

含双边储备市场及绿证交易的现货市场分析

魏震波, 隋东旭, 王瀚琳, 关翔友, 杨皓钦

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 构建适宜于清洁能源消纳的现货市场是当前我国电力市场的建设重点, 提出一种含双边储备市场及绿证交易的现货市场交易机制。首先, 引入促进风电并网交易的绿色证书交易机制。结合当前国内清洁能源市场形势, 提出绿证强制交易配额制度, 确定绿色证书交易数额及定价模型。其次, 为减少风电因投标偏差产生的高额考核费用, 引入风电商参与购售电交易的双边储备市场。在该市场机制下, 火电商作为交易电量的提供者与风电商进行购售博弈。采用古诺模型和鲁宾斯坦模型相结合后的变形模型, 对双边储备市场的交易电量和交易电价进行求解。然后, 通过蒙特卡洛模拟和场景缩减技术模拟风电的实际出力, 代入函数模型对发电商的利润进行求解。仿真结果表明, 同时参与日前市场与双边储备市场进行交易的风电商可以合理规避偏差惩罚, 同时各个发电商的购售利润均有提升, 验证了所提模型的合理性和有效性。

关键词: 风电并网; 绿证交易; 偏差处理; 双边储备市场; 博弈均衡模型

Spot market analysis including bilateral reserve market and green certificate trading

WEI Zhenbo, SUI Dongxu, WANG Hanlin, GUAN Xiangyou, YANG Haoqin

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The construction of a spot market which is suitable for clean energy consumption is a focus of China's current power market. A spot market trading mechanism with bilateral reserve markets and green credentials transactions is proposed. First, a green certificate trading mechanism is introduced to promote wind power grid-connected transactions. Combined with the current domestic clean energy market situation, this paper presents a green certificate mandatory trading quota system and determines the green certificate transaction amount and pricing model; second, to reduce the high assessment fee of wind power due to bid bias, a bilateral reserve market is introduced in which wind power suppliers participate in the purchase and sale of electricity. Under this market mechanism, the thermal power supplier is regarded as a supplier of trading power to play with the wind power supplier in the purchase and sale game. The post-deformation model which is based on the Cournot model and the Rubinstein model are employed to determine the transaction volume and transaction price of the bilateral reserve market. Then, a function model is used to determine the profit of the generator by simulating the actual output of wind power through Monte Carlo simulation and scene reduction technology. The simulation results show that the wind power suppliers who participate in the trading between the market and the bilateral reserve market can reasonably avoid the deviation penalty, and the profit of each generator is improved. This verifies both the logic and effectiveness of the proposed model at the same time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807125).

Key words: wind power integration; green credentials transactions; deviation penalty; bilateral reserve market; game equilibrium model

0 引言

近年来, 随着风电装机容量的快速增长, 风力

发电波动性导致的弃风问题愈加严峻。同时大规模的风电并网给电力系统的稳定运行带来了巨大的压力, 如何针对现阶段我国电力市场改革的基本形式, 在不与现有市场机制发生冲突的前提下, 科学合理地促进风电上网消纳, 减少弃风现象的发生, 成为

了一项十分重要的课题^[1-2]。

在风电商参与的电力市场竞价环节中, 由于风电预测出力与实际出力之间存在一定偏差, 对风电商的购售电策略产生影响, 如何促进风电上网消纳, 同时科学合理地处理风电不确定性所带来的风电投标偏差成为了风电商所需要面对的严峻挑战。

