

基于智能经纪人的新型电力双边交易模式

周磊^{1,2}, 王建学¹, 白兴忠³, 朱明辉⁴, 姜正庭¹, 江宇峰¹, 丛立章¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 陕西电力交易中心有限公司, 陕西 西安 710048; 4. 国网陕西省电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要:针对当前电力双边市场的交易效率和业务透明度不高的问题,提出智能经纪人促进电力双边交易的构想。梳理当前电力双边市场存在的主要问题,设计智能经纪人的功能理念;分析市场主体的潜在价格让步空间,研究考虑潜在交易前景的个性化协同撮合方法;构建基于智能经纪人的新型电力双边交易模式,并开发配套智能交易平台。以某省电力市场数据进行市场模拟,算例结果表明,智能经纪人可以降低双边交易成本以及提高市场成交率。

关键词:电力双边交易;智能经纪人;协同撮合;市场模式

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204012

0 引言

随着国家进一步深化电力体制改革的推进,2015年初中共中央、国务院下发的《中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9号)提出,需引导市场主体开展多方直接交易,建立长期稳定的电力双边市场模式,形成公平规范的市场交易平台。现行的双边交易是由市场主体双方进行自主协商,即发电企业与电力大用户和售电公司采用线下交易、人工协商的模式来完成的。然而随着双边交易规模的扩大,交易主体在缺乏足够的信息和交易渠道的情况下,如何选择合适的交易对象成为了市场主体参与双边交易的关键和难点。信息不透明、缺乏交易渠道、市场主体多元化等问题严重影响了当前电力双边交易的进一步发展,探索适合新形势下的电力双边交易模式显得尤为迫切。

在主网侧双边交易中,国内外诸多学者从市场模式、电价机制、阻塞管理、网损分摊等角度对电力双边交易进行了研究。文献[1]提出考虑清洁能源消纳的多边发电权日内交易机制,构建多种类型能源日内发电权交易电量优化模型。文献[2]提出火电单边报价以及新能源与火电双边参与报价的市场交易机制。文献[3]提出考虑爬坡容量校验的灵活爬坡辅助服务,结合调频、调峰辅助服务,设计面向高比例风电市场化消纳的现货电能量与各类辅助服务联合运营的市场机制。文献[4]设计基于复合撮合机制的电力市场模式,将集中竞价和双向挂牌进行融合。文献[5]设计双边交易、集中撮合交易和面对面挂牌交易相结合的全新电力市场交易机制。文

献[6]在单边挂牌交易的基础上提出发电侧双向挂牌的竞价机制,并设计交易组织流程和市场出清算法。文献[7]提出考虑用户报价比例进行市场出清的用电侧市场竞价机制,并给出针对市场机制竞价公平性的评价指标体系。文献[8]提出跨省区电力市场交易的设计思路、交易机制和模式,给出考虑资源协调配置的多种优化目标架构、交易模式,构建跨省区电力交易安全校核机制。上述研究针对双边交易撮合模型、竞价机制、市场机制进行了有益的探索,但较少涉及利用市场交易信息促进双边交易,因此,有必要研究如何利用合理信息促进市场交易。

随着能源互联网的发展和新型市场主体的出现,学者对新型交易模式进行了较多的研究。文献[9]讨论未来分散式电力市场相关概念,并建立多层次分散式电力市场结构。文献[10]基于双边合同网络提出点对点能源交易的市场设想。文献[11]构建基于区块链技术的交易框架,并对涉及的技术和智能合约的制定进行探讨。文献[12]构建去中心化的配电网交易机制,基于区块链智能合约实现配电网市场主体间的点对点交易。文献[13]提出基于区块链和连续双向拍卖的微电网电力直接交易模式。文献[14]设计考虑现货市场交易需求的分布式电力交易机制,并基于区块链和智能合约技术搭建配套的分布式交易平台。文献[15]针对分布式交易小量、高频的特性,基于连续双向拍卖提出计及动态过网费的点对点多轮交易机制。文献[16]提出适用于分布式消费者对消费者C2C(Consumer to Consumer)能源交易的能源经纪人模式,提高了市场效率并促进了区域市场平衡。文献[17]提出一种基于区块链的集成能源管理平台,市场参与者可在该平台实现双边交易。上述关于电力双边交易的研究主要集中在交易模式和市场机制上,为在该框架下研究如何引入智能经纪人以促进交易达成提供了有益的参考。

收稿日期:2021-10-20;修回日期:2022-02-21

在线出版日期:2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777155)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777155)

在上述背景下,本文针对现行电力双边交易信息不透明、市场活跃度低的问题,设计基于智能经纪人的新型电力双边交易模式,并对交易双方无自然交易价差空间的情况进行重点研究,通过算例论证了智能经纪人可以促进市场交易,有效提高市场效率。首先,分析现行电力双边交易待解决的问题;然后,构想新型电力双边交易模式中智能经纪人的理念与功能,并给出考虑潜在交易前景的协同撮合方法;最后,提出新型电力双边交易模式的总体框架,并通过算例分析验证了所提模式的有效性。

