

弱中心化的配电网市场交易机制、模型与技术实现

窦晓波^{1,2}, 曹水晶^{1,2}, 刘之涵^{1,2}, 蔡超³, 韩俊³, 陈曦³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096;

2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室(东南大学), 江苏省南京市 210096;

3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏省南京市 210009)

摘要:新一轮电力体制改革的进行推动了双边开放电力市场的发展,新结构下市场成员间的互动行为更加灵活多变。为引导市场成员理性报价,鼓励各成员间开展良性竞争,首先,构建了综合成员利益和系统网损的能量优化模型。其次,提出了弱中心化的新型市场机制,该机制设计了市场交易成员、框架和流程。在市场成员中,配电网系统运营商作为超级用户参与市场的监管工作,并与普通用户共同参与市场出清。普通用户在出清过程中可权衡利弊多次修改自身报价,还原了电力市场自由竞争、分散决策的特性。然后,利用交替方向乘子算法进行市场出清,市场成员间只需传递少量信息即可通过并行计算达到市场均衡,抑制了成本信息不对称引发的恶意报价行为。最后,针对所提交易机制设计了基于区块链技术的以太坊智能合约方案,通过算例和部署在以太坊私有链上的智能合约,验证了所提市场机制的有效性。

关键词: 双边开放市场; 市场机制; 弱中心化; 信息不对称; 交替方向乘子算法; 以太坊

0 引言

随着分布式电源的大量接入和智能电网技术的迅速发展,以微电网(microgrid, MG)、负荷聚合商(load aggregator, LA)和售电商(retailing supplier, RES)为代表的供用能成员,可通过市场手段有效利用分布式能源发电资源,是构建可持续发展新型能源体系的一个关键举措^[1]。同时中央“管住中间、放开两端”电力体制改革核心思想的提出^[2],推动了双边开放电力市场的进一步发展,各成员可通过策略性报价和容量持留^[3]的方式参与市场,供用双方通过信息交互达到市场均衡。新型的市场成员和灵活多变的结构将打破固有成员间的利益平衡关系^[4]。

在对电力市场的深入研究中,研究人员逐渐意识到市场机制的优劣是电力市场能否有效开展的关键^[5]。电力市场结构常分为集中式和分布式两类。集中式市场环境下,文献[6-7]研究了基于多智能体的电力市场分层运行架构,由下层提交供用电竞标计划,上层集中制定最佳经济调度策略。文献[8]中

独立系统运营商整合用户分段用电需求和发电企业报价信息,从持续时间最长的负荷段开始进行逐段竞价出清。文献[9]建立了考虑灵活块交易的市场出清模型,市场成员选择交易品种后申报竞价,电力交易所以最大化社会福利进行统一优化出清。而在分布式市场环境下,文献[10-11]采用非合作博弈研究松散群模式下的市场交易,MG独立报价,按报价的高低依次出清。文献[12]将互联MG的协同自治运行问题分为下层的MG自治运行初值求解问题和上层的联络线功率优化问题,但在下层优化过程中忽视了系统网损对市场出清价格的影响。

在双边开放的电力市场中,传统的集中式调度方法存在信息收集量大、建模精度低、求解难度高等问题^[13],同时上报竞价、集中出清的优化方式,放弃了市场成员在一定价格水平下调整报价策略的效益,无法实现市场各要素的帕累托最优^[14]。而在去中心化市场中,成员间通过信息交互完成资源分配,交易过程中大量数据的报送与传输,对系统安全性的要求较高。并且分布式电力市场中信息是不对称的^[5],市场成员策略性的博弈行为易引发信息造假等问题。

为此,本文提出了一种弱中心化的电力市场双边交易机制,与中心化市场运营机制相似,配电网系统运营商(distribution system operator, DSO)将制

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2019-01-18。

上网日期: 2019-04-12。

国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018058); 国家自然科学基金资助项目(51777031)。

定市场运行规范组织市场有序开展。但不同于传统的集中出清方式,在弱中心化的电力市场中,DSO不再独立优化市场出清,而与多个具有通信能力和自主决策能力的成员共同磋商。

同时本文以区块链技术和智能合约作为技术支撑,抑制交易过程中的信息安全等问题。区块链技术和智能合约作为支撑分布式电力市场运转的关键技术,正成为当前研究热点^[15-17]。区块链技术采用分布式总账的记账方式,可通过密码学原理保证数据的不可篡改和伪造^[18]。智能合约作为一种可编程的嵌入式代码,可结合特定业务需求,自动触发执行。

综上,本文从梳理市场成员关系入手,建立了各用户市场模型,厘清了市场交易流程。运用交替方向乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM),通过分布式迭代实现资源优化配置,达到市场均衡。设计了区块链技术和智能合约的具体应用方案,并在以太坊私有链上验证了方案的有效性。

1 弱中心化电力市场交易机制

在双边开放电力市场中,市场成员需求的多样性和资源分配的灵活性对市场交易机制提出了新的要求。本节首先梳理了市场交易成员,随后分别建立了普通用户和超级用户的市场模型。