文献[3]构建了跨省区电力交易主体最优决策模型, 考虑可再生能源配额制的约束和消费者偏好对跨省区电力交易的影响, 但并未准确给出绿色证书的价格制定方案; 文献[4]提出将具有可调节特性的高载能负荷应用于风电的消纳, 与常规电源共同参与电网的优化调度, 形成源荷协调优化运行的调度模式; 文献[5]提出了一种基于非零和博弈的多区域大规模风电协调消纳策略, 对区域主体的利润进一步分配共享, 提高其风电消纳积极性; 文献[6]提出将分时电价机制与储能技术纳入风电消纳模型, 通过改变系统负荷分布提高风电的消纳水平; 文献[7]针对风电不确定性对市场交易的影响, 提出一种考虑“事后电价”的电力联营出清模型, 通过改变发电计划调节需求; 文献[8]从联网运行中风电功率可调度性的角度出发, 构建了储能系统容量经济规划模型, 设计了风电-储能联合调度策略。

现有研究大多采用提升系统技术手段和改进运营策略的方式, 在一定程度上提高清洁能源的消纳能力。提升负荷预测精度无疑是从根本上规避偏差考核的方式之一, 但该种方式对发电主体的技术实力有较高要求, 同时作为电力市场的参与者, 风电商以自身利润最大化为目标参与投标时, 必然会与其他参与市场的发电商竞争, 每个参与者的竞价策略都会对交易市场的结算过程产生影响, 基于此, 本文着重研究在对发电商技术水平的提升没有过高要求的前提下, 通过市场机制的改进, 减少因风力发电不确定性带来的偏差考核费用。

综合已知问题与现有研究情况, 本文提出一种含双边储备市场及绿证交易的现货市场交易机制。首先, 提出双边储备市场的概念及机制, 风电商可以通过双边储备市场交易能源, 以减小因风力发电不确定性而产生的亏损及偏差惩罚风险。其次, 构建绿色证书的动态定价模型, 并通过预测发电量与清洁能源占比明确该地区的绿色证书交易数额。然后, 根据随机规划理论得到不同发电商在日前市场与双边储备市场中的竞价策略优化模型, 模型以最大化风电商和火电商在现货市场交易中的利润为目标, 利用改进的古诺-鲁宾斯坦模型及算法对发电商最优利润模型进行求解。最后, 通过蒙特卡洛方法

和场景缩减技术模拟风电的实际出力, 利用实际出力数据进行算例仿真, 比较参与双边储备市场前后的发电商利润值, 对所提模型的合理性及有效性进行校验。

1 双边储备市场及其交易机制

在市场交易过程中, 考虑到风力发电的随机性和不确定性, 风电商在日前市场中的投标电量和实际出力之间大概率会出现投标偏差, 并由此产生高额的偏差惩罚费用^[9]。为减少因投标偏差所产生的偏差惩罚风险, 本文提出双边储备市场的概念, 通过日前市场与双边储备市场相结合的交易机制, 减少因为风电投标偏差产生的风险和考核费用, 同时参与市场交易的火电商利润亦有所提升, 达到双赢的目的。图1表示引入双边储备市场后的电力市场交易框架。

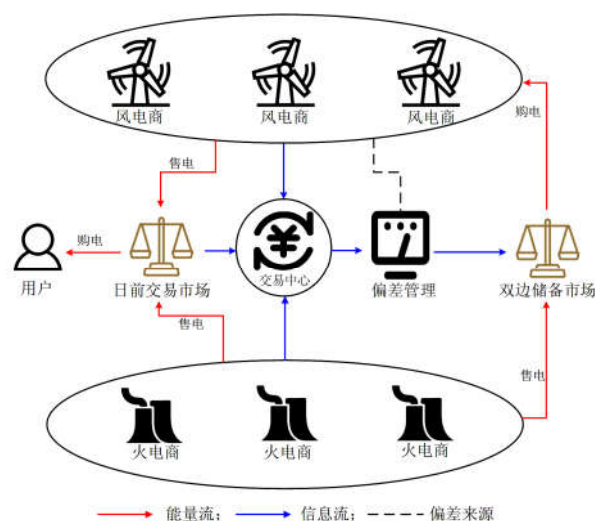


图1 引入双边储备市场后的电力市场交易框架

Fig. 1 Electricity market trading framework after the introduction of bilateral reserve markets