1 现行电力双边交易的问题

电力双边交易不断发展,取得了显著的成绩,但是随着市场的推进和放开,市场主体数量增加,尤其是中小容量市场主体,这使现行电力市场双边交易模式出现如下问题。

1) 现行场外双边协商的模式适用于市场主体数量不多的情况,当市场主体变多时,该模式需要耗费大量的沟通成本。对于中小型的电力用户而言,寻找、更换合适的售电公司代理也比较困难。

2) 在双边谈判中,市场主体的话语权和议价权受其容量影响较大,这意味着小容量的发电企业、售电公司和电力用户市场竞争力偏弱。

3) 市场主体参与双边交易需要不断寻找合适的交易对象,若对市场交易情况缺乏必要的了解,则可能无法做出合理高效的市场决策。

4) 双边协商由交易双方市场主体自主达成交易,业务不透明,不利于进行市场合规监管以促进市场持续健康发展。

5) 随着业务量的增大,中小电力用户数量激增、电力市场信息混杂,这导致协商撮合交易和市场信息分析需求大幅增加,但当前面向电力双边交易的系统平台智能化程度普遍不高。

2 智能经纪人的构想和设计

2.1 电力交易智能经纪人构想

相较于证券交易市场,电力市场中的交易主体规模较小且活跃度较低,因此不能如同证券交易市场面向市场实时公开交易信息,否则极易暴露市场主体的私密信息。同时,规模小意味着如果缺乏交易信息参考和引导,电力市场的交易效率就无法提高。因此,引入符合电力市场法规的智能经纪人来解决这些问题是有必要的。

面向当前双边交易不同市场主体差异化的交易诉求,本文提出智能经纪人的理念构想,即通过持续自适应学习实现个性化撮合双边交易的虚拟经纪人,他可以与市场主体进行互动,分析市场主体的意愿和诉求,专业精准地促进市场主体达成交易。

引入智能经纪人参与交易的实质是将场外协商交易场内化,降低用户交易成本,提升市场效率。智能经纪人的核心功能在于:通过与用户的积极互动,有效提升市场主体参与市场的用户体验;对市场信息和交易数据进行综合分析,为用户提供定制化的交互服务;分析不同市场主体的交易成本和行为特征,为市场主体提供个性化的交易建议。与当前撮合交易方式中的“全局最优、统一出清”不同,由于本文的智能经纪人扮演交易中间人的角色,在撮合交易方式下不仅可以进行购电价不低于售电价的交易出清,而且可以对购电价低于售电价的交易双方进行交易建议以促进交易达成,提高市场效率。

2.2 智能经纪人特色

智能经纪人对市场主体进行数据分析和用户画像,为市场主体提供个性化定制服务,按匹配度和市场评级序列推荐潜在交易对象,其具有用户画像、实时交互、回溯分析、成交预测、价格建议、智能推荐、订单定制和托管代理这些特色功能。

智能经纪人的智能性主要体现在3个方面:根据市场信息在合理范围内随机给出若干个参考价格,确保在不泄露个人信息的前提下给予交易主体适当的参考;根据当前交易双方的买卖价格差距、市场氛围以及市场主体的个体属性和交易风格进行个性化的价格让步建议,以促进交易达成;结合市场主体对价格让步建议的反应,从多个时间尺度来修正市场主体的价格让步因子,具备定制化服务的能力。

3 考虑潜在交易前景的协同撮合方法

3.1 价格让步空间

假设在双边交易平台某个已开辟的市场中,有 m 个售电订单、 n 个购电订单未达成交易。智能经纪人首先对购售电订单的成交顺序进行排序,排序原则为“电价优先,时间优先,电量优先”,即:智能经纪人对售电订单按照价格由低到高的顺序排序,当价格相同时,按照下单时间由早到晚的顺序排序,当下单时间也相同时,按照订单电量由大到小的顺序排序;同时对购电订单按照价格由高到低的顺序排序,当价格相同时,按照下单时间由早到晚的顺序排序,当下单时间也相同时,按照订单电量由大到小的顺序排序。最终处理后的售电和购电订单序列分别为:

$$L^S = (S_1, S_2, \dots, S_m)^T \quad (1)$$

$$L^B = (B_1, B_2, \dots, B_n)^T \quad (2)$$

式中: L^S 、 L^B 分别为售电和购电订单序列; S_i ($i=1, 2, \dots, m$)、 B_j ($j=1, 2, \dots, n$)分别为第 i 个售电订单和第 j 个购电订单,2类订单均包含电量和电价。