1.1 市场交易成员设计

弱中心化的市场运行框架如图1所示,分布式的市场成员可通过电力交易平台进行信息互动,实现分散化、点对点交易。

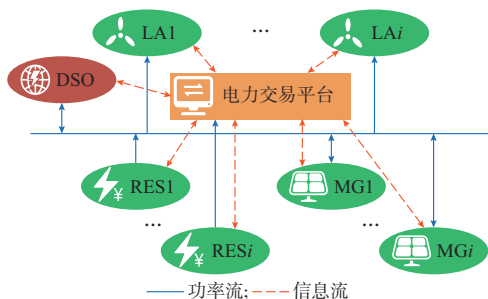


图1 市场运行框架

Fig.1 Framework of market operation

根据市场成员不同特性,将市场成员分为超级用户和普通用户两类。超级用户为DSO,普通用户包括LA, RES和MG用户。

1.2 普通用户市场模型

建立普通用户的区域经济优化模型、区域竞价模型和区域交易量分配模型。MG的能量流向具有双向性,既可作为用电方向系统内其他成员买电,也

可作为售电方卖电给其他成员,因此本文以MG为例建立普通用户模型。

1.2.1 区域经济优化模型

在任务发布阶段,以假设市场不开放为前提, MG以经济效益最高为目标进行能量优化, MG用户*i*的区域经济优化模型为:

$$\min C_{EMS,i} = C_{use,i} + C_{sell,i} + C_{pcc,i} \quad (1)$$

$$P_{pcc,i}^t + P_{CMS,i}^t + P_{DG,i}^t = P_{load,i}^t + P_{cl,i}^t \quad (2)$$

$$s. t. \quad P_{pcc,min} \leq P_{pcc,i}^t \leq P_{pcc,max} \quad (3)$$

$$P_{cl,i,min} \leq P_{cl,i}^t \leq P_{cl,i,max} \quad (4)$$

$$P_{CMS,i,min} \leq P_{CMS,i}^t \leq P_{CMS,i,max} \quad (5)$$

式中: $C_{EMS,i}$ 为MG用户*i*的运行成本; $C_{use,i}$ 为用电单元运行成本; $C_{sell,i}$ 为售电单元运行成本; $C_{pcc,i}$ 为与超级用户间的交换功率成本; $C_{use,i}$, $C_{sell,i}$ 和 $C_{pcc,i}$ 的具体形式见附录A式(A1); $P_{pcc,i}^t$ 为用户与超级用户间的联络线功率; $P_{CMS,i}^t$ 为可控微源*t*时刻的有功功率; $P_{DG,i}^t$ 为不可控微源出力; $P_{load,i}^t$ 为不可控负荷*t*时刻用电需求; $P_{cl,i}^t$ 为可控负荷用电需求; 下标max和min分别为对应变量的最大、最小值。式(1)为MG目标函数,式(2)为功率平衡约束,式(3)为联络线功率约束,式(4)为可控负荷用电约束,式(5)为可控微源出力约束。

MG用户*i*区域经济优化模型的决策变量为:

$$X_1 = (P_{pcc,i}^t, P_{CMS,i}^t, P_{cl,i}^t) \quad (6)$$

根据经济优化结果, MG判断系统下一时刻是否存在功率缺额/盈余,在电力交易平台上发布自身需求和竞价曲线。不失一般性,本文假设各成员的市场竞价曲线为单调递增函数^[7,14,19],即

$$\lambda_{ex,i}^t = \alpha_i |P_{ex,i}^t| + \beta_i \quad (7)$$

式中: $P_{ex,i}^t$ 为期望交换功率, $P_{ex,i}^t$ 为正表示从其他用户处买电, $P_{ex,i}^t$ 为负表示向其他用户卖电, $|P_{ex,i}^t| \in [0, P_{ex,i,max}]$, $P_{ex,i,max}$ 为最大期望交换功率; $\lambda_{ex,i}^t$ 为期望电价; $\alpha_i \in [\alpha_{i,min}, \alpha_{i,max}]$ 和 $\beta_i \in [\beta_{i,min}, \beta_{i,max}]$ 为竞价系数; $\alpha_{i,max}$, $\alpha_{i,min}$ 和 $\beta_{i,max}$, $\beta_{i,min}$ 分别为竞价系数取值的上下限,均为正数。

1.2.2 区域竞价模型

若开放市场,则在市场出清阶段, MG用户*i*将通过区域竞价模型进行分布式优化出清,区域竞价模型与区域经济优化模型相似,其优化目标为:

$$\min C_{com,i} = C_{use,i} + C_{sell,i} + C_{pcc,i} + \lambda_{ex,i}^t P_{ex,i}^t + \delta (P_{ex,i}^t)^2 \quad (8)$$

式中: δ 为网损系数,是常数。

除需满足约束式(3)至式(5)外, MG在参与市场竞价时还需满足功率平衡约束,即

$$P_{pcc,i}^t + P_{CMS,i}^t + P_{DG,i}^t + P_{ex,i}^t = P_{load,i}^t + P_{cl,i}^t \quad (9)$$

MG 调用区域竞价模型时竞价曲线的竞价系数为定值,在后续的出清过程中将进一步修正竞价系数。MG 区域竞价模型的决策变量为:

$$X_2=(P_{pcc,i}^t,P_{CMS,i}^t,P_{cl,i}^t,P_{ex,i}^t) \tag{10}$$

1.2.3 区域交易量分配模型

若 MG 用户 i 与其他普通用户达成交易,则在交易执行阶段,MG 将调整区域内可控单元功率以分配交易电量,区域交易量分配模型为:

$$P_{ex,i}^t=\Delta P_{pcc,i}^t+\Delta P_{CMS,i}^t+\Delta P_{cl,i}^t \tag{11}$$

式中: $\Delta P_{pcc,i}^t$ 、 $\Delta P_{CMS,i}^t$ 和 $\Delta P_{cl,i}^t$ 分别为联络线功率调整量、可控微源调整量和可控负荷调整量,均可由区域竞价模型的优化结果获得,无须再次进行优化计算。