双边储备市场的参与者为传统火电商和风电商, 忽略各发电商的市场力因素, 在市场交易过程中, 由于火电商的发电可以精确控制, 不存在出力的不确定性, 所以双边储备市场中的交易电量由火电商提供, 通过市场交易机制将风电商的发电波动风险转移到火电商的发电机组上, 降低因风力发电不确定性导致的偏差惩罚风险^[10]。

用集合 $Q_f = \{Q_{f1}, Q_{f2}, \dots, Q_{fm}\}$ 和 $Q_w = \{Q_{w1}, Q_{w2}, \dots, Q_{wn}\}$ 分别表示火电商和风电商, u_f 和 u_w 表示火电商和风电商是否选择参与双边储备市场的0-1变量。交易结算价格的下降会激励风电商在双边储备市场的购电行为, 以尽可能减小投标偏差,

此时火电商会根据实际情况, 优先考虑自身的售电收益与发电成本的差值。当满足 $\pi_{fg} < c_{fg}$, 即火电商在双边储备市场的售电收益高于其发电成本时, $u_f = 1$ 火电商 Q_f 选择参与双边储备市场进行售电行为; 另一方面, 交易结算价格的上涨, 会刺激风电商减少在双边储备市场的购电量, 当满足 $\begin{cases} p_R < p_l \\ c_R < c_D \end{cases}$, 即双边储备市场的交易价格低于日前市场的交易价格, 且交易产生的支付费用低于风电因投标偏差产生的惩罚费用时, $u_w = 1$ 风电商 Q_w 选择参与双边储备市场进行购电交易。双边储备市场的交易电量和交易电价均由博弈模型求解获得, 根据博弈论的思想, 当双边储备市场的交易电量或交易电价中, 任何一方发生改变都会引起至少一家发电商的利润下降时, 视为博弈结束, 此时获得的交易电价和交易电量结果即为纳什均衡解^[11-12]。

本文提出的双边储备市场可以视为一种新的交易机制, 风电商和传统火电商通过双边储备市场的交易电量和交易结算价格联系在一起, 在这种交易机制下, 作为电力市场的参与者, 风电商会积极参与到与其他发电商的竞争中, 形成发电商间的购售博弈, 同时新的双边储备市场交易机制不会改变和影响目前已经实施的全系统储备、监管和其他辅助服务。

2 绿证交易定价模型

绿证交易和现货市场的协调交易有助于促进可再生能源发展和高效利用。目前我国处于绿证自愿认领阶段, 对绿证交易价格执行价格上限约束, 规定可再生能源的上网电价不超过固定价格补贴水平, 但在该种机制下, 发电企业并不会产生主动交易的动力。考虑到我国当前经济对电价的承受能力, 大幅调整可再生能源电价标准的可能性不大, 同时由于绿证自愿认购能力较差, 适时开展绿证强制交易配额制度成为缓解能源紧张问题的一种重要形式^[13]。在可再生能源电力配额总量考核指标的约束下, 发电商参与电力现货市场和绿证交易市场, 制定自身利益最大化的发电决策, 有助于达到节能减排和清洁能源高效利用的目标。执行绿证强制交易制度, 会使市场中的绿证交易价格产生一定的不确定性, 本文采用绿色证书动态定价函数, 参考市场交易出清机制, 当绿色证书的市场需求或供给发生变化时, 会对绿色证书的交易价格产生影响, 其交易价格跟随市场的动态变化而改变。在设定绿证交易价格时, 应同时考虑价格上限及下限约束^[14-15]。