由于只存在尚未交易的订单留在市场中准备交易,此时订单 S_i 的报价高于订单 B_j 的报价,即售电

订单的最低售电价格高于购电订单的最高购电价格。对于售电方,各订单的价格让步空间为该订单价格与购电订单的最高价格之差,这是由于售电方想通过修改订单价格来达成交易,根据交易原则,首先与其达成交易的是订单价格最高的购电方。同理,对于购电方,各订单的价格让步空间为该订单价格与售电订单的最低价格之差。由此,得到各订单的价格让步空间净值为:

$$\Delta P^S = (S_1^p - B_1^p, S_2^p - B_1^p, \dots, S_m^p - B_1^p)^T \quad (3)$$

$$\Delta P^B = (S_1^p - B_1^p, S_1^p - B_2^p, \dots, S_1^p - B_n^p)^T \quad (4)$$

式中: ΔP^S 、 ΔP^B 分别为售电和购电用户订单的价格让步空间; $S_i^p (i=1, 2, \dots, m)$ 、 $B_j^p (j=1, 2, \dots, n)$ 分别为按价格排序的第*i*个售电订单价格和第*j*个购电订单价格。

为进一步解释价格让步空间的计算过程,附录A图A1给出了价格排序后的市场出清序列,图中为无交易空间时排序后的购售电双方订单,双向箭头长度表示让步空间大小。当任一售电(购电)用户将订单价格向下(向上)调整,均能立刻达成交易。然而,市场主体通常是不愿意进行大幅价格让步的,且不同用户的初始申报价格和市场行为偏好不同,直接采用价格让步空间进行交易建议不仅无法考虑用户的个性化需求,还存在暴露用户真实报价的风险。

3.2 综合价格建议

由于直接通过价格让步空间净值给出价格建议存在不足,因此,智能经纪人应对价格让步空间进行合理测算,使用户愿意接受其提供的价格建议,此处引入价格让步因子。在市场交易中,每个订单的申报价格不同,用户对不同订单价格变化的心理承受力也不同,且随着价格的变化其心理也会出现变化,因此,智能经纪人的价格建议可通过下列方法计算:

$$\rho^S = L^{S,p} - \delta^S \circ \Delta P^S \quad (5)$$

$$\rho^B = L^{B,p} + \delta^B \circ \Delta P^B \quad (6)$$

式中: ρ^S 、 ρ^B 分别为智能经纪人对售电和购电订单的价格建议值; $L^{S,p}$ 、 $L^{B,p}$ 分别为基于价格排序的售电和购电订单序列; $\delta^S = (\delta_1^S, \delta_2^S, \dots, \delta_m^S)^T$ 、 $\delta^B = (\delta_1^B, \delta_2^B, \dots, \delta_n^B)^T$ 分别为售电和购电订单序列对应的价格让步因子序列, $\delta_i^S (i=1, 2, \dots, m)$ 、 $\delta_j^B (j=1, 2, \dots, n)$ 分别为第*i*个售电订单和第*j*个购电订单的价格让步因子;“ \circ ”表示两向量同位置元素相乘得到Hadamard乘积。

各订单的个性化价格考虑从长期和短期2个时间尺度进行修正。其中:长期时间尺度主要考虑用户个体差异,其在一定时间段内相对稳定;短期时间尺度主要考虑市场交易情况,其随时间变化。长期时间尺度下的价格让步因子根据不同用户的性格偏好和行为响应进行修正,具有个性化的特点;短时

间尺度下的价格让步因子根据每日全市场用户对智能经纪人价格建议的响应进行修正,具有全局性的特点。引入权重对2个时间尺度下的价格让步因子进行线性组合,即可得到同时考虑用户个体特性与市场全局形势的综合价格让步因子,如式(7)所示。

$$\begin{cases} \delta = \lambda^{LT} \delta^{LT} + \lambda^{ST} \delta^{ST} \\ \lambda^{LT} + \lambda^{ST} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: δ 为长期和短期2个时间尺度下的综合价格让步因子; δ^{LT} 、 δ^{ST} 分别为长期和短期时间尺度下的价格让步因子; λ^{LT} 、 λ^{ST} 分别为长期和短期时间尺度下的价格让步因子权重,其值可以根据2个时间尺度下价格让步因子修正效果的差异进行动态调整,例如,当通过长期时间尺度下价格让步因子修正达到的促进交易的效果优于通过短期时间尺度下价格让步因子修正达到的效果时,可以增大 λ^{LT} ,减小 λ^{ST} 。

3.2.1 长期时间尺度下的价格让步因子修正

长期时间尺度下价格让步因子的修正公式为:

$$\delta^{LT} = \delta_0^{LT} + \alpha I_A(x) - \beta J_B(u) \quad (8)$$

式中: δ_0^{LT} 为各用户的初始性格量化因子,其值可通过性格测试等方法进行量化; α 为性格量化正反馈系数; β 为性格量化负反馈系数; $I_A(x)$ 、 $J_B(u)$ 为指示函数,如式(9)所示, x 为用户的价格建议响应反馈变量,定义域为{接受建议,未响应}, u 为用户未响应时间计数变量,其值随时间递增。

$$\begin{cases} I_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \\ J_B(u) = \begin{cases} 1 & u \in B \\ 0 & u \notin B \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

$$A = \{\text{接受建议}\} \quad (10)$$

$$B = \{u | u \geq M\} \quad (11)$$

式中: M 为时间限定值,当 $u=M$ 时,进行价格让步因子调整,将计数变量清零,使其重新进行计数。当通过指示函数 $I_A(x)$ 感知到用户选择接受建议价格时,性格量化正反馈系数 α 有效;当通过指示函数 $J_B(u)$ 感知到用户未响应价格建议的时间计数达到一定值时,性格量化负反馈系数 β 有效。

