷(由智能电表在需求响应时段监测)和所持用电权, 将“诚实”用户标记为 true, 退还保证金; “不诚实”用户标记为 false, 扣除保证金。

3 算例仿真

仿真场景设定为夏季上海市8个空调用户参与的需求响应计划, 需求响应时段为2019年8月1日晚19:00—19:30, 机制运行时间段为18:35—19:35, 预期负荷削减目标为20kW。根据2019年8月1日的以太坊对人民币的汇率1eth=1490元,

- 1: 买方序列 B^{queue} 按照报价 B_m^{price} 降序排列, B_m^{amount} 为对应投标数量, $B_m^{address}$ 为买方地址, p 为买方数, $m=1, 2, 3, \dots$
- 2: $B^{queue} = \{(B_1^{price}, B_1^{amount}, B_1^{address}), \dots, (B_p^{price}, B_p^{amount}, B_p^{address})\}$
- 3: 卖方序列 S^{queue} 按照报价 S_n^{price} 升序排列, S_n^{amount} 为对应投标数量, $S_n^{address}$ 为卖方地址, q 为卖方数, $n=1, 2, 3, \dots$
- 4: $S^{queue} = \{(S_1^{price}, S_1^{amount}, S_1^{address}), \dots, (S_q^{price}, S_q^{amount}, S_q^{address})\}$
- 5: $b \leftarrow 1, s \leftarrow 1, i \leftarrow 1$
- 6: **while** $S_s^{price} \leq B_b^{price} \ \& \ b \leq p \ \& \ s \leq q$ **do**
- 7: 成交价格: $C_i^{price} = (B_b^{price} + S_s^{price})/2$
- 8: 成交数量: $C_i^{amount} = \min(B_b^{amount}, S_s^{amount})$
- 9: 买方地址: $B_i^{deal} = B_b^{address}$
- 10: 卖方地址: $S_i^{deal} = S_s^{address}$
- 11: 转账金额: $M_i^{Deal} = C_i^{amount} \times C_i^{price}$
- 12: 更新买方投标数量: $B_b^{amount} = B_b^{amount} - C_i^{amount}$
- 13: 更新卖方投标数量: $S_s^{amount} = S_s^{amount} - C_i^{amount}$
- 14: **if** $B_b^{amount} = 0$ **then**
- 15: $b \leftarrow b + 1$
- 16: **end if**
- 17: **if** $S_s^{amount} = 0$ **then**
- 18: $s \leftarrow s + 1$
- 19: **end if**
- 20: $i \leftarrow i + 1$
- 21: **end while**

图8 双向拍卖匹配流程

Fig. 8 Double auction matching process

设置以太币对 token 的汇率 $1eth = 1.49 \times 10^6 token$, 标定人民币对该 token 的汇率 $1元 = 1000token$ 。

用电权提交阶段(18:35—18:45)中空用户的保证金、初始用电权信息, 和用电权削减阶段(18:45—18:50)中用户用电权削减情况如表2所示。

表2 用户保证金和初始用电权信息

Tab. 2 Deposits and initial PUQs of users

用户	额定功率/kW	保证金/token	初始用电权/kW	削减后用电权/kW	初始顺序	更新顺序
A	5.0	5000	3.0	0.0	1	5
B	4.7	4700	2.4	0.0	2	6
C	6.6	6600	5.6	0.0	3	7
D	10.0	10000	9.2	0.2	4	8
E	12.4	12400	10.0	10.0	5	1
F	6.0	6000	4.0	4.0	6	2
G	8.0	8000	3.7	3.7	7	3
H	5.2	5200	4.2	4.2	8	4

表2中的额定功率、初始用电权均由蒙特卡洛法随机生成, 额定功率对应式(7)的 p_{max} , D被设定为 $2000token/(kW \cdot h)$, Δt 为 $0.5h$ 。A、B、C、D分别被削减了3、2.4、5.6、9kW的用电权。等待队列更新为E、F、G、H、A、B、C、D。

