

基于智能合约的配电网去中心化交易机制

平健¹, 陈思捷¹, 张宁², 严正¹, 姚良忠³

(1. 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;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;

3. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Decentralized Transactive Mechanism in Distribution Network Based on Smart Contract

PING Jian¹, CHEN Sijie¹, ZHANG Ning², YAN Zheng¹, YAO Liangzhong³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation

Equipments (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: With the deregulation of power industry and increasing penetration of distributed energy resources, both opportunities and challenges arise in distribution networks. Traditionally a distribution network is operated in a centralized way similar to a transmission network. However, this may incur problems such as high transaction costs, inefficiency, lack of transparency, and cyber-security risk. This paper presented a decentralized transactive distribution system operation method. Firstly, a transactive and decentralized mechanism was proposed. When a prosumer's actual generation/load deviates from her day-ahead schedule, she can send a real-time transaction request to neighboring prosumers and ask help to eliminate the deviation. A Vickrey-Clarke-Groves (VCG) auction method was introduced to encourage honest bidding of her neighbors. A security check method was proposed to ensure that power flows are within limits. Then, an operation method of a transactive distribution system, based on Ethereum blockchain that ensures transparency and information symmetry, was proposed. We also designed a smart contract of transactive energy. The simulation result based on Ethereum private blockchain shows that the proposed decentralized transactive method can deliver multilateral bidding of prosumers, minimize the total cost of eliminating deviation,

and ensure the economic and secure operation of a distribution network.

KEY WORDS: blockchain; smart contract; decentralization; VCG auction; transactive distribution system

摘要: 电力体制改革的推进以及分布式能源渗透率的提高给配网运行带来了机遇与挑战。传统上,配网借鉴输电侧经验,以集中的方式管理运行。然而,这一模式在新形势下存在成本高、效率低、透明度低、信息安全风险高等问题。为此,该文提出了去中心化的配网运行模式和方法。首先,提出无须中心机构参与的配网交易机制与模型。配网中的产消者在其实际出力/负荷偏离发电计划时,可发起实时交易请求,由周边产消者协助消除这一偏差,维持配网的供求动态平衡;采用VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖规则激励产消者理性报价;设计安全校核方法消除潮流越限。然后,提出基于以太坊区块链技术的配网运行方法,以确保去中心化交易透明开放、信息对称,并设计了电能多边交易的智能合约。基于以太坊私有区块链的算例表明,文中提出的去中心化电能交易方法可实现偏差电量的多边竞价交易,最小化消除偏差电量的成本,确保配网的经济、安全运行。

关键词: 区块链; 智能合约; 去中心化; VCG 拍卖; 配电网电能交易

0 引言

随着新一轮电力体制改革的有序推进,开放售电侧市场,允许分布式电源等多主体参与市场竞争已成为我国电力市场发展的趋势。在分布式电源技术日益成熟、渗透率不断提高、售电侧市场放开的形势下,配电网中将有大量独立决策的电能产消者

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900100); 上海市浦江人才计划; 国家电网公司总部科技项目(适应全球能源互联网发展的智能电网软连接机制与模型研究)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900100); Shanghai Pujiang Program; State Grid Technology Research Program (Research on the smart grid soft connection mechanism and model considering the development of global energy internet).

(prosumer)参与电力市场竞争。在这一新环境中,配网内风、光、储及互动负荷等资源的优化配置^[1-3]必然需要更加灵活的内部交易机制^[4]。如何设计有效的配网交易机制,实现能源资源的有效配置,是市场化改革的重点问题之一。

配网交易的一个关键问题在于如何设计安全、高效、透明、信息对称的交易模式和交易方法。智能电网架构委员会(gridwise architecture council, GWAC)提出了交易驱动能量系统(transactive energy system, TES)的概念,即以价值作为关键运行参数,以经济 and 价格信号实现对整个电力系统,尤其是配电系统的控制^[5]。现有研究对交易驱动能量系统的参与者组成、系统架构以及交易模式提出了诸多设想^[6-12],大多认为配网交易可借鉴输电侧市场交易经验,即建立交易中心,采取集中式的交易拍卖、出清及结算方式。

然而,配电网特性与输电网特性存在较大差异:配网内电能产消者数量庞大,但单笔交易规模通常较小;各产消者均拥有自身发用电设备的完全控制权,且在发用电特性、报价策略上具有很强的不确定性与差异性;同时,产消者的自利性使其对交易公平性、隐私性及无歧视性有更高要求^[13]。因此,集中式交易中心将面临三大问题:一是大量的产消者导致交易中心运行成本高、运行效率低、决策耗时长,难以满足配网实时运行的需求;二是交易中心与产消者之间存在信任问题,难以保证配网交易的公平性、透明性与信息有效性;三是中心机构容易导致信息安全风险,危害交易安全及产消者的隐私安全。

本文认为,为保证配网的安全、高效运行,可以在配网交易中引入去中心化思想。将配网运行分为日前发用电计划确定及实时多边交易两个阶段。日前阶段确定各产消者的发用电计划;在实时阶段,当产消者发电(用电)计划与实际出力(负荷)出现偏差时,产消者可以采用去中心化的多边交易对偏差电量进行交易调整。