图 2 表示利用绿色证书的供求曲线确定绿证交易价格。

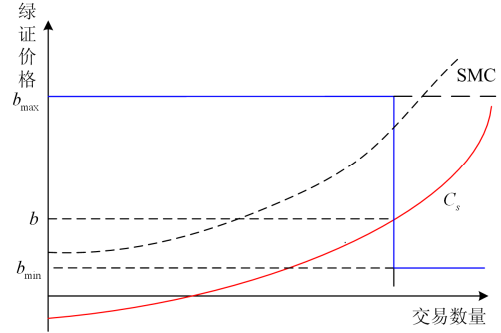


图 2 绿色证书的供求曲线

Fig. 2 Supply and demand curve of green certificate

图 2 中, $b_{\max}$ 表示绿色证书价格上限, 在数值上等同于单位罚金, 设置为单位绿色证书价格的 2 倍; $b_{\min}$ 表示绿色证书价格下限。根据价格机制, 当绿证需求大于供给时, 其需求曲线是价格为 $b_{\max}$ 的水平线; 当绿证需求小于供给时, 其需求曲线是价格为 $b_{\min}$ 的水平线。由此得到绿色证书需求曲线 N , 用蓝色折线表示; 绿色证书供给曲线 C_s 为绿色证书边际成本曲线, 由发电厂商产量决定, 在数值上等于绿色证书边际成本 SMC 与终端电价的差值。由绿色证书的需求与供给决定了其均衡价格 b , 即

$$b_{\min} \leq b \leq b_{\max} \quad (1)$$

$$b_{\min} = \frac{b_0(1-x)}{N_0} \quad (2)$$

式中: b_0 表示政府补贴; x 表示技术进步因素。

电力绿色证书的交易数目与清洁能源发电量占总发电量的比例密切相关, 可表示为带有绿色证书的发电量与区域实际用电量的比值。对发、用电量进行预测分析, 结合本地区清洁能源占比, 得到电力绿色证书计算公式。

$$N_0 = \frac{Q_{Fg} \times \theta - Q_{Nce}}{Q_{Fu} - Q_{Ot}} \quad (3)$$

式中: N_0 表示非水可再生能源的电力绿色证书数目; Q_{Fg} 表示区域预测总发电量; θ 表示清洁能源占比; Q_{Nce} 表示无绿证的清洁能源发电量; Q_{Fu} 表示预测用电量; Q_{Ot} 表示区域外交易电量。

政府及监管机构根据发电商的实际情况制定相应的绿色证书配额, 用 λ_i 表示, 且 $\lambda_i \in (0, 1)$, 即发电商的总发电出力中需保证至少有 λ_i 份额来自于可再生能源^[16]。则火电商 i 需要获取的绿证数目为

$$N_i = \lambda_i N_0, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

式中, λ_i 表示火电商 i 按需分配所需要获取绿证的比例。

3 含双边储备市场及绿证的现货交易

3.1 风电商交易利润模型

对于风电商而言, 从日前市场和双边储备市场进行交易以获取利润的影响因素包括: 风电出力情况和双边储备市场结算价格。采用含约束的随机规划方式表示风电商的总利润^[17], 通过两阶段的决策过程处理风电的不确定性, 第一阶段决策为日前市场交易结合绿证交易, 以达到促进清洁能源并网消纳的目的; 第二阶段决策利用双边储备市场进行购售电, 通过市场机制平抑风电因自身出力不确定性导致的偏差情况, 实现发电商利益的最大化。选用一组可能发生的场景表示随机过程, 同时为每个单独场景定义第二阶段的决策变量。

风电商的随机过程涉及以下内容。

(1) 假设风速服从 Weibull 分布, 根据分布模型, 通过蒙特卡洛模拟法得到 M 个风速数据, 并采用场景削减技术, 将该 M 个风速场景缩减至 N' 个场景, 然后通过风速和实际风电出力的关系, 将这 N' 个风速场景转换成 N 个实际风电出力场景^[18]。设计日前市场和双边储备市场的报价策略, 并将每个场景对应的日前市场报价和双边储备市场报价提交至交易中心。本阶段的决策基于合理的随机过程。