用电权交易阶段(18:50—19:00), 用户报价信息以及双向拍卖匹配结果如图9所示。图中“/”前代表投标数量或成交数量, “/”后代表报价或成交价

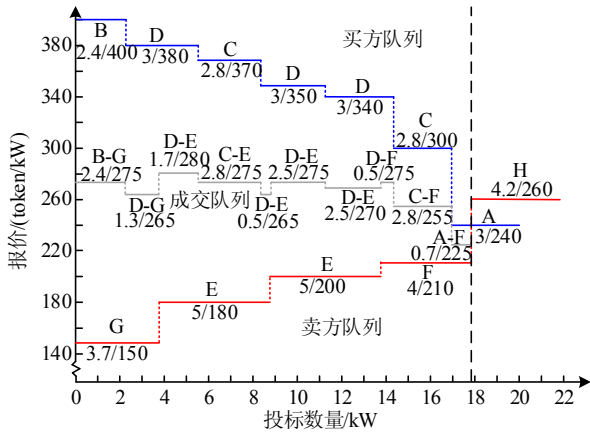


图 9 双向拍卖结果

Fig. 9 Results of double auction

格，空调用户的报价和投标数量均由蒙特卡洛法随机生成。买方 A、B、C、D 和卖方 E、F、G、H 分别给出不同的分段报价方案。双向拍卖结束后，用户 B、C、D、E、F、G 结余为 0，用户 H 剩余 4.2kW 用电权未能售出，用户 A 剩余 2.3kW 用电权未能购得。

用电权校核阶段(19:30—19:35)，用户校核结算情况如表 3 所示。

表 3 用电权校核及资金结算

Tab. 3 Settlement of PUQs and payments

用户	实际负荷/kW	所持用电权/kW	交易收益/token	保证金退还/token
A	0.6	0.7	-157.5	5000
B	2.2	2.4	-660.0	4700
C	5.7	5.6	-1484.0	0
D	9.1	9.2	-2453.0	10000
E	0.0	0.0	2741.0	12400
F	0.0	0.0	1009.0	6000
G	0.0	0.0	1004.5	8000
H	4.2	4.2	0.0	5200

表 3 中实际负荷由蒙特卡洛法生成，系统退还除“不诚实”用户 C 之外其他“诚实”用户的保证金。各节点调用不同函数以保证机制的正常运行，调用次数如表 4 所示。

表 4 中，各节点在不同时段分别调用不同的智能合约，以自组织、自协调的方式实现了需求响应负荷削减的目标。同时，在区块链上各节点的多方监督下，也保证了整个过程的安全性、透明性。

结果表明，在“电网发布控制目标，参与者自主协调响应”的原则下，该机制在确保电网需求响应负荷削减效果的同时保证了用户的用电自主权。

电网公司无须深入参与空调负荷控制，只需要发布 20kW 的需求响应负荷削减目标，并与参与需

表 4 用户调用函数次数

Fig. 4 Number of times when users call functions

函数	A	B	C	D	E	F	G	H	电网公司
①	—	—	—	—	—	—	—	—	1
②	1	1	1	1	1	1	1	1	—
③	1	1	1	1	1	1	1	1	—
④	—	—	—	—	—	—	—	—	1
⑤	—	—	—	—	—	—	—	—	1
⑥	1	1	2	3	2	1	1	1	—
⑦	—	—	—	—	—	—	—	—	2
⑧	—	—	—	—	—	—	—	—	1
⑨	—	—	—	—	—	—	—	—	1

求响应项目的 8 个空调用户在特定阶段触发智能合约。由矿工执行智能合约，区块链以透明的、安全的、无人篡改的方式，完成与智能合约、用户以及电网公司的交互，并最终实现负荷削减目标。

同时，在区块链这一分布式账本的基础上，将用电权作为数字资产分配和交易，能在一定范围内保证用户的用电自主权，实现每个空调用户自身收益的增加。例如，用户 E、F、G 通过自主计算，选择下调用电需求，出售用电权，分别得到了 2741、1009、1004.5token 的收益；用户 A、B、D 通过自主计算，选择上调用电需求，购买用电权，降低了自身的综合成本。交易保证了用户的用电自主权，实现了用户侧的帕累托改进。

4 结论

本文依托区块链技术，设计了基于用电权的需求响应负荷控制机制。算例仿真表明，该机制有如下优势：1) 用电权削减和用电权校核可实现电网公司预期的负荷削减目标；2) 用电权提交和用电权交易保证空调用户的用电自主权；3) 双向拍卖的交易方式实现了用户侧的帕累托改进；4) 以太坊区块链平台解放了电网公司的“双手”，大大减轻了其计算负担；5) 区块链技术保证了整个机制运行的安全透明。