具体而言:当用户在一段时间内不断接受智能经纪人的价格建议时,说明该用户的行为响应较积极,增大价格让步因子可使订单更快成交,例如,当用户申报了激进的价格,且持续接受价格建议时,智能经纪人就会建议该用户加大价格让步幅度;当用户不愿意接受智能经纪人的价格建议时,说明该用户对于交易有较高的心理预期,减小价格让步因子使价格建议与当前价格之差变小,更有利于用户逐渐接受价格建议,例如,当用户的报价较为保守时,其只愿意接受申报的订单价格的小幅变动。

3.2.2 短期时间尺度下的价格让步因子修正

短期时间尺度下的价格让步因子修正公式为:

$$\delta^{\text{ST}} = \delta_0^{\text{ST}} + \gamma I_c(y, z) - \varepsilon J_D(y, z) \quad (12)$$

式中: δ_0^{ST} 为默认的当日市场初始价格让步因子; γ 为市场分析正反馈系数; ε 为市场分析负反馈系数, $I_c(y, z)$ 、 $J_D(y, z)$ 为指示函数, 如式(13)所示。

$$I_c(y, z) = \begin{cases} 1 & (y, z) \in C \\ 0 & (y, z) \notin C \end{cases} \quad (13)$$

$$J_D(y, z) = \begin{cases} 1 & (y, z) \in D \\ 0 & (y, z) \notin D \end{cases}$$

$$C = \{(y, z) | y \geq \xi^+, z \leq \eta^-\} \quad (14)$$

$$D = \{(y, z) | y \leq \xi^-, z \geq \eta^+\} \quad (15)$$

式中: y 为用户接受建议率; z 为用户接受建议后的成交率; ξ^+ 、 ξ^- 分别为设定的用户接受建议率的参考高、低值; η^+ 、 η^- 分别为设定的用户接受建议后成交率的参考高、低值。当通过指示函数 $I_c(y, z)$ 感知到该日全市场用户接受价格建议率不低于设定值 ξ^+ 而用户接受建议后的成交率不高于设定值 η^- 时, 市场分析正反馈系数 γ 有效; 当通过指示函数 $J_D(y, z)$ 感知到该日全市场用户接受价格建议率不高于设定值 ξ^- 而用户接受建议后的成交率不低于设定值 η^+ 时, 市场分析负反馈系数 ε 有效。

具体而言: 当用户不断接受智能经纪人的价格建议但是成交率却较低时, 说明价格让步因子过于保守使得该用户接受价格建议的意愿很高, 但是价格让步幅度不明显导致即使该用户接受价格建议成交率也较低, 因此, 智能经纪人上调价格让步因子; 当用户接受智能经纪人的价格建议率较低但是接受价格建议后的成交率较高时, 说明价格让步因子过于激进使得一旦该用户接受价格建议其成交率就较高, 但是价格让步幅度过大导致该用户不愿意接受智能经纪人的价格建议, 因此, 智能经纪人下调价格让步因子。

需要指出的是, 公式的初始修正参数主要是从电力市场运营经验角度进行设定的, 在实际电力市场中, 可以根据实际运行数据对公式的修正参数进行自学习调整, 以便更好地契合真实市场交易行为。

4 新型电力双边交易模式总体框架

综上所述, 针对当前电力市场双边交易模式的实际需求, 以中长期合同电量交易为背景, 结合我国《电力中长期交易基本规则》和多种交易模式的优点, 本文提出基于智能经纪人的新型电力双边交易模式, 将集合竞价、连续竞价和智能经纪人撮合3种模式进行融合。其中, 集合竞价实现价格发现功能,

连续竞价保证市场主体的交易自由度, 智能经纪人撮合提高市场成交率和用户体验。

4.1 新型电力双边交易流程设计

新型电力双边交易流程如附录A图A2所示。发电企业和电力用户可在市场持续时间内的任意时间进行电量电价申报。不同于曲线形式的传统报价, 市场中各成员按照订单的形式进行申报, 用户可在订单中设置意向的交易价格、购售电量、订单偏好等信息。智能经纪人实时收集场上的订单信息, 按照“电价优先, 时间优先, 电量优先”的原则对发电企业的售电订单和电力用户的购电订单进行撮合交易, 以购售电协议的形式给能够达成交易的用户发送交易确认信息。当智能经纪人匹配的双方均进行交易确认后即为达成交易。若双方中有一方未确认交易, 则判定该轮交易失败, 订单重新回到交易队列中。