1.3 超级用户市场模型

建立超级用户的市场竞争力评价模型和潮流校核模型。在任务发布阶段,超级用户调用市场竞争力评价模型选择参与市场的普通用户;在市场出清阶段,超级用户调用潮流校核模型复核系统的安全性。

1.3.1 市场竞争力评价模型

目前研究中电力用户竞争力/市场力的评价指标囊括了生产成本、运营效率、辅助服务、技术装备、市场份额和安全可靠等多个方面^[3,20-21]。本文主要研究用户在电力市场竞价过程中的竞争力,从实用性角度出发,选取易于量化的、直接影响中标结果的竞争力指标,具体包括交易量 $I_{p,i}^t$ 、交易价格 $I_{\lambda,i}^t$ 、交易时长 $I_{T,i}^t$ 和诚信度 $I_{CR,i}^t$ 这 4 个指标。由此用户市场竞争力模型具体为:

$$I_{MP,i}^t=A_1I_{p,i}^t+A_2I_{\lambda,i}^t+A_3I_{T,i}^t+A_4\bar{I}_{CR,i}^t \tag{12}$$

式中: $I_{MP,i}^t$ 为用户 i 的市场竞争力得分; $\bar{I}_{CR,i}^t$ 为平均诚信度得分,由用户历史诚信度求平均值获得; $I_{p,i}^t$ 、 $I_{\lambda,i}^t$ 、 $I_{T,i}^t$ 和 $I_{CR,i}^t$ 的具体计算公式见附录 A 式(A2);

A_i 为权重系数,是 0 ~ 100 间的正数,且 $\sum_{i=1}^4A_i=100$ 。

1.3.2 潮流校核模型

本文主要关注有功电能交易,因此使用直流潮流模型对系统安全性进行校核^[22],具体为:

$$P_n^t=V_n^t\sum_m(V_n^t-V_m^t)y_{nm} \quad n\in N_1 \tag{13}$$

$$\text{s.t.} \quad P_{\min}\leq P_n^t\leq P_{\max} \quad \forall n \tag{14}$$

$$V_{\min}\leq V_n^t\leq V_{\max} \quad \forall n \tag{15}$$

式中: m 表示所有与节点 n 相连的节点; P_n^t 为 t 时刻节点 n 的功率,流入为正,流出为负; N_1 为系统内所有的节点集合; $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为节点功率 P_n^t 的最小值和最大值; $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别为节点电压 V_n^t 的最小值和最大值;式(13)为节点 n 的功率平衡方程,式(14)为节点功率上下限约束,式(15)为节点电压上下限约束。

2 市场交易框架与流程

将市场成员的能量优化过程与市场出清过程结合,提出了弱中心化的市场交易流程,同时以区块链和智能合约作为技术支撑,使电能交易过程由基于信任转变为基于密码学原理。据此提出的弱中心化市场交易框架与流程如图 2 所示,从交易框架上分为用户决策层和交易支撑层,从流程上分为任务发布、市场出清、交易执行和结算三个阶段。图中,api 表示应用程序编程接口。

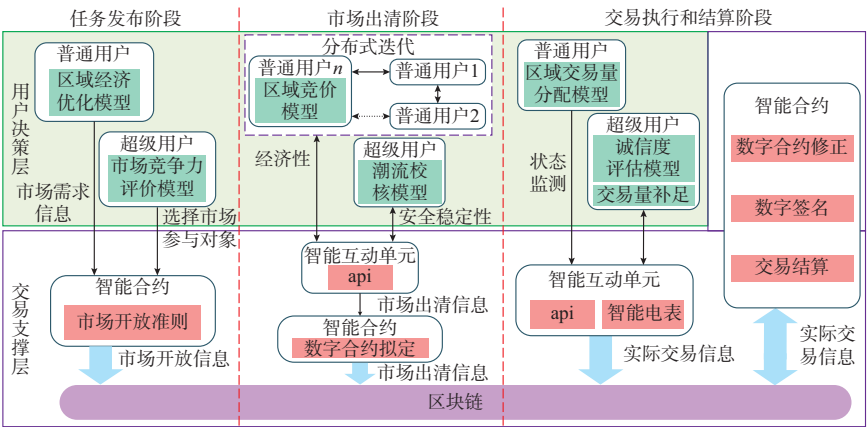


图 2 市场交易框架与流程
Fig. 2 Framework and process of market trading

2.1 任务发布阶段

本文研究日内实时交易市场,以 15 min 为周

期,各普通用户将通过区域经济优化模型,确定下一时段的自身状态(功率缺额、功率盈余、功率平衡),

并上报市场需求信息,包括竞价系数取值范围和初始报价。普通用户在一个市场开放周期内只能上报一次竞价系数取值范围。

超级用户整合市场需求信息,判断是否满足市场开放条件。若开放市场,超级用户调用市场竞争评价模型,从报价、诚信度、可控功率、可控时长等多个维度出发,选择合适的市场参与对象。若不开放市场则各普通用户与超级用户进行电量交易,由超级用户填补功率缺额或消纳多余电能。