区块链技术在需求响应领域的应用潜力仍可继续发掘，未来的研究方向可能涵盖：实地开展空调用户实验；用户成本函数的详细建模；电网公司补偿价格的确定；交易机制的改良等。

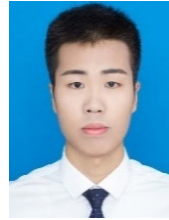
参考文献

[1] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014,

- 34(10): 1546-1555.
- Gao Ciwei, Li Qianyu, Li Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555(in Chinese).
- [2] 王冬利. 多措并举, 综合治理夏季空调高峰负荷[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(4): 5-8.
- Wang Dongli. Take measures to synthesize harnessing summer air-conditioning peak load[J]. Power DSM, 2005, 7(4): 5-8(in Chinese).
- [3] Chen Sijie, Liu C C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [4] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3576-3589.
- Tian Shiming, Wang Beibei, Zhang Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589(in Chinese).
- [5] 蒋寒羽. 上海黄浦区试点商业建筑虚拟电厂项目, 用智能电网改变未来用电生活[EB/OL]. (2018-03-06)[2019-10-27]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/news/20180306/883552.shtml>.
- Jiang Hanyu. The pilot commercial building virtual power plant project in Huangpu District changes the future of power consumption[EB/OL]. (2018-03-06)[2019-10-27]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/news/20180306/883552.shtml> (in Chinese).
- [6] 市经信委. 上海市经济信息化委关于同意开展上海市综合需求响应试点工作的批复[EB/OL]. (2019-04-24)[2019-10-23]. <http://www.sheitc.sh.gov.cn/jjyx/682312.htm>.
- Municipal Commission of information. Approval of Shanghai municipal commission of economic informatization on agreeing to carry out the pilot work of comprehensive demand response programs in Shanghai [EB/OL]. (2019-04-24)[2019-10-23]. <http://www.sheitc.sh.gov.cn/jjyx/682312.htm>(in Chinese).
- [7] Ferreira R S, Barroso L A, Carvalho M M. Demand response models with correlated price data: a robust optimization approach[J]. Applied Energy, 2012, 96: 133-149.
- [8] Chen Zhi, Wu Lei, Fu Yong. Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1822-1831.
- [9] Yoon J H, Baldick R, Novoselac A. Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 121-129.
- [10] Lu Ning, Zhang Yu. Design considerations of a centralized load controller using thermostatically controlled appliances for continuous regulation reserves[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 914-921.
- [11] Ruiz N, Cobelo I, Oyarzabal J. A direct load control model for virtual power plant management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 959-966.
- [12] Chen Chen, Wang Jianhui, Kishore S. A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2219-2228.
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 736-744.
- Li Bin, Cao Wangzhang, Qi Bing, et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744(in Chinese).
- [15] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
- Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 傅质馨, 李潇逸, 袁越. 泛在电力物联网关键技术探讨[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 1-12.
- Fu Zhixin, Li Xiaoyi, Yuan Yue. Research on key technologies of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 1-12(in Chinese).
- [18] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084.
- Wang Jian, Zhou Niancheng, Wang Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,

- 38(17): 5072-5084(in Chinese).
- [19] Marantos C, Siozios K, Soudris D. A flexible decision-making mechanism targeting smart thermostats[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2017, 9(4): 105-108.
- [20] Menniti D, Costanzo F, Scordino N, et al. Purchase-bidding strategies of an energy coalition with demand-response capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1241-1255.
- [21] Li Yiyang, Yan Zheng, Chen Sijie, et al. Operation strategy of smart thermostats that self-learn user preferences[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5770-5780.
- [22] Dickerson T, Gazzillo P, Herlihy M, et al. Adding concurrency to smart contracts[C]//Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. Washington, DC, USA: ACM, 2017.
- [23] Ethereum white paper[EB/OL]. (2019-06-17) [2019-08-28]. <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper>.
- [24] 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(in Chinese).



贾乾罡

在线出版日期: 2020-01-07。

收稿日期: 2019-08-14。

作者简介:

贾乾罡(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源区块链, 需求响应, 电力市场, jiaqiangang@sjtu.edu.cn;

*通信作者: 陈思捷(1987), 男, 特别副研究员, 研究方向为能源区块链、交互式能源、电力市场、需求响应等, sijie.chen@sjtu.edu.cn;

严正(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析、电力市场等, zhengyan_sjtu@yahoo.com.cn;

平健(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为能源区块链, 交互式能源, ppjj1994@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)

Blockchain-enabled Power Usage Quotas Allocation Method for Air Conditioning Loads

JIA Qiangang, CHEN Sijie*, YAN Zheng, PING Jian

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education)

KEY WORDS: blockchain; air conditioning load; demand response; power usage quotas

An air conditioning load is an important demand response resource, which can provide demand response capabilities driven by price signals or direct control. Existing price-driven mechanisms are often unable to accurately meet preset load reduction targets, whereas direct control mechanisms are usually out of users' control.