(2) 第二阶段决策针对合理的且已经实现的场景提出, 其中日前市场价格和发电商的出力已知, 因此, 可以计算参与到日前市场和双边储备市场交易中的发电商利润情况。

风电商利润函数模型为

$$\max \pi_j = P_1 Q_{D,j} + b N_j - \sum_{\omega=1}^W (pr_{\omega} \cdot P_{R,\omega} Q_{R,j,\omega}) - \quad (5)$$

$$\mu P_1 (Q_j - Q_{D,j} - Q_{R,j})$$

$$\text{s.t. } Q_{L,j} \geq Q_{D,j} + Q_{R,j} \quad (6)$$

$$\sum_{\omega=1}^W pr_{\omega} = 1 \quad (7)$$

$$0 \leq Q_{D,j} \leq Q_{D,j}^f \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{R,j} \leq Q_{R,j}^f \quad (9)$$

式中: P_1 表示日前市场的交易电价; $Q_{D,j}$ 表示风电商 j 在日前市场的出力; b 表示单个绿色证书的交易价格; N_j 表示风电商 j 售出的绿证数目; ω 表示

模拟的风电出力场景; pr_{ω} 表示场景 ω 发生的概率; $P_{R,\omega}$ 表示在场景 ω 下双边储备市场的交易电价; $Q_{R,j,\omega}$ 表示在场景 ω 下风电商 j 在双边储备市场的交易电量; μ 表示风电商因为发电偏差产生考核费用时的偏差考核系数; $Q_{L,j}$ 表示风电预测总出力; $Q_{D,j}^f$ 、 $Q_{R,j}^f$ 分别表示风电商在日前市场和双边储备市场的预测出力。

3.2 火电商交易利润模型

火电商的假设情况与风电商类似, 但由于火电商的出力可以精确控制, 所以不需要视为随机过程^[19]。

火电商利润函数模型为

$$\max \pi_i = P_1 Q_{D,i} + P_R Q_{R,i} - C_{li}(Q_i) - \sum_{i=1}^n u_{gi} s_g - b N_i \quad (10)$$

$$\text{s.t. } u_{gi} Q_{D,i}^{\min} \leq Q_{D,i} \leq u_{gi} Q_{D,i}^{\max} \quad (11)$$

$$u_{gi} Q_{R,i}^{\min} \leq Q_{R,i} \leq u_{gi} Q_{R,i}^{\max} \quad (12)$$

$$u_{gi} Q_i^{\min} \leq Q_{D,i} + Q_{R,i} \leq u_{gi} Q_i^{\max} \quad (13)$$

$$Q_i^Z = Q_{D,i} + Q_{R,i} \quad (14)$$

$$(P_{1,\omega_1}^D - P_{1,\omega_2}^D)(Q_{g,\omega_1}^D - Q_{g,\omega_2}^D) \geq 0 \quad (15)$$

式中: $Q_{D,i}$ 表示火电商 i 在日前市场的出力; P_R 表示双边储备市场的交易电价; $Q_{R,i}$ 表示火电商 i 在双边储备市场的交易电量; $C_{li}(Q_i)$ 表示火电商 i 的发电成本函数; u_{gi} 表示火电商 i 的启停状态; s_g 表示火电商的启停成本; N_i 表示火电商 i 购买的绿证数目; $Q_{D,i}^{\min}$ 和 $Q_{D,i}^{\max}$ 分别表示火电机组在日前市场的最小出力和最大出力; $Q_{R,i}^{\min}$ 和 $Q_{R,i}^{\max}$ 分别表示火电机组在双边储备市场的最小出力和最大出力; $P_{1,\omega}^D$ 表示场景 ω 的日前市场电价; $Q_{g,\omega}^D$ 表示场景 ω 中火电商在日前市场的出力。