为实现去中心化管理运行,可以在配网交易中引入区块链技术^[14]。区块链技术采用去中心化和去信任的方式集体维护一个可靠分布式数据库,从而解决传统中心化机构的高成本、低效率以及数据存贮不安全的问题^[15]。近年来,能源行业被视为区块链技术最具前景的领域之一^[16],分布式能源交易、需求侧响应、碳排放权认证、信用评价、电站运维

等均是区块链可能的应用场景。目前,国内外已有少数企业尝试将区块链技术应用于能源领域^[17-19]。学术界关于区块链在能源领域的研究目前尚处于起步阶段,早期文献主要研究区块链在能源领域的可行性^[20-21]。文献[22]从信息安全角度分析了基于区块链能源交易的安全及隐私风险。文献[23]探讨了区块链技术在能源互联网中的研究框架及可行应用。文献[24]提出了一种分布式的电网安全校核方法,建立了弱中心化的电能交易模式;但该模式仍依赖于中心机构,且未探讨去中心化的交易机制及其在智能合约上的具体实现方法。如何建立去中心化的电能交易模式,如何搭建基于区块链的去中心化交易平台,仍有待进一步研究。

本文聚焦于配网实时运行阶段,构建了去中心化的配网实时多边交易机制与模型,设计了考虑配电网“多交易请求、多响应报价”特点的去中心化多边交易机制及安全校核方法。同时,提出了基于第二代区块链技术——以太坊的分布式配网电能多边交易技术。将智能合约引入配网电能交易,设计了可执行偏差电量多边拍卖的智能合约,实现了配网各产消者间点对点的电能交易。去中心化的交易模式解决了交易中心运行效率低、市场影响力大的问题,通过系统自平衡实现了帕累托改进。区块链技术使去中心化的电能交易不再基于信任,而是基于密码学原理,保证交易的公平性、透明性及无歧视性。此外,本文在以太坊私有链上测试了所设计的智能合约,并与 Matlab 求解出清模型优化问题的结果对比,验证了智能合约的有效性以及机制的最优性。

1 去中心化配网交易机制与模型

在分布式电源渗透率较高的配网系统中,各产消者的供给与需求具有很强的随机性和波动性,因此需要灵活的机制以维持供求关系的实时平衡。

在本文所设计的去中心化配网架构(如图 1 所示)中,全部产消者在日前确定发用电计划并参与上级电力市场交易,产消者间的偏差电量多边交易则通过点对点、去中心化的交易完成,未能通过多边交易消除的偏差电量则由备用机组负责消除。

本文提出去中心化配网多边交易机制,采用可激励市场成员真实报价的 VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖方法^[25],允许配网各产消者间灵活交易,实时消除各产消者自身实际出力(或负荷)与发

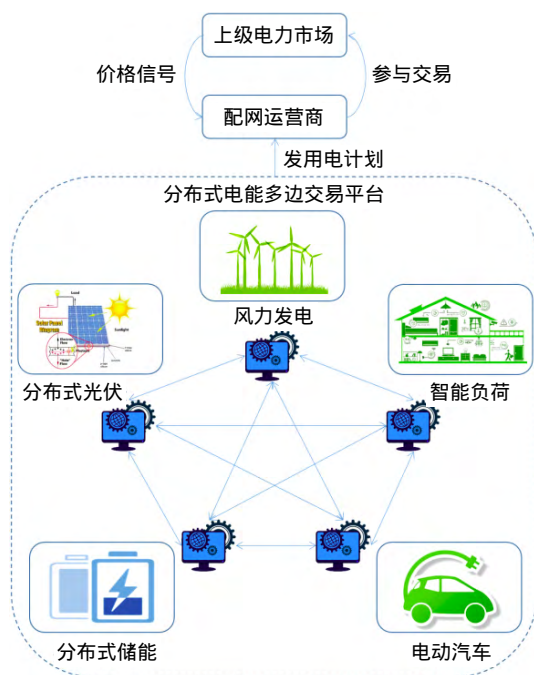


图1 去中心化配网架构示意图

Fig. 1 Illustration of decentralized distribution network architecture

用电计划的偏差值,从而实现配网的供求自平衡。

在某一笔多边交易中,某些产消者需要发起买/卖偏差电量交易请求,以消除其实际发电与计划值的偏差(这类产消者简称发布者)。若所有发布者的总需求表现为需要净买入电量,则有发电调整能力(即愿意改变发电计划)的产消者(这类产消者简称投标者)可以提交提高出力(或降低负荷)的报价,响应发布者的请求;反之亦然。

下面以综合发布者请求后,系统需要净买入电量、投标者需要提交出售电量的报价为例,给出配网实时多边交易的出清模型。上述场景的目标是最小化消除偏差电量的总成本。

$$\min(\sum_{i \in \Omega_0} C_i(P_{i,O})) \quad (1)$$

式中: Ω_0 为投标者集合; $C_i(\cdot)$ 为第 i 个投标者的售电成本函数; $P_{i,O}$ 为第 i 个投标者的调整电量(即投标者实际发电量相对于其计划值的调整量)。由于投标者需出售电量,有 $P_{i,O} > 0$ 。