To ensure user's autonomy while being able to achieve expected load reduction targets, this paper proposes a power usage quotas (PUQs) allocation mechanism for air conditioning loads, including four stages, i.e., submission, reduction, transaction, and settlement. In addition, the mechanism is implemented on the blockchain, which ensures the transparency of the mechanism and reduces the calculation burden of the power company. The complete mechanism based on blockchain is described as follows:

1) Submission of PUQs: Air conditioner users submit the optimal load demand value according to their comprehensive cost (shown in (1)-(5)) before the upcoming demand response period to the smart contract as their initial PUQs.

$$C^{\text{total}} = C^{\text{ele}} + C^{\text{discomfort}} \quad (1)$$

$$C^{\text{ele}} = Ep\Delta t \quad (2)$$

$$C^{\text{discomfort}} = w(T^{\text{set}} - T^{\text{ideal}})^2 \Delta t \quad (3)$$

$$T^{\text{set}} + (\alpha\beta\Delta t - 1)T^{\text{ini}} + \beta\Delta tp = \alpha\beta\Delta t T^{\text{out}} \quad (4)$$

$$C^{\text{total}} = Ep\Delta t + w[\alpha\beta\Delta t T^{\text{out}} - (\alpha\beta\Delta t - 1)T^{\text{ini}} - \beta\Delta tp - T^{\text{ideal}}]^2 \Delta t \quad (5)$$

The relationship between the comprehensive cost C^{total} and electric power p is a quadratic function. Thus the optimal load demand value can be easily obtained. Then air conditioner users submit their corresponding deposits to the smart contract as (6)

$$D^{\text{deposit}} = p_{\text{max}} D \cdot \Delta t \quad (6)$$

2) Reduction of PUQs: The smart contract reduces users' initial PUQs in accordance with the established users' queue according to the load reduction targets.

3) Transaction of PUQs: Users whose initial PUQs are reduced can be buyers, while others can be sellers. According to their comprehensive costs, buyers and

sellers formulate their bids to participate in the double auction market.

4) Settlement of PUQs: The smart contract collects the actual load value of users in the demand response period. The smart contract refunds the deposits of "honest" users and deducts the deposits of "dishonest" users.

To verify the effectiveness of this proposed mechanism, the smart contract is deployed on the Ethereum blockchain and a scenario consisting of 8 air conditioning users is tested. Data about the deposit and initial PUQs of air conditioning users in stage 1 and reduction of the PUQs in stage 2 are shown in Tab. 1. Then the PUQs are reallocated through the double auction market in stage 3. Verification and settlement in stage 4 are shown in Tab. 2.

Tab. 1 Deposits and initial PUQs of users

User	Rated power/kW	Deposit/token	Initial PUQs/kW	Reduced PUQs/kW	Old order	New order
A	5.0	5000	3.0	0.0	1	5
B	4.7	4700	2.4	0.0	2	6
C	6.6	6600	5.6	0.0	3	7
D	10.0	10000	9.2	0.2	4	8
E	12.4	12400	10.0	10.0	5	1
F	6.0	6000	4.0	4.0	6	2
G	8.0	8000	3.7	3.7	7	3
H	5.2	5200	4.2	4.2	8	4

Tab. 2 Settlement of PUQs and payments

User	Actual power/kW	Obtained PUQs/kW	Transaction profit/token	Refund deposit/token
A	0.6	0.7	-157.5	5000
B	2.2	2.4	-660.0	4700
C	5.7	5.6	-1484.0	0
D	9.1	9.2	-2453.0	10000
E	0.0	0.0	2741.0	12400
F	0.0	0.0	1009.0	6000
G	0.0	0.0	1004.5	8000
H	4.2	4.2	0.0	5200

Simulation results show that this mechanism ensures the demand response load reduction target while guarantees users' autonomy of power usage. And the blockchain platform reduces the calculation burden of the power grid company and guarantees transparency.