$$C_{li}(Q_i) = \frac{1}{2} a_i Q_i^2 + b_i Q_i \quad (16)$$

式中, a_i 和 b_i 为火电商的发电成本系数。

3.3 市场出清模型

在市场出清过程中, 风电商、火电商向交易中心提交相应的报价信息, 同时风电商需要提供与风电出力场景相关的信息, 交易中心负责生成风电出力场景并根据市场参与主体的报价曲线, 考虑电量平衡、稳定性以及各博弈主体的容量约束, 以社会福利最大化为目标函数^[20-21], 确定市场出清价格, 出清模型可表示为

$$\max \sum_{\omega=1}^W (pr_{\omega} \cdot P_{R,\omega} Q_{R,j,\omega}) - \sum_{i=1}^n (\frac{1}{2} a_i Q_{R,i}^2 + b_i Q_{R,i}) \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \sum_{\omega=1}^W Q_{R,j,\omega} = Q_{R,i} \quad (18)$$

$$L_l^{\min} \leq \sum_{i=1}^n Q_{R,i} + Q_{R,j} \leq L_l^{\max} \quad (19)$$

式中：第一项为风电商的购电成本；第二项为火电发电成本； $L_l^{\min}$ 表示线路潮流下限； $L_l^{\max}$ 表示线路潮流上限。根据 KKT 条件及互补松弛定理，可对该出清模型进行求解。

4 博弈模型

4.1 基于改进古诺-鲁宾斯坦的交易模型

本文研究发电商在策略性现货市场中的联合竞争问题，在各发电商不了解其他市场主体发电成本信息的前提下，考虑博弈主体之间存在的购售交易，以及发电输电约束，结合便于求解的古诺博弈模型和研究“讨价还价”问题的鲁宾斯坦模型，建立古诺-鲁宾斯坦模型，对参与日前市场和双边储备市场交易的发电商利润联合模型进行求解^[22-24]。古诺-鲁宾斯坦模型表示为

$$D-BM = \{(G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_k); s_1, \dots, s_n; \pi_1, \dots, \pi_n; S_{\text{sell}}; S_{\text{buy}}\} \quad (20)$$

式中： $G_k (k=i, j)$ 表示博弈主体，本文对应两种不同类型的发电商，火电商和风电商； s_k 表示博弈主体可平移负荷策略集合； π_k 表示博弈主体的收益，对发电商来说，其自身收益包括日前市场售电收益、发电成本(负收益)和双边储备市场交易金额，其利润模型由式(5)、式(10)表示； S_{sell} 、 S_{buy} 分别表示博弈主体的售电、购电价格策略集合^[25-26]。构建的博弈模型考虑了市场主体的谈判策略，为从双边储备市场的交易中获利，当交易费用超过风电因投标偏差导致的偏差惩罚费用时，风电商选择不参与双边储备市场进行购电交易；同理，当火电商的发电成本高于其在双边储备市场的售电收益时，火电商选择不参与双边市场进行售电行为。将博弈主体未达成协议(谈判破裂)的博弈结果设置为 z ，规定如下。

(1) 谈判破裂的结果给参与者带来的收益最低，此时对任意策略 $s \in S$ ，均有 $\pi_{k,s} \geq \pi_{k,z}$ 。

(2) 至少有一个结果给博弈主体带来的收益大于谈判破裂的收益，即至少存在一个策略 $s \in S$ ，使得 $\pi_{k,s} > \pi_{k,z}$ 。

4.2 模型求解

本文探究发电主体间的竞价博弈问题，即各发

电主体参与电力市场竞争时，以自身利益最大化为目标所采取的竞价策略，博弈发生于发电商在双边储备市场进行购售电行为时，发电商的竞价利润模型可以转化为凸优化问题，该凸优化问题的最优解为当任意决策主体都不主动改变其策略行为时的博弈均衡点^[27]。和声搜索算法通过反复调整记忆库中的解变量，使函数值随着迭代次数的增加不断收敛，从而来完成优化。本文采用改进的和声搜索算法对博弈模型进行求解，得到发电商在双边储备市场的出力策略和交易电价的最优解。