出清模型的约束条件如式(2)~(4)所示。

1) 偏差电量平衡约束:

$$\sum_{i \in \Omega_A} P_{i,A} + \sum_{i \in \Omega_0} P_{i,O} = 0 \quad (2)$$

式中: Ω_A 为发布者集合; $P_{i,A}$ 为第 i 个发布者的偏差电量。 $P_{i,A} > 0$ 表示其发电实际值大于计划值或用

电实际值小于计划值; $P_{i,A} < 0$ 表示其发电实际值小于计划值或用电实际值大于计划值。

2) 投标者可调电量上下限约束:

$$P_{i,O,\min} \leq P_{i,O} \leq P_{i,O,\max}, \quad \forall i \in \Omega_0 \quad (3)$$

式中 $P_{i,O,\max}$ 、 $P_{i,O,\min}$ 分别为第 i 个投标者可调整电量上下限。

3) 配电网潮流约束:

$$\sum_{i \in \Omega_A} P_{i,A} G_{\alpha\beta,i} + \sum_{i \in \Omega_0} P_{i,O} G_{\alpha\beta,i} \leq \overline{P_{\alpha\beta}}, \quad \forall \alpha\beta \in L \quad (4)$$

式中: $G_{\alpha\beta,i}$ 为节点 i 对支路 $\alpha\beta$ 的功率转移分布因子; L 为配电网全部线路的集合; $\overline{P_{\alpha\beta}}$ 为支路 $\alpha\beta$ 的传输容量裕度。

在放射状配电网中,当节点 i 位于线路 $\alpha\beta$ 的上游时, $G_{\alpha\beta,i} = 1$; 当节点 i 位于线路 $\alpha\beta$ 的下游时, $G_{\alpha\beta,i} = -1$; 当节点 i 位于线路 $\alpha\beta$ 的旁支时, $G_{\alpha\beta,i} = 0$ 。

上述模型的计算流程如图2所示。

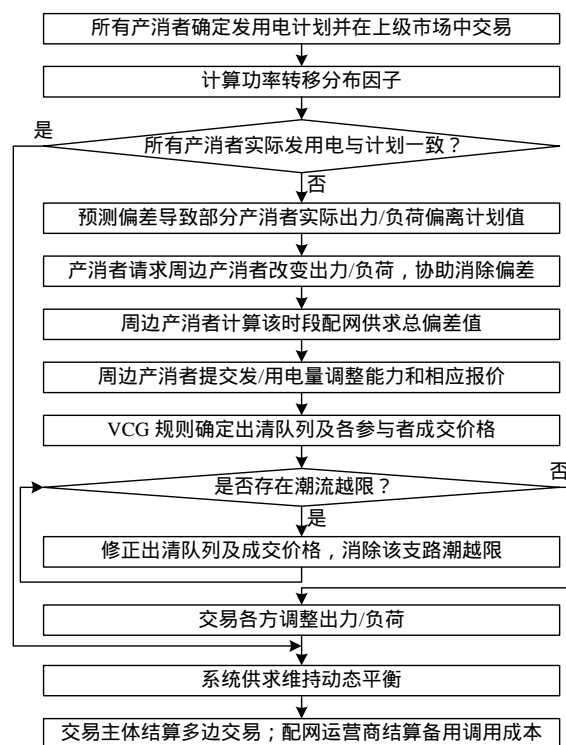


图2 去中心化配网多边交易机制流程图

Fig. 2 Decentralized transactive mechanism in distribution network

1) 配网所有产消者在日前确定发电计划。

2) 当某产消者实际出力或负荷偏离日前计划值时,该产消者将发起交易请求,请求周边产消者改变自身出力或负荷,协助消除偏差值。

3) 周边产消者根据该时段全部的交易请求,

计算配电网供求总偏差值，并根据总偏差值的正负提交卖电或买电的报价。

4) 所有报价根据 VCG 拍卖规则出清：将全部有效报价由低至高依次进入出清队列，直至满足偏差电量平衡约束。各中标者的收益为该中标者给其余投标者带来的收益损失，计算公式如式(5)所示：

$$\Pi_i = W'_i - W''_i \quad (5)$$

式中： Π_i 为第 i 个中标者收益； W'_i 为第 i 个中标者不参与投标时，新出清队列的总收益； W''_i 为出清队列中其余中标者的总收益。

发布者的成交价格如式(6)所示。

$$p = \frac{\sum_{i \in \Omega_0} \Pi_i}{\sum_{i \in \Omega_A} P_{i,A}} \quad (6)$$

该机制一方面适用于配网交易“多交易请求、多响应报价”的情形，另一方面可确保所有投标者的最优报价策略为申报其真实的发用电成本，消除了产消者的博弈成本。

5) 根据功率转移分布因子，计算配电网潮流。若不存在越限情况，则通过安全校核，确定拍卖结果；若存在越限情况，对拍卖结果进行修正。对放射状配网中的每条支路，潮流流向为线路上游至线路下游，因此每条支路只存在潮流正向越限的可能。修正方法如下：计算线路 $\alpha\beta$ 潮流越限值 ΔP_u ($\Delta P_u > 0$)，在出清队列中去除 $\alpha\beta$ 上游节点中的高报价者，同时补充 $\alpha\beta$ 下游节点中的低报价者，直至将 $\alpha\beta$ 的潮流降低 ΔP_u ，以消除该支路潮流越限情况。然后按步骤 4) 方法重新确定成交价格。随后，重复步骤 5)，直至无潮流越限情况。