2.2 市场出清阶段

市场开放后,普通用户将以区域经济性最优为目标,建立区域竞价模型,通过分布式优化实现竞价均衡。同时为保证系统稳定运行,超级用户调用潮流校核模型对普通用户竞价结果进行安全性校核,与普通用户共同决策出清。

普通用户间通过反复竞价实现均衡,在此过程中,普通用户可多次修改报价方案,市场成员只需调用 api 交换期望交易功率,即可实现市场出清。交易达成后,智能合约将市场出清信息写入数字合约中,在交易平台上发布。

为保证各区域的供电可靠性,配电网内各普通用户除可相互间进行电量交易外还可与超级用户进行电量交易,并按峰谷电价进行结算。

需要说明的是,本文中市场出清电价为全网统一价格。并且市场出清电价和电网峰谷电价相互独立,互不影响。

2.3 交易执行和结算阶段

在约定的交易执行时段,普通用户将按区域竞价模型优化结果分配协议交易量。同时超级用户通过智能电表监测普通用户间的实际交易情况,参考协议交易量,调用诚信度评估模型,重新评估用户诚信度。

由于风光出力和用户用电的不确定性,普通用户可能无法严格按合同约定完成交易。为保证系统的稳定运行,超级用户将强制性地向交易双方买入/卖出一定电能。普通用户与超级用户间进行电量交易产生的费用按峰谷电价结算,由违约方承担。

交易双方完成交易后,智能合约根据实际交易结果修正数字合约,交易双方进行确认签名。

交易经确认后,智能合约组织结算。市场成员的收入/支出由市场交易费用、超级用户补足交易费用和过网费用组成,市场交易费用按市场出清结果结算,超级用户补足交易费用按峰谷电价结算,根据成交量超级用户向市场交易双方收取一定比例的过网费用^[23]。

结算阶段采用由超级用户统一发行的代币进行

结算,每次交易结束由超级用户统一更新各用户代币信息,在月末通过各用户代币信息完成代币与现实货币的二次结算。

3 市场出清过程的求解方法

市场出清过程即各普通用户通过调整自身报价,最终供给量和需求量达到一致,从而达到市场均衡的过程,该过程也是市场用户间相互博弈的过程。当存在多个竞争主体时,市场达到均衡的条件是各主体都不主动改变自身的报价策略,即达到纳什均衡^[24]。本文所提的普通用户报价策略属于纯策略,纯策略纳什均衡存在性证明见附录 A 式(A3)。

市场出清流程如图 3 所示,在多方竞价的 market 环境下,交易功率与交易电价率先与买方达成一致的卖方即可中标。因此,将市场出清流程划分为期望交易功率修正阶段和期望交易电价修正阶段两个阶段。图中, n 表示竞价轮次; ρ 为惩罚系数; u^k 为第 k 次迭代的拉格朗日乘子。

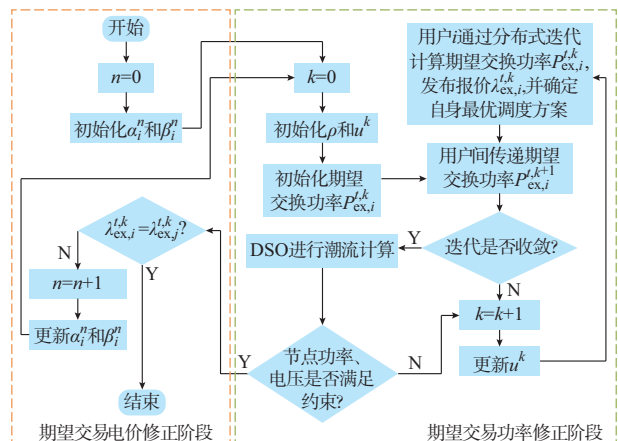


图 3 市场出清流程图
Fig. 3 Flow chart of market clearing

在期望交易功率修正阶段普通用户间通过 ADMM 迭代更新期望交易功率。ADMM 基本原理见附录 A 式(A4),文中普通用户的分布式迭代最终形式为:

$$\begin{cases} P_{\text{ex},i}^{t,k+1} = \operatorname{argmin} C_{\text{com},i}(P_{\text{ex},i}^{t,k}) + \\ u^k \sum_{i=1}^n P_{\text{ex},i}^{t,k} + \frac{\rho}{2} \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{ex},i}^{t,k} \right)^2 \\ u^{k+1} = u^k + \rho \sum_{i=1}^n P_{\text{ex},i}^{t,k+1} \end{cases} \quad (16)$$

式中:在凸优化的条件下,ADMM 在惩罚系数 ρ 取不同值时均能可靠收敛至全局最优解^[25],本文算例中 ρ 取 0.005。

各普通用户分别独立进行收敛判断,算法的收敛判据为对偶不可行度,即

$$\|P_{\text{ex},i}^{t,k+1}-P_{\text{ex},i}^{t,k}\|_2\leqslant \epsilon \quad i=1,2,\cdots,N \quad (17)$$

式中: ϵ 为收敛门槛值,本文取 10^{-5} ; N 为参与市场的用户数。

在期望交易电价修正阶段,普通用户判断是否与其余用户期望电价达成一致,若不一致则按式(18)和式(19)修正竞价系数 α_i 和 β_i ,开始下一轮竞价,即

$$\alpha_i^{n+1}=\alpha_i^n+\mu_\alpha(\lambda_{\text{ex},i}^{t,n}-\lambda_{\text{ex},j}^{t,n}) \quad (18)$$

$$\beta_i^{n+1}=\beta_i^n+\mu_\beta(\lambda_{\text{ex},i}^{t,n}-\lambda_{\text{ex},j}^{t,n}) \quad (19)$$