4.2 双边交易流程的典型场景

1) 集合竞价交易。集合竞价作为一种价格发现机制, 可以对连续双边竞价提供价格指导, 主要适用于市场开盘和收盘, 提供市场的开盘价和收盘价。由于集合竞价没有价格结算差异, 同时交易发生在集中的时段, 有效地避免了交易发散和信息不对称, 因此, 集合竞价的价格稳定性较高, 其产生的价格是电力市场主体参与后续交易的有效参考指标。

2) 连续竞价交易。连续竞价交易是指市场交易主体双方能够即时增减交易订单, 若满足交易条件, 则可实时成交的交易模式。当订单进入市场后, 智能经纪人检测是否有符合交易需求的订单, 若有, 则完成交易并记录交易信息, 然后更新交易队列, 继续等待满足交易需求的新订单出现, 直至该市场结束。

3) 智能经纪人撮合交易。智能经纪人撮合订单达成交易是对暂时无法达成交易的订单提供交易建议的过程。智能经纪人撮合订单达成交易伴随着连续双边竞价, 即智能经纪人需实时感知市场上的订单情况, 对满足交易条件的订单进行撮合交易并记录交易信息。智能经纪人撮合交易流程如附录A图A3所示。智能经纪人通过检测市场现存订单信息, 结合不同用户的交易风格给出价格建议, 并实时推送市场信息为市场主体交易提供参考。订单达成交易则视为交易双方签订中长期合同, 按照时间尺度分解电量, 并交由电力调度机构进行安全校核。

5 算例分析

5.1 算例简介

以某省电力交易中心公开的2019年下半年的双边协商情况为例, 对实际系统改进后进行市场模拟。算例中参与电力交易的共有25家发电企业、53家售电公司以及75家全电量交易大用户。发电企业交易限额为23 654 615 MW·h, 售电公司总核算

电量为 296 648 MW·h,全电量电力大用户总核算电量为 8 871 746 MW·h。

5.2 市场模拟设定

本文设定场外协商双边交易和场内智能双边交易 2 个方案进行市场模拟。考虑到市场报价具有偶然性和随机性,本文市场模拟中的交易报价采用区间随机报价生成,即给定报价区间和概率,但不固定每次报价的具体数值,这样不仅能确保 2 个方案的统计规律相同,还能体现个体报价的差异性和波动性。

用户在参与市场时有保持价格不变、自主修改价格和接受价格建议这 3 种行为。自主修改价格的触发机制采用概率触发,即对不同类型的市场主体设定不同的改价概率、价格均值、价格区间和改价方差。场外协商双边交易的用户行为是保持价格不变或自主修改价格,对应的概率分别为 θ^{offsite} 和 $1-\theta^{\text{offsite}}$;场内智能双边交易的用户行为是保持价格不变或接受价格建议,对应的概率分别为 θ^{onsite} 和 $1-\theta^{\text{onsite}}$ 。

为了保证模拟结果的可比性,从控制变量法的原则出发,2 个对比方案中仅存在自主修改价格和接受价格建议的不同,其他参数全部保持一致。考虑到市场主体决策应该是独立的,各主体倾向于为自身谋取更多的交易剩余,其进行价格让步的概率不宜设置得过高,因此,设定 $\theta^{\text{offsite}}=0.9, \theta^{\text{onsite}}=0.9$ 。

5.3 模拟结果分析

5.3.1 成交电量

2 个方案的成交电量如图 1 所示。由图可知:场外协商双边交易和场内智能双边交易中总的成交电量分别为 8 999 703 MW·h 和 9 168 394 MW·h,有智能经纪人参与市场可以提高 168 691 MW·h 的成交电量。在一次成交中,场外协商双边交易和场内智能双边交易中的申报直接成交电量基本相当,分别为 6 131 336 MW·h 和 6 124 982 MW·h,差值为 6 354 MW·h,约占申报直接成交电量的 1%,属于正常的报价偏差;在二次成交中,市场主体通过自主修改价格增加 2 868 367 MW·h 的成交电量,通过接受智能经纪人价格建议增加 3 043 412 MW·h 的成交电量,后者比前者增加 175 045 MW·h 的成交电量。

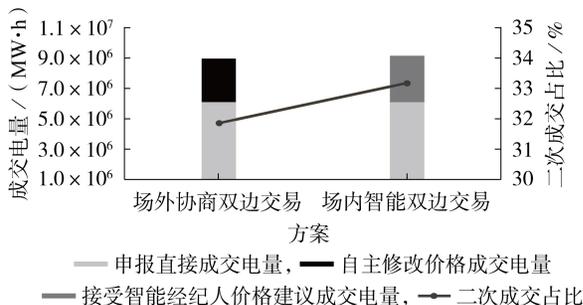


图1 成交电量示意图

Fig.1 Schematic diagram of trading electricity

此外,结合算例初始设定的购售电双方目标交易电量可知,场内智能双边交易中购电方几乎全部达成交易,满足自身购电需求,这说明智能经纪人可以促使购售电双方达成交易需求,直至一方没有缺额,增加的交易电量为购售电双方的交易电量与目标交易电量之差,因此,智能经纪人在促进市场主体达成交易需求、提高市场成交率方面的效果显著。