上述修正方法的有效性分析如下：

若某条支路越限，上述方法将减小(增大)支路上游某一节点的出力(负荷)，增大(减小)下游某一节点的出力(负荷)。该次修正将降低上、下游这两个节点间线路的传输功率；这两个节点位于其余各支路的同侧，其余各支路潮流不受影响。因此，该方法可确保每次修正均消除一条越限支路且不导致新的越限情况，直至消除全部越限情况。

综上所述，该方法可有效避免辐射状配电网潮流的越限情况。

6) 参与交易的产消者调整各自出力或负荷，确保在其他产消者无需改变发用电计划的情况下供求仍然平衡。若产消者无法通过内部交易维持平

衡，则系统备用被调用，以弥补该产消者的偏差。

7) 交易主体之间结算多边交易；备用机组结算备用调用费用。

上述机制的优点如下：

1) 系统自平衡实现帕累托改进。

配网运营商不再需要获取大量电能产消者的运行数据，避免了由此产生的数据获取、监管、维护成本；电能产消者通过自行开展相互交易，调整实际发用电与计划的偏差值，既规避了预测偏差带来的高额备用成本，又可通过相互交易获取利润。这一机制使全体配网成员都分享交易的红利。

2) 削弱配网运营商的市场影响力。

去中心化配网打破了配网运营商与电能产消者之间的信息不对称，运行在完全公开透明的环境下。电能产消者可以独立制定交易策略，体现了分散决策的优点。

3) 市场信号引导分布式发电和弹性负荷的布局。

若某一区域分布式电源与常规负荷的比重较高，弹性负荷平抑不确定性的获利空间就越大，能吸引产消者在此区域部署弹性负荷；反之亦然。

2 基于以太坊智能合约的分布式多边交易方法

2.1 区块链技术和以太坊智能合约

区块链实质上是一系列数据区块的列表，区块链上的每个区块均记录了某一时段内的全部交易数据，运用了非对称加密、默克尔树数据结构(merkle tree)、工作量证明共识机制(proof of work, POW)等技术^[26]，使交易数据可以去信任、可溯源、不可篡改地储存在分布式系统中。

以太坊基于区块链技术，建立了一个图灵完备的编程环境。通过以太坊提供的开发平台，开发者可以编写任何形式的智能合约，在以太坊公有网络、测试网络或私有网络上发布。在以太坊网络中，智能合约相当于一个虚拟用户，可以与其他用户或智能合约进行交易和信息传递。每一个用户均可作为“矿工”，收集当前时段内的全部交易和传递的信息、运行相关的智能合约代码、并根据以上数据计算以太坊的最新状态。“矿工”在运行智能合约后须求解一道基于 Ethash 算法的数学难题，最快求解的“矿工”将取得最终的记账权，负责打包、传播其记录的全部数据，并获得一定经济激励，包括

定额奖励以及与区块内全部数据计算量相关的浮动奖励。以太坊的这一机制实现了系统的去中心化：由全体矿工共同记录、维护系统的全部数据。

以太坊去中心化、图灵完备的特点，为搭建分布式电能多边交易平台提供了良好的支撑。本节设计了可实现偏差电量拍卖的电能多边交易智能合约，作为分布式电能多边交易平台的核心部分。

2.2 配网分布式多边交易智能合约

分布式多边交易智能合约应符合3项原则，即：

1) 任何产消者均可自愿发布及参与拍卖；2) 产消

者报价在竞价阶段应属于保密信息；3) 合约执行结果应自动结算。

本节将多边交易按时间顺序划分为5个阶段，包括：发布交易、密封报价、公开密封报价及拍卖、安全校核与交易结算，并分别设计发布交易函数、密封报价函数、公开密封报价及拍卖函数、安全校核函数、交易结算函数等5个主要功能函数。投标者可能需要购买或出售偏差电量；本文将以投标者需出售偏差电量为例说明智能合约的设计方法，配网分布式多边交易流程如图3所示。