式中:上标 n 为竞价轮次,竞价系数每次更新即为新的竞价轮次; μ_α 和 μ_β 为权重系数,是常数。

弱中心化市场环境下市场出清过程可分为以下 7 个步骤。

步骤 1:初始化竞价轮次 n 、竞价系数 α_i^n 和 β_i^n 。

步骤 2:初始化 ADMM 迭代次数 k 、惩罚系数 ρ 和拉格朗日惩罚系数初值 u^k 。

步骤 3:求解区域竞价模型,初始化期望交换功率 $P_{\text{ex},i}^{t,k}$,用户间传递期望交换功率。

步骤 4:用户根据式(16)进行 ADMM 迭代,更新期望交换功率 $P_{\text{ex},i}^{t,k+1}$,用户间传递期望交换功率。

步骤 5:用户根据式(17)判断迭代是否收敛,若收敛,停止迭代,执行步骤 6;反之迭代次数 $k+1$,并由式(16)更新拉格朗日乘子 u^k ,返回步骤 4,进行下一次迭代。

步骤 6:DSO 调用潮流校核模型检验 ADMM 迭代结果,判断节点功率、电压是否满足约束,若满足则执行步骤 7;反之迭代次数 $k+1$,并更新 u^k ,返回步骤 4。

步骤 7:判断买方期望电价与卖方期望电价是否一致,若不一致则竞价轮次 $n+1$,并根据式(18)和式(19)更新竞价系数,返回步骤 2;若一致则退出运算,本次出清结束。

4 弱中心化电力市场交易支撑技术与实现

对于双边开放的电力市场而言,区块链去中心化、去信任性、信息不可篡改等特点符合新型市场成员以及灵活多变的市场结构的需求。智能合约是实现区块链技术应用的关键,通过智能合约中定义的状态变量 (state variables)、结构类型 (structs types)、函数 (functions)、函数修改器 (function modifiers)、事件 (event) 等内容实现具体应用的开发。

在本文中买方卖方的信息以结构 (struct) 类型存储,设结构体类别名为 trader,具体定义见附录 B。结构体 trader 通过映射 (mapping) 建立用户地址与信息的关系。

为了确保交易的顺利进行,函数添加了修改器

(modifier)来约束函数的使用权限,函数修改器的定义具体见附录 C 表 C1。

本文针对市场交易流程的三个阶段设计了不同函数,具体函数见附录 C 式(C1)。以太坊提供了多种 api,本文选用 web3 接口与以太坊进行交互,通过 web3.eth.call 接口可以查询智能合约中各变量信息。通过 web3.eth.sendTransaction 接口调用函数,通过 web3.eth.getTransaction 接口可查询交易信息。

交易结算阶段采用代币结算,代币由超级用户唯一发行,超级用户拥有代币交易的唯一权限。每月初由超级用户向每位普通用户统一发放代币,月末根据用户代币余额与月初发放量关系在现实货币中完成二次结算,余额超过月初发放量的用户收到超级用户的资金,余额小于月初发放量的用户向超级用户汇入电费。本文发行代币的名称为 electricity fees,100 代币对应现实货币 1 元。

5 实例分析

5.1 系统基础数据

本文以改进的 IEEE 9 标准节点为例进行分析,其电气结构如附录 C 图 C1 所示,配电网通过节点 1 与主电网相连。电网峰谷电价如表 1 所示,网损系数 $\delta=25$ 元/((MW)²·h)。系统中普通用户包括 MG,LA 和 RES,各用户的配置数据和典型日固定负荷参数详见附录 C 图 C2 和表 C2。

表 1 电网峰谷电价
Table 1 Peak and valley power price

峰谷	时间段	购电电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)	售电电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)
峰时	08:00—11:00	1.25	1.25
	13:00—15:00	1.25	1.00
	18:00—21:00	1.25	1.25
平时	06:00—08:00	0.80	0.55
	11:00—13:00	0.80	0.55
	15:00—18:00	0.80	0.55
	21:00—22:00	0.80	0.55
谷时	00:00—06:00	0.40	0.30
	22:00—00:00	0.40	0.30

为验证本文所提机制的有效性,选取峰荷时段 10:00 为例模拟弱中心化市场的交易过程,在 MATLAB 上搭建用户决策层模型,在以太坊平台上编写智能合约程序。在决策出清阶段,用户通过 web3.eth.call 接口获得智能合约中各用户期望交换功率信息,并在 MATLAB 中完成出清求解;出清结果确定后,超级用户通过 web3.eth.sendTransaction 接口将出清结果写入智能合约。具体仿真结果如下。

5.2 任务发布阶段仿真结果分析

在任务发布阶段,LA 作为买电方,MG 和 RES 作为卖电方,分别通过以太坊智能合约报价函数发布市场需求,本例中 LA 的报价函数调用过程如附录 C 图 C3 所示。

超级用户接收到市场需求信息后,根据用户初始报价信息,调用市场竞争力评价模型,计算普通用户市场竞争力得分。市场竞争力权重系数 A_1 至 A_4 均取为 25,默认交易时长为一个优化周期(15 min),默认普通用户的诚信度初始均值为 1,则普通用户的初始报价及其市场竞争力得分 $I_{MP,i}^t$ 如表 2 所示。规定市场竞争力得分大于 60 分的用户可参与市场,在本次市场开放周期内,LA, MG 和 RES 均拥有参与市场权,可参与市场竞价。