5.3.2 成交电价

2 个方案的平均成交电价如图 2 所示。由图可知,场外协商双边交易和场内智能双边交易中申报直接成交的平均电价均为 0.338 元 / (kW·h),但是市场主体通过自主修改价格和接受智能经纪人价格建议成交的平均成交电价却相差较大,分别为 0.331 元 / (kW·h) 和 0.283 元 / (kW·h),其原因在于:自主修改价格成交完全取决于市场主体自身交易偏好,市场主体对全市场交易情况和供需关系缺乏全局认识,存在信息不对称等问题,这导致市场主体自主修改价格的行为不够高效,尤其是当发电企业缺乏对当前市场供需关系(供大于求)的认识时,就不会出现较大的价格让步;在接受智能经纪人价格建议成交中,智能经纪人对供需关系和市场交易情况进行全局分析,当判定市场供大于求时,其会建议发电企业进行较大幅度价格让步以尽快促成交易,由于达成交易的发电企业都愿意进行价格让步,因此出现了价格大幅下降的现象。综上,智能经纪人能对市场交易情况进行全局判断,迅速给出合理的交易价格建议,以提高市场成交率,减少市场投机行为。

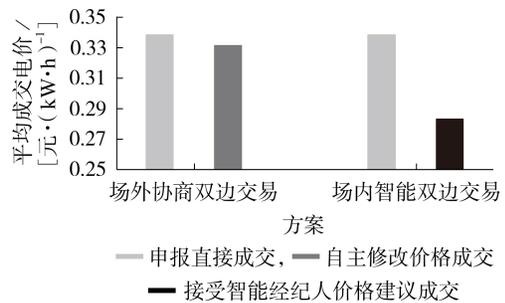


图2 平均成交电价示意图

Fig.2 Schematic diagram of average trading electricity price

图 3 给出了 2 个方案中 4 种交易状态的成交电价分布。由图可知:在无智能经纪人参与各交易状态(场外协商双边交易中的申报直接成交、场外协商双边交易中的自主修改价格成交和场内智能双边交易中的申报直接成交)中,价格分布较为相似,均集中于 0.325~0.355 元 / (kW·h) 范围内,这说明在没有智能经纪人进行价格建议时,市场主体的交易行为同质化较为明显,导致成交率不够高;场内智能双边交易中的接受智能经纪人价格建议成交的成交

电价明显低于其他3种交易状态,这说明智能经纪人可以根据市场情况(供大于求)建议发电企业进行较大的价格让步以达成交易。

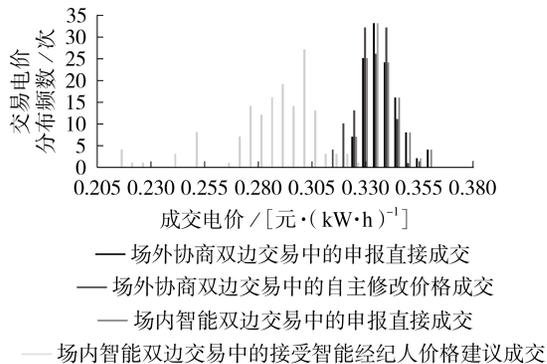


图3 成交电价分布示意图

Fig.3 Schematic diagram of trading electricity price distribution

5.3.3 社会福利

社会福利为消费者剩余与生产者剩余之和,消费者剩余为购电方报价与实际成交电价的价差乘以实际成交电量,生产者剩余为实际成交电价与售电方报价的价差乘以实际交易电量。通过对比2个方案的社会福利来分析智能经纪人提高市场效率的效果,结果如图4所示。由图可知,场外协商双边交易和场内智能双边交易中申报直接成交的社会福利基本相当,分别为46 626.6万元和46 632.9万元,总的社会福利分别为69 481.9万元和76 312万元,场内智能双边交易中总的社会福利比场外协商双边交易高出6 830.1万元,通过接受智能经纪人价格建议可以提高9.8%的社会福利。

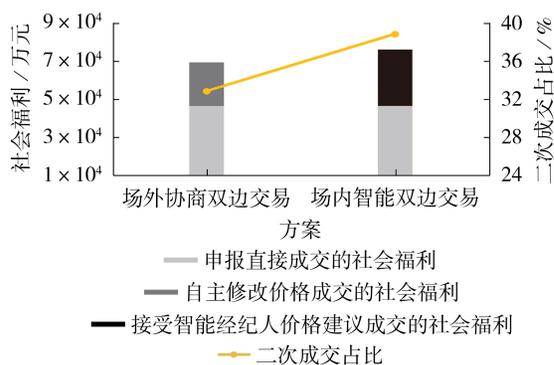


图4 社会福利示意图

Fig.4 Schematic diagram of social welfare

5.3.4 单个市场主体成交分析

为了更好地体现市场主体成交细节,选取单个市场主体的交易过程进行分析。附录A图A4给出了某购电主体在2个方案中的成交细节对比图。由图可知,该购电主体申报了2段交易,第1段以0.420元/(kW·h)的价格申报391 200 MW·h的电量,