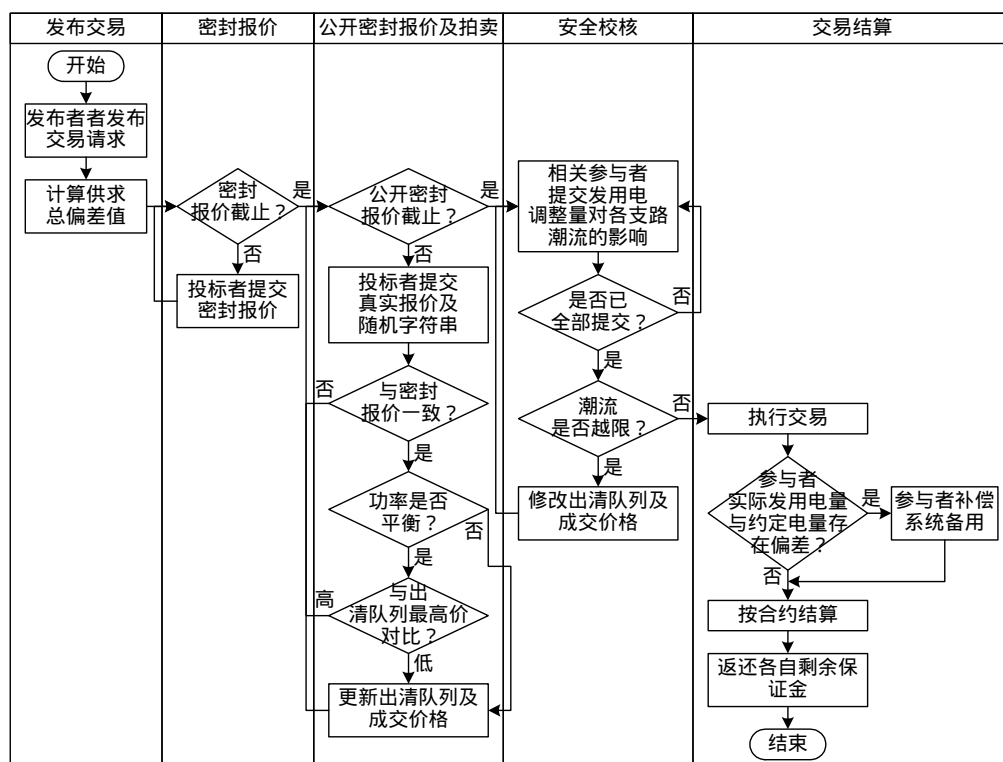


图3 基于以太坊的分布式多边交易流程示意图

Fig. 3 Flowchart of decentralized multilateral trade on Ethereum

1) 发布交易函数：配网中任何产消者均可作为发布者，在发布交易阶段在多方交易平台上提交电量出售或购买请求，同时还需向该智能合约地址转入一定以太币作为保证金，以避免出现虚假请求。以太币是以太坊的虚拟货币，其与人民币在2017年2月28日的汇率约为1eth=108元。智能合约将记录全部请求，计算并公布供求总偏差值。

2) 密封报价函数：由于产消者发送至交易平台上的信息对所有人可见，而VCG拍卖为密封拍卖，即要求投标者提交报价时不能知晓其余投标者的报价信息。本文将投标过程分为密封报价与公开密封报价两个步骤。在密封报价阶段，投标者利用不可逆向求解、易于校验的哈希函数，将自己的真

实报价与一串自定义的随机字符串相连，再进行哈希加密作为密封报价，在密封报价阶段提交。这一方法使得密封报价既包含了不可篡改的真实报价信息，又不至提早泄露给其余投标者。此外，投标者还需向该智能合约地址转入一定以太币作为保证金，以避免恶意竞标。密封报价值如式(7)所示：

$$H = S(v, s) \quad (7)$$

式中： H 为密封报价； $S(\cdot, \cdot)$ 为SHA-3哈希函数； v 为真实报价； s 为投标者自定义的随机字符串。

3) 公开密封报价及拍卖函数：在公开密封报价阶段，投标者需在公开密封报价截止时间前提交自己的真实报价及自定义的随机字符串，智能合约将验证 $S(v, s)$ 与该投标者提交的密封报价 H 是否一

致。若不一致，该报价将被视为无效报价。智能合约每收到一份有效报价，都将执行经过全体成员预先认可的拍卖函数：当供求未达到平衡或新报价低于出清队列中的最高报价时，更新出清队列，并按 VCG 规则重新计算各参与者的成交价格，直至公开报价阶段结束。

4) 安全校核函数：在安全校核阶段，全部产消者需根据自身发用电计划调整量及区块链上记录的功率转移分布因子，计算其对各支路潮流的影响量并提交给智能合约。智能合约对各产消者提交的影响量线性求和，判断各支路的潮流越限情况。若无潮流越限，则智能合约确定中标者与成交价格；若存在潮流越限，智能合约将按照本文第 1 节提出的修正方法更新出清队列及成交价格，新进入出清队列的投标者重新确认调整量。智能合约重新计算潮流，直至不存在潮流越限。中标者与成交价格一经智能合约确认，即无法篡改。

5) 交易结算函数：在规定的电能传输时间，多边交易的全部参与者调整发用电计划，增加发电或降低负荷以完成交易。智能电表将向平台反馈实际发用电情况，平台根据反馈的数据进行结算：