表 2 普通用户初始报价及市场竞争力得分

Table 2 Initial quotation and market competitiveness score for ordinary users

普通用户	$P_{ex,i}^t$ /kW	$\lambda_{ex,i}^t/(\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	$I_{MP,i}^t$
LA	6 780	0.68	86.30
MG	6 641	1.25	74.67
RES	15 000	1.55	85.97

随后智能合约根据市场开放准则整合市场准入用户竞价曲线,判断是否开放市场。用户竞价系数取值范围具体如表 3 所示。

表 3 用户竞价系数取值范围

Table 3 Range of user's bidding coefficient

交易者	交易类型	$\alpha_i/$	$\beta_i/$
		$(\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	$(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$
LA	买电	$[50 \times 10^{-6}, 300 \times 10^{-6}]$	$[0.05, 0.4]$
MG	卖电	$[8 \times 10^{-6}, 25 \times 10^{-6}]$	$[1.05, 1.5]$
RES	卖电	$[10 \times 10^{-6}, 30 \times 10^{-6}]$	$[0.90, 1.5]$

超级用户整合竞价曲线,任意选取两组报价系数,如附录 C 图 C4 所示,各用户的竞价曲线存在交点,存在发生交易的可能性,超级用户开放市场。

5.3 市场出清阶段仿真结果分析

确认市场参与对象后进入市场出清阶段。以第三轮竞价为例,ADMM 迭代收敛证明见附录 C 式(C2),迭代 20 次后计算结果即达到收敛标准,说明算法收敛性较好。

分析普通用户竞价过程中的报价策略变化,三轮竞价中普通用户的 $P_{ex,i}^t$ 变化情况如图 4 所示。

由图 4 可知,每一轮竞价的迭代初期,普通用户首先以最大化自身利益为目标优化报价,LA 的 $P_{ex,i}^t$ 远高于 RES 与 MG。随着迭代的深入,在提高自身收益的前提下,为达成交易,买电方和卖电方的报价策略逐渐趋同,最终 $P_{ex,i}^t$ 达到一致。对比三轮

迭代结果, $P_{ex,i}^t$ 逐渐减小,这是由于用户逐渐改变了报价系数。

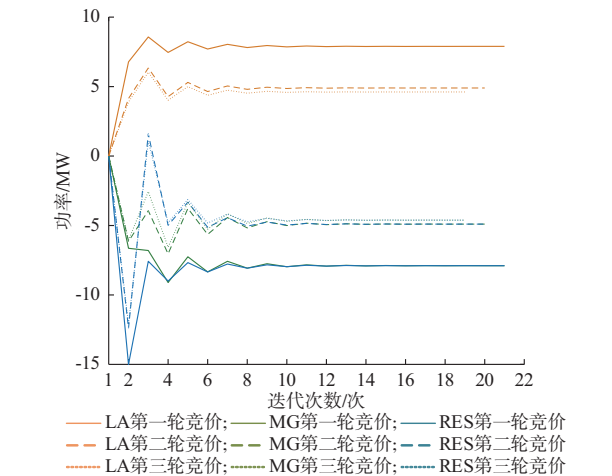


图 4 期望交易功率变化
Fig. 4 Changes of expected transaction power

用户间 $P_{ex,i}^t$ 达到一致后,超级用户调用潮流校核模型判断当前优化结果是否满足系统安全性约束,本文的电压安全约束范围为 $[0.9, 1.1]$ 。三轮竞价的潮流校核结果见附录 C 表 C3,三轮竞价中,系统潮流均满足安全性约束。

进行潮流校核后,进入期望交易电价修正阶段。买电方与卖电方通过更新报价系数优化 $\lambda_{ex,i}^t$,普通用户三轮报价曲线变化如图 5 所示,图 5 中标注了每一轮 ADMM 迭代得到的 $P_{ex,i}^t$,与各用户的报价曲线均有交点,该交点即为本轮该用户报价,若有卖方与买方报价一致,则达到了市场均衡。最终市场出清点如附录 C 图 C7 所示,三轮报价具体数值见附录 C 表 C4。

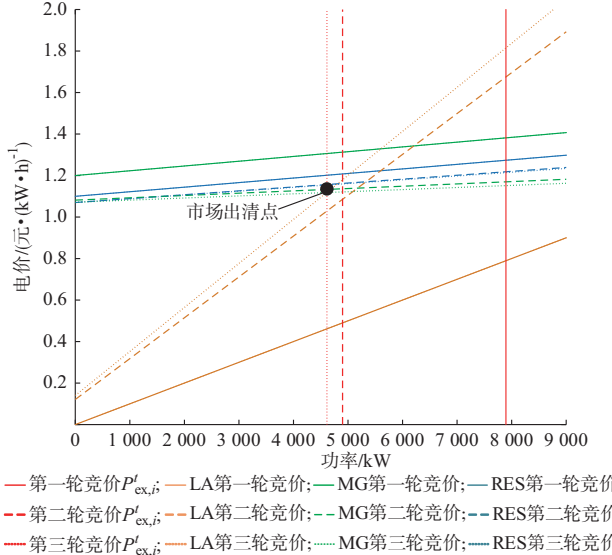


图 5 报价曲线变化
Fig. 5 Changes of quotation curves

观察图 5 和附录 C 表 C4 可知,随着竞价轮次的增加,LA 的报价曲线斜率逐步上升,LA 逐步抬高报价;MG 和 RES 的报价曲线斜率逐步下降,MG 和 RES 逐步降低报价。并且随着报价曲线的改变,为提高中标概率,用户间的 $P'_{ex,i}$ 也逐步下降,买卖双方报价逐渐接近。观察附录 C 图 C7 可知,在第三轮竞价中,LA 和 RES 的报价曲线在 $P'_{ex,i}$ 上有交集,双方达成交易,实现了市场出清,出清功率为 4 613 kW,出清电价为 1.12 元/(kW · h),出清结果通过出清函数记录在区块链中,出清函数调用过程见附录 C 图 C8。