第2段以0.300元/(kW·h)的价格申报112 800 MW·h的电量,其中第1段以0.355元/(kW·h)的价格直接完成交易,第2段交易无法直接成交。在无智能经纪人参与时,市场主体通过3次自主修改价格,最终以0.332元/(kW·h)的价格完成第2段全部电量交易;在有智能经纪人参与时,市场主体先接受1次智能经纪人价格建议,以0.311元/(kW·h)的价格完成第2段中7 295 MW·h电量的成交,然后,又接受1次智能经纪人价格建议,以0.327元/(kW·h)的价格完成第2段中剩余105 505 MW·h电量的交易。

6 结论

针对电力双边交易中因大量中小用户进入而带来的成交率问题,本文通过分析当前电力双边市场存在的主要问题,构想智能经纪人促进交易的理念和功能,研究潜在交易主体价格让步空间,给出考虑潜在交易前景的个性化协同撮合方法,由此提出基于智能经纪人的新型电力双边交易模式,并进行配套智能交易平台开发。

算例结果表明,智能双边交易模式可以显著增加成交电量和社会福利,缩短交易等待时间,减少市场投机行为,提高市场透明度和稳定性,进而提高电力双边市场整体效率,验证了基于智能经纪人的新型电力双边交易模式的先进性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘闯,李凤婷,晁勤,等. 考虑清洁能源消纳的多边发电权交易新型模式[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):92-98.
LIU Chuang, LI Fengting, CHAO Qin, et al. Novel transaction mode of multilateral power generation rights considering clean energy consumption[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 92-98.
- [2] 张敏,王建国,王秀丽,等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):84-91.
ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 84-91.
- [3] 陈青,吴明兴,刘英琪,等. 面向风电市场化消纳的现货电量-辅助服务联合运营机制[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):179-188.
CHEN Qing, WU Mingxing, LIU Yingqi, et al. Joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for wind power market-oriented accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 179-188.
- [4] 王林,李晨,刘嘉佳,等. 基于复式竞价撮合的电力市场交易模式设计与实践[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):188-195.
WANG Lin, LI Chen, LIU Jiajia, et al. Design and practice of electricity market trading mode based on compound bidding matchmaking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 188-195.
- [5] 杨强,蔡华祥,严明辉,等. 基于激励相容与深度博弈的云南电力市场机制设计及应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):

- 27-34.
YANG Qiang, CAI Huaxiang, YAN Minghui, et al. Design and application of electricity market mechanism for Yunnan based on theory of incentive compatibility and game in depth[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 27-34.
- [6] 张茂林, 黄宋波, 涂启玉, 等. 一种基于挂牌的电力市场竞价模式与实践[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 434-440.
ZHANG Maolin, HUANG Songbo, TU Qiyu, et al. An electricity market bidding model and practice based on listing[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 434-440.
- [7] 舒畅, 钟海旺, 夏清. 兼顾效率与公平的用电市场竞价机制研究[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 681-686.
SHU Chang, ZHONG Haiwang, XIA Qing. A design of electricity market bidding mechanism considering efficiency and fairness[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 681-686.
- [8] 尚金成. 跨区跨省电力交易机制与风险控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 53-58, 63.
SHANG Jincheng. Mechanism and risk control strategies for trans-regional and trans-provincial power exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 53-58, 63.
- [9] YIN S F, WANG J H, QIU F. Decentralized electricity market with transactive energy—a path forward[J]. The Electricity Journal, 2019, 32(4): 7-13.
- [10] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [11] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [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] 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, 5304.
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, 5304.
- [14] 孟仕雨, 孙伟卿, 韩冬, 等. 支持现货市场的分布式电力交易机制设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 151-158.
MENG Shiyu, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Design and implementation of decentralized power transaction mechanism to spot market[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 151-158.
- [15] 吴治国, 刘继春, 张帅, 等. 多售电主体点对点交易模式及其动态过网费机制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 100-108.
WU Zhiguo, LIU Jichun, ZHANG Shuai, et al. Peer-to-peer transaction model of multiple power sellers and its dynamic network fee mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 100-108.
- [16] CHEN T, SU W C. Indirect customer-to-customer energy trading with reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4338-4348.
- [17] VAN LEEUWEN G, ALSKAIF T, GIBESCU M, et al. An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114613.