首先，返还所有未中标投标者的保证金。随后，判定交易完成情况，分三种情况考虑：

若交易的全部参与者均按交易结果调整发用电计划，维持供需平衡，则按各自约定价格结算，并返还各自剩余的保证金。

若参与者实际消耗(提供)电量低于(高于)约定电量，那么系统备用将降低自身出力水平以维持供求平衡。该参与者首先按约定电量及成交价格结算，然后可获得来自备用的补偿。补偿金额如式(8)所示。

$$F = p_R |\Delta Q| \tag{8}$$

式中： F 为补偿金额； p_R 为备用调用的单位成本(发电成本减去容量成本)； ΔQ 表示发布者约定电量与实际消耗(提供)电量的差值。

若参与者实际消耗(提供)电量高于(低于)约定电量，导致备用必须增加出力水平以弥补参与者的预测偏差值，则该参与者首先按约定电量及成交价格结算，同时须补偿系统备用，补偿量如式(9)所示。

$$F' = p'_R |\Delta Q| \tag{9}$$

式中 p_R 为备用调用的单位成本(包括发电成本和容量成本)。

全部参与者结算完成后，返还各自剩余保证金。

3 算例分析

为验证本文所设计机制的有效性，本节在实验室环境下，将分布式多边交易智能合约发布至以太坊私有链，作为分布式电能多边交易平台，模拟配电网场景进行仿真测试。该场景包括 2 个智能居民用户以及 3 栋含智能温控系统的商业写字楼，居民用户由于其负荷预测偏差需要在实时阶段向 3 栋商业写字楼购买偏差电量，商业写字楼可通过降低空调功率的方式向居民出售电量。

配电网结构采用改进的 IEEE 33 节点配电系统，系统结构如图 4 所示。该系统中，节点 1 接入大电网，节点 10、节点 12 各接入一个智能居民用户，分别命名为 A、B；节点 4、节点 27、节点 7 各接入一个商业写字楼，分别命名为 C、D、E。本文只考虑实时多边交易阶段，假设日前发用电计划确定后，配电网各支路传输容量裕度如表 1 所示。

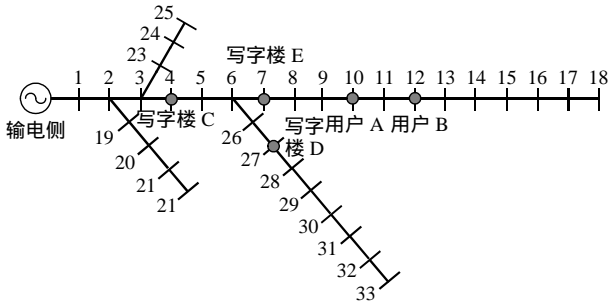


图 4 IEEE 33 节点配电系统
Fig. 4 IEEE 33-bus distribution system

表 1 配电网支路传输容量裕度
Tab. 1 Transmission capacity margin of branches in distribution network

支路节点	传输容量裕度/kW	支路节点	传输容量裕度/kW
1-2	5.20	17-18	1.28
2-3	5.20	2-19	1.28
3-4	5.20	19-20	1.28
4-5	5.20	20-21	0.64
5-6	0.64	21-22	0.64
6-7	5.20	3-23	0.64
7-8	5.20	23-24	0.64
8-9	5.20	24-25	1.28
9-10	5.20	6-26	1.28
10-11	5.20	26-27	1.28
11-12	2.60	27-28	1.28
12-13	1.28	28-29	1.28
13-14	2.60	29-30	1.28
14-15	2.60	30-31	0.64
15-16	2.60	31-32	0.64
16-17	2.60	32-33	0.64

商业写字楼的温度变化模型参照文献^[27]，如式(10)所示：

$$T_{i+1,j} = \varepsilon_j T_{i,j} + (1 - \varepsilon_j) T^O + \beta_j q_{i,j}$$
 (10)

式中： $T_{i,j}$ 为*i*时段第*j*栋写字楼的室内温度； $q_{i,j}$ 为*i*时段第*j*栋写字楼的温控系统负荷； T^O 为室外温度； ε_j 为楼栋隔热系数； β_j 为温控系统效率。

商业写字楼的舒适度损失由式(11)给出^[28]：

$$D_{i,j} = \alpha_j (T_{i,j} - T_{i,j}^I)^2$$
 (11)

式中： $D_{i,j}$ 为*i*时段第*j*栋写字楼的舒适度损失； $T_{i,j}^I$ 为*i*时段第*j*栋写字楼的理想室内温度； α_j 为第*j*栋写字楼用户的温度价值系数。

在 VCG 拍卖方法下，商业写字楼的最优报价应等于其降低温控系统负荷导致的舒适度损失，该报价将由其智能控制系统自动计算并提交。

本文取 $\varepsilon_j=0.96(j=1,2,3)$ ， $\beta_j=0.7(j=1,2,3)$ ， α_1 、 α_2 、 α_3 分别取 0.007、0.01、0.013，并假设室外温度为-2℃，3栋商业写字楼初始室内温度与理想室内温度相等，均为 26℃，系统备用的调用成本为 0.02eth/(kW·h)。

在仿真测试中，智能合约根据各支路电抗值得到功率转移分布因子矩阵；产消者每 15min 根据自身实际需求与日前发用电计划的偏差电量发起一次交易请求，提交 15min 后的电量需求。发布时刻起 2min 内为密封报价阶段；2~4min 为公开密封报价及拍卖阶段；4~6min 为安全校核阶段；15min 后为交易结算阶段。本文在仿真测试前，首先在每个产消者的以太坊账户中预存 5eth，并令 2 个智能家居用户为发布者，3 栋商业写字楼作为投标者。为充分验证智能合约的有效性，本文总共进行 5 次交易，且测试产消者未能按时公开密封报价以及中标者未能按约调整负荷两种情况。