5.4 交易执行和结算阶段仿真结果分析

市场出清后进入交易执行阶段,超级用户通过智能电表监控交易执行情况,当交易未按照出清结果进行时,超级用户将强制性地向交易双方买入/卖出一定电能,并通过交易修改函数修改合约中交易结果,本文默认交易顺利进行。

交易完成后,超级用户进行结算工作,由出清结果可知 LA 和 RES 间总交易额为 1 291.64 元。超级用户总共收取过网费用为 133 元,由 LA 和 RES 分摊。因此 LA 余额减少 135 814 代币,RES 余额增加 122 514 代币,超级用户余额增加 13 300 代币。

表 4 给出了达成市场交易前后用户的运行成本和公共连接点(point of common coupling,PCC)功率变化情况。在市场出清过程中,普通用户调用区域竞价模型,再次优化了区域内的可控负荷用电量、可控分布式电源出力和 PCC 功率,实现了市场条件下的区域经济性最优,因此参与市场前后普通用户成本和 PCC 功率变化量不是单纯的交易额和交易量的叠加。

表 4 用户运行成本和 PCC 功率变化
Table 4 Operation costs of users and power changes of PCC

普通用户	运行成本/元		PCC 功率/kW	
	参与市场前	参与市场后	参与市场前	参与市场后
LA	5 082.49	4 037.67	11 224.45	6 612.46
RES	-1 054.51	-2 906.59	-9 059.88	-8 447.54

对比表 5 中数据可知,参与市场后,LA 的成本下降了 20.6%,RES 的收益增加了 175.6%,用户自身经济性均得到了提高。同时,通过配电网内的能源自消纳,LA 的 PCC 功率下降了 41.1%,区域电网向大电网的购电量也相应下降,预防了用电高峰时段变压器的容量过载。

6 结语

为鼓励用户间开展良性竞争,推动电力交易市

场的发展。本文提出了弱中心化的电力市场交易机制,首先建立了普通用户和超级用户的市场模型,进而详述了双边市场实时竞价流程。运用 ADMM 实现了不完全信息下的分布式求解,达到市场均衡。随后就弱中心化市场交易支撑技术展开讨论,设计了基于区块链技术的智能合约具体应用方案,并在以太坊平台上验证。最后通过某配电网算例进行仿真分析,得到如下结论。

1)本文所提出的弱中心化交易机制与完全中心化市场交易机制相比,DSO 不再独立优化市场出清,用户可根据市场实时交易信息动态调整报价,还原了市场的自由竞争特性。通过参与市场,用户的经济性均得到了提高,实现了用户间的共赢。与去中心化市场交易机制相比,DSO 作为市场交易的监管者,制定一系列规范推动市场有序开展,保障了电力市场和整个电网的安全可靠性。

2)对整个配电网而言,鼓励用户间进行电力交易,可以促进资源合理配置和分布式能源有效消纳,达到削峰填谷的效果,同时配电网通过收取过网费,也保证了自身收益。

3)以区块链技术和智能合约为支撑,实现了交易的公开透明和自动化执行,降低了交易成本,为弱中心化的市场交易提供了可行的途径。

在建立用户决策层模型时,考虑风光出力和用户用电的不确定性以及该不确定性对用户报价策略的影响,将是下一步的主要研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 陈颖,江曦源,于智同,等.区域配电网内分布式电源和负载联盟交易模式设计和分析[J].电力系统自动化,2017,41(14):78-86. DOI:10.7500/AEPS20160605007.
CHEN Ying, JIANG Xiyuan, YU Zhitong, et al. Coalition trading mode design and analysis for distributed generators and loads in regional distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 78-86. DOI: 10.7500/AEPS20160605007.

[2] 孔祥瑞,李鹏,严正,等.售电侧放开环境下的电力市场压力测试分析[J].电网技术,2016,40(11):3279-3286.
KONG Xiangrui, LI Peng, YAN Zheng, et al. Stress testing on electricity market with retail transactions opened [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3279-3286.

[3] DAVID A K, WEN F. Market power in electricity supply[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(12): 67-68.