作者简介:



周磊

周磊(1994—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为电力系统运行、电力市场(E-mail: 750282510@qq.com);

王建国(1976—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与运行、新能源与分布式发电、电力市场等(E-mail: jxwang@xjtu.edu.cn);

白兴忠(1966—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统调度、电力市场(E-mail: bai-xingzhong@163.com)。

(编辑 王锦秀)

New electricity bilateral trading mode based on smart broker

ZHOU Lei^{1,2}, WANG Jianxue¹, BAI Xingzhong³, ZHU Minghui⁴, JIANG Zhengting¹,
JIANG Yufeng¹, CONG Lizhang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China;

3. State Grid Shaanxi Power Exchange Center, Xi'an 710048, China;

4. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the problem of low trading efficiency and business transparency in the current electricity bilateral market, a concept of smart broker promoting electricity bilateral trading is proposed. The main problems existing in the current electricity bilateral market are sorted out, and the functional concept of smart broker is designed. The potential price concession space of market entities is analyzed, and the personalized collaborative matching method considering potential trading prospect is researched. A new electricity bilateral trading mode based on smart broker is constructed, and the corresponding smart trading platform is developed. The data of electricity market in a certain province is taken for market simulation, and case results show that smart broker can reduce bilateral trading cost and improve market trading efficiency.

Key words: electricity bilateral trading; smart broker; collaborative matching; market mode

附录 A:

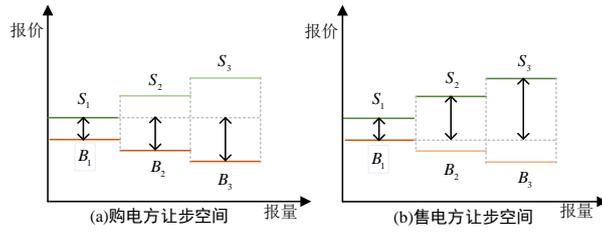


图 A1 购售电方的价格让步空间

Fig.A1 Price concession space for electricity sellers and buyers

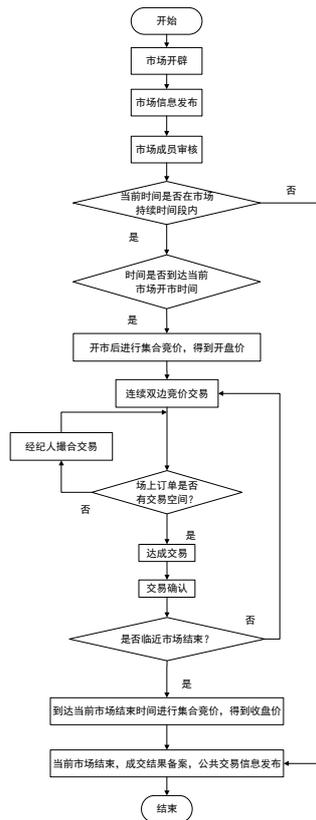


图 A2 双边交易流程

Fig.A2 Flowchart of bilateral trading

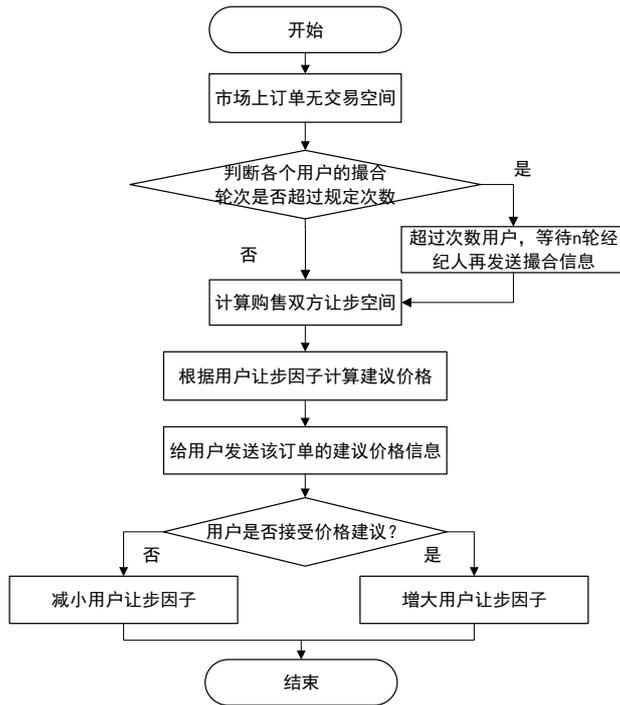


图 A3 智能经纪人撮合交易流程

Fig.A3 Flowchart of smart broker matchmaking trading

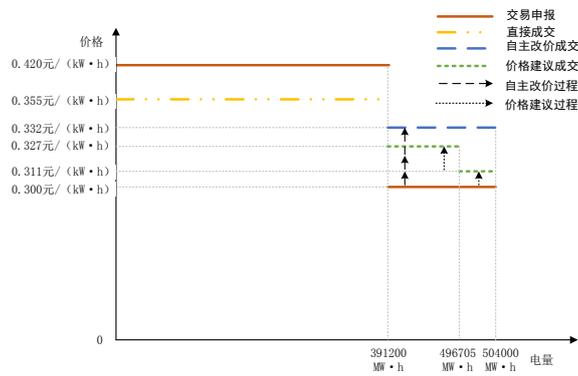


图 A4 单个市场主体成交细节图

Fig.A4 Detail trading diagram of single market entity