投标者提交的密封报价、真实报价及自定义随机字符串(以 C 为例)如表 2 所示；安全校核前后各支路传输容量裕度如表 3 所示(为节约篇幅,仅展示第 1 时段安全校核前后潮流发生变化的支路)；分布式电能交易平台的交易结果如表 4 所示。

结果表明，3 栋写字楼可在规定时间内通过以太坊 geth 客户端提交并公开密封报价；智能合约按 VCG 拍卖规则执行出清及结算，且最终确定的交易结果满足安全约束。在第 3 次交易中，C 未能在约定时间内公开密封报价，因此其提交的密封报价被

表 2 楼栋 C 提交的密封报价
Tab. 2 Sealed bids submitted by building C

时段	密封报价	真实报价/ (10 ⁻³ eth/(kW·h))	随机 字符串
1	“0x2cba0d499302383ee7de94e3f4eac6233 913253f4242a98390e0dfe36f0afb11”	3.4	“wwp”
2	“0x28bd203a752d3ceaa40c7cf11a468a864 b1167b408e300f18b409f7167b7d88f”	3.2	“rch”
3	“0x2509d3a634e8545fa5eb26c72dbc108bb 6b4ad97662429a572a6796b415d5500”	—	—
4	“0x31a96f466262d3769a9148533fb483a98 123c0c6288accac020e34007685a9ab”	5.7	“oem”
5	“0xe4c3996dbb805ee02eac618c4e6bc44d4 3c5f77259d2a2dc1b7a68e829660a3d”	9.7	“nse”

表 3 安全校核前后各支路传输容量裕度
Tab. 3 Transmission capacity margin of branches before
and after security checking

线路	安全校核前传输容量裕度/kW	安全校核后传输容量裕度/kW
4-5	1.20	4.56
5-6	-3.36	0.00
6-7	1.20	1.20
6-26	1.28	4.64
26-27	1.28	4.64

表 4 分布式电能交易平台交易结果
Tab. 4 Transaction results from
decentralized transactive energy platform

总偏差电量/ (kW·h)	发布者成交价格/ (10 ⁻³ eth/(kW·h))	中标者	中标电量/ (kW·h)	中标收益/ (10 ⁻³ eth)
1.0	6.160	C	0.16	0.784
		D	0.84	5.376
0.6	12.893	C	0.16	0.608
		E	0.44	7.128
0.5	15.900	E	0.50	7.950
1.0	21.368	C	0.16	2.384
		D	0.84	18.984
0.1	57.500	C	0.10	5.750

视为无效报价。在第 5 次交易中，中标者 C 因自身原因未调整负荷，因此结算时其保证金被扣除 0.002eth，补偿系统调用 0.1kW·h 备用容量的成本。

结果同时说明，只要交易各方履行交易合约，本文所设计的机制能够实现交易各方的帕累托改进。例如，第 1 次交易使居民住户的收益提升了 0.01384eth(备用调用成本 0.02eth，偏差电量成交金额 0.00616eth)，使商业楼栋 C 的收益提升了 0.000235eth(偏差电量成交金额 0.000784eth，楼栋 1 出售电量的成本 0.000549eth)。

为验证本文机制的正确性，本文利用 Matlab 求解出清模型，并与私有链的结果对比(见表 5)。结果表明，本文机制可以实现偏差电量总成本最小化的目标。

表 5 本文机制与 Matlab 仿真的偏差电量成本对比
Tab. 5 Comparison of total cost of eliminating the deviation between the proposed mechanism and Matlab simulation result

时段	本文机制/(10 ⁻³ eth)	Matlab 仿真/(10 ⁻³ eth)
1	4.665	4.665
2	2.201	2.201
3	5.420	5.420
4	13.419	13.419
5	0.967	0.967

4 结论

随着配电网分布式能源渗透率的不断提高，灵活的内部交易机制将成为配网发展的必然方向。本文基于区块链技术，提出了一种“多交易请求、多响应报价”的配电网去中心化多边交易模式。建立了去中心化的配电网架构以及市场出清模型，并运用 VCG 拍卖规则，设计了配电网去中心化电能多边交易流程。同时，考虑了配电网的潮流约束，以适应配网实际运行的需求。为探讨基于区块链的去中心化交易方法，本文将配网多边交易划分为发布交易、密封报价、公开密封报价及拍卖、安全校核与交易结算 5 个阶段，运用以太坊智能合约技术，设计了配网分布式多边交易智能合约，搭建了可实际运行的分布式电能多边交易平台。

区块链在配网电能多边交易中的运用值得深入研究，后续可能的方向包括：基于分解协调的配网日前市场在区块链上的实现方法，基于区块链的配网电能多边交易最优规模研究，适用于配网电能多边交易的区块链共识机制设计等。