[4] 曾嘉志,赵雄飞,李静,等.用电侧市场放开下的电力市场多主体博弈[J].电力系统自动化,2017,41(24):129-136. DOI:10.7500/AEPS20170616005.
ZENG Jiazhi, ZHAO Xiongfei, LI Jing, et al. Game among multiple entities in electricity market with liberalization of power

- demand side market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 129-136. DOI: 10.7500/AEPS20170616005.
- [5] 谢青洋,应黎明,祝勇刚. 基于经济机制设计理论的电力市场竞争机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1709-1716. XIE Qingyang, YING Liming, ZHU Yonggang. Competitive power market mechanism design based on the designing economic mechanisms theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1709-1716.
- [6] 郝然,艾芊,姜子卿. 区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 194-201. DOI: 10.7500/AEPS20170612013. HAO Ran, AI Qian, JIANG Ziqing. Bi-level game strategy for multi-agent with incomplete information in regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 194-201. DOI: 10.7500/AEPS20170612013.
- [7] DOU C X, LIU B. Multi-agent based hierarchical hybrid control for smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 771-778.
- [8] 张炜,王秀丽. 基于分段竞价的售电侧需求响应策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 24-29. DOI: 10.7500/AEPS20170218006. ZHANG Wei, WANG Xiuli. Block bidding based demand response strategy for power sales side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 24-29. DOI: 10.7500/AEPS20170218006.
- [9] 张馨瑜,陈启鑫,葛睿,等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41. DOI: 10.7500/AEPS20170614006. ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41. DOI: 10.7500/AEPS20170614006.
- [10] 赵敏,沈沉,刘锋,等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857. ZHAO Min, SHEN Chen, LIU Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [11] KASBEKAR G S, SARKAR S. Pricing games among interconnected microgrids [C]// Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-8.
- [12] 沈俭荣,文云峰,郭创新,等. 基于产消方式的互联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.
- [13] 林静怀,米为民,叶飞,等. 智能调度建模技术中若干问题的研究[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 1-4. LIN Jinghuai, MI Weimin, YE Fei, et al. Several issues in modeling technique for intelligent dispatching [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 1-4.
- [14] 舒畅,钟海旺,夏清. 基于优化理论市场化的日前电力市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 55-62. SHU Chang, ZHONG Haiwang, XIA Qing. Day-ahead electricity market design based on market interpretation of optimization theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 55-62.
- [15] 李彬,曹望璋,张洁,等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 183-193. DOI: 10.7500/AEPS20170915012. LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on heterogeneous blockchain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193. DOI: 10.7500/AEPS20170915012.
- [16] 李彬,卢超,曹望璋,等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3691-3702. LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3691-3702.
- [17] 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.
- [18] NAKAMOTO S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [EB/OL]. [2008-09-08]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [19] 顾伟,任佳依,高君,等. 含分布式电源和可调负荷的售电公司优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 37-44. DOI: 10.7500/AEPS20170217005. GU Wei, REN Jiayi, GAO Jun, et al. Optimal dispatching model of electricity retailers considering distributed generator and adjustable load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 37-44. DOI: 10.7500/AEPS20170217005.
- [20] 刘敦楠,孟雅儒. 考虑非价格因素的售电公司竞争力分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 53-60. DOI: 10.7500/AEPS20161017005. LIU Dunnan, MENG Yaru. Analysis on competitiveness of electricity retailers considering non-price factor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 53-60. DOI: 10.7500/AEPS20161017005.
- [21] 李泓泽,何海峰,郭鑫. 厂网分开后独立发电企业竞争力评价的相关问题探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 7-10. LI Hongze, HE Haifeng, GUO Xin. Evaluation of independent generation's competition competence after separation of grid and generation [J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 7-10.
- [22] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation operation and control [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.
- [23] 刘连光,潘明,田世明,等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1618-1625. LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of a competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1618-1625.
- [24] POZO D, CONTRERAS J. Finding multiple Nash equilibria in pool-based markets: a stochastic EPEC approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1744-1752.
- [25] BOYD S, PARIKH N, CHU E. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers [J]. Foundations & Trends in Machine Learning, 2010, 3(1): 1-122.

窦晓波(1979—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:分布式电源(储能)变流器优化控制、分布式电源高渗透配电网、微电网运行控制与能量优化、智能变电站与电力通信。E-mail: dxb_2001@sina.com

曹水晶(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向:分布

式发电与微网、电力市场。E-mail: caoshuijing16@163.com

刘之涵(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式电源高渗透配电网、电力市场。E-mail: 213142917@seu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Trading Mechanism, Model and Technical Realization of Weakly-centralized Distribution Network Market

DOU Xiaobo^{1,2}, CAO Shuijing^{1,2}, LIU Zhihan^{1,2}, CAI Chao³, HAN Jun³, CHEN Xi³

- (1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
- 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology & Equipment (Southeast University), Nanjing 210096, China;
- 3. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: The renewed electricity reform has promoted the development of the bilateral open electricity market, and the interaction among market members is more flexible in the new structure. To guide the rational quotation and encourage healthy competition among members, firstly, an energy optimization model which contains interests of members and power losses is established. Secondly, a new weakly-centralized market mechanism is proposed. The mechanism designs market members, the frame and the process. In the market members, distribution system operator participates in the supervision of the market as super users and joins in market clearing with ordinary users. Ordinary users may weight the pros and cons and modify their offers many times in the clearing process, which restores characteristics of the electricity market for free competition and decentralized decision-making. Then, the alternating direction method of multipliers is used to clear the market, and market members can achieve market equilibrium by parallel computation with only a small amount of information, which can restrain the malicious bidding behavior caused by asymmetric cost information. Finally, a smart contract based on block chain technology is designed for the market mechanism. Through the example and the smart contract deployed on the private chain of Ethereum, the effectiveness of the proposed market mechanism is verified.

This work is supported by State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd. (No. J2018058) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777031).

Key words: bilateral open electricity market; market mechanism; weakly-centralized; information asymmetry; alternating direction method of multipliers; Ethereum