参考文献

[1] 吴雄,王秀丽,王建学,等.微网经济调度问题的混合整数规划方法[J].中国电机工程学报,2013,33(28):1-8.
Wu Xiong, Wang Xiuli, Wang Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8(in Chinese).
[2] Guo Yuanxiong, Pan Miao, Fang Yuguang, et al. Decentralized coordination of energy utilization for residential households in the smart grid[J]. IEEE

Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1341-1350.
[3] 蔡宇,林今,万灿,等.市场环境基于随机规划的主动配电网运行交易二层优化模型[J].中国电机工程学报,2016,36(20):5391-5402.
Cai Yu, Lin Jin, Wan Can, et al. A bi-level stochastic programming approach for strategic active distribution network operation in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5391-5402(in Chinese).
[4] 宋永华,林今,胡泽春,等.能源局域网:物理架构、运行模式与市场机制[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5776-5787,6020.
Song Yonghua, Lin Jin, Hu Zechun, et al. Energy distribution network: infrastructure, operation mode and market mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5776-5787, 6020(in Chinese).
[5] The GridWise Architecture Council. GridWise transactive energy framework[EB/OL]. (2015-01). http://www.gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf.
[6] Kok K, Widergren S. A society of devices: integrating intelligent distributed resources with transactive energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 34-45.
[7] 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.
[8] Rahimi F, Ipakchi A, Fletcher F. The changing electrical landscape: end-to-end power system operation under the transactive energy paradigm[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 52-62.
[9] Kristov L, De Martini P, Taft J D. A tale of two visions: designing a decentralized transactive electric system[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 63-69.
[10] Akter M N, Mahmud M A, Oo A M T. A hierarchical transactive energy management system for microgrids[C]//Proceedings of 2016 Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1-5.
[11] Sajjadi S M, Mandal P, Tseng T L B, et al. Transactive energy market in distribution systems: A case study of energy trading between transactive nodes[C]//Proceedings of 2016 North American Power Symposium (NAPS). Denver, CO, USA: IEEE, 2016: 1-6.
[12] 沈俭荣,文云峰,郭创新,等.基于产消方式的互联微网协同自治运行策略[J].电力系统自动化,2016,40(9):40-47.
Shen Jianrong, Wen Yunfeng, Guo Chuangxin, et al. Prosumer-based autonomous-synergetic operation strategy for interconnected microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 40-47(in Chinese).

- [13] Masiello R, Agüero J R. Sharing the ride of power : understanding transactive energy in the ecosystem of energy economics[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 70-78.
- [14] 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.
- [15] Nakamoto S. Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system[J]. Consulted, 2008.
- [16] Kim M, Song S, Jun M S. A study of block chain-based peer-to-peer energy loan service in smart grid environments[J]. Advanced Science Letters, 2016, 22(9): 2543-2546.
- [17] Molle G. How blockchain helps brooklyn dwellers use neighbors' solar energy[EB/OL]. National Public Radio (NPR), (2016-07-04). <http://www.npr.org/sections/alltechconsidered/2016/07/04/482958497/how-blockchain-helps-brooklyn-dwellers-use-neighbors-solar-energy>.
- [18] Higgins S. Why a German power company is using ethereum to test blockchain car charging[EB/OL]. (2016-05-07). <http://www.coindesk.com/german-utility-company-turns-to-blockchain-amid-shifting-energy-landscape/>.
- [19] 曹寅. 能源互联网 1.0 : 能源区块链实验室路线图[EB/OL]. (2016-05-23). <http://www.8btc.com/energy-web>.
Cao Y. Energy Internet 1.0: The roadmap of energy-blockchain Lab[EB/OL]. (2016-05-23). <http://www.8btc.com/energy-web>[in Chinese]
- [20] Mihaylov M, Jurado S, Avellana N, et al. NRGcoin : Virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C]//Proceedings of 2014 the 11th International Conference on the European Energy Market (EEM). Krakow, Poland : IEEE, 2014 : 1-6.
- [21] Alam M T, Li H, Patidar A. Bitcoin for smart trading in smart grid[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks. Beijing, China : IEEE, 2015 : 1-2.
- [22] Aitzhan N Z, Svetinovic D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2016, doi : 10.1109/TDSC.2016.2616861.
- [23] 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).
- [24] 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).
- [25] Nisan N, Ronen A. Computationally feasible VCG mechanisms[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2007, 29(1): 19-47.
- [26] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain : the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494(in Chinese).
- [27] Ilic M, Black J W, Watz J L. Potential benefits of implementing load control[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA : IEEE, 2002 : 177-182.
- [28] 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.



平健

收稿日期 : 2017-02-28。

作者简介 :

平健(1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、可交易能源、区块链, ppjj1994@sjtu.edu.cn ;

陈思捷(1987), 男, 特别副研究员, 主要研究方向为需求响应、可交易能源、电力市场、区块链, 本文通讯作者, sijie.chen@sjtu.edu.cn ;

张宁(1985), 男, 副教授, 主要研究方向为新能源、电力系统规划及运行、多能源系统, ningzhang@tsinghua.edu.cn ;

严正(1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要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, zhengyan_sjtu@yahoo.com.cn ;

姚良忠(1961), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析及大型风电场并网技术, yaoliangzhong@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 乔宝榆)