探究过程中，假设每个参与博弈的主体都是理性的，同时每个发电商都不具备市场力，引入的双边储备市场与全系统储备相结合，提供备用电源以覆盖非可调性电源的间歇性和不确定性，新提出的双边交易机制可以与现有的市场机制结合，且不会改变已经实施的全系统储备、监管和其他辅助服务。

模型求解流程如图 3 所示。

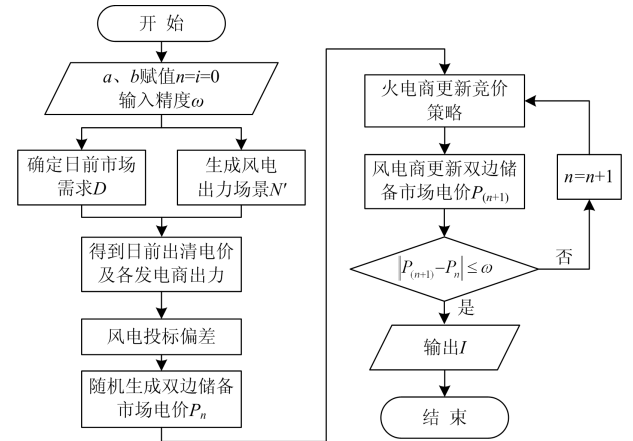


图 3 求解算法流程图

Fig. 3 Solution algorithm flow chart

5 算例仿真

考虑某日前交易市场中存在火电商两家(用 G_1, G_2 表示)、风电商一家(用 G_3 表示)，设置火电机组的装机容量均为 25 MW，发电成本系数 $a_{11} = 0.15$ 美元/(MW)²， $b_{11} = 12$ 美元/MWh； $a_{12} = 0.1$ 美元/(MW)²， $b_{12} = 10$ 美元/MWh；假设风电商拥有 10 台风电机组，每台风电机组出力满足 $q_w = 0.7634v^3$ ，风机切入风速 $v_{in} = 1.78$ m/s，额定风速 $v_N = 10$ m/s，切出风速 $v_{out} = 16$ m/s。风电偏差考核细则并未作为本文的研究重点，根据国内已经开展的日前市场交易机制和偏差考核细则，为方便计算在仿真计算过程中将风电偏差考核系数 μ 设置为 1.4。令日前市场需求 D 分别为 30 MW、

40 MW、50 MW, 场景缩减后的场景数目 N' 为 25 个。根据相关数据, 对参与日前市场和双边储备市场进行购售电交易的发电商策略、出力和利润进行计算。由于绿证交易电量的数据较大, 导致因绿证交易产生的电费值与发电商在双边储备市场进行的购售电费用之间存在数量级的差别, 所以本文的算例仿真部分仅计算发电商在日前市场和双边储备市场中的竞价交易结果。

5.1 竞价过程

图 4、图 5 给出了两个不同市场需求场景下, 风电商的投标策略和双边储备市场交易价格随迭代步数的变化趋势, 图 4 表示市场需求 $D=40$ MW, 图 5 表示市场需求 $D=50$ MW; 其中, 蓝色曲线表示竞价策略随迭代步数的变化趋势, 橙色曲线表示双边储备市场交易价格随迭代步数的变化趋势。为便于对迭代趋势和效果进行观察和分析, 图中竞价策略数据为其原有数值扩大 100 倍后所得。

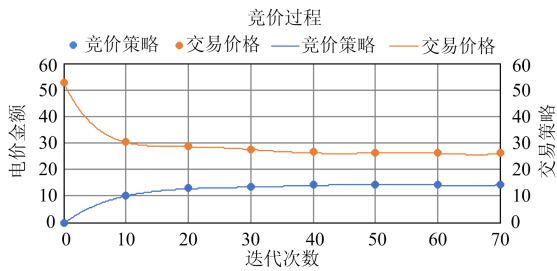


图 4 $D=40$ MW 时发电商竞价过程图

Fig. 4 Power generator bidding process diagram when demand is 40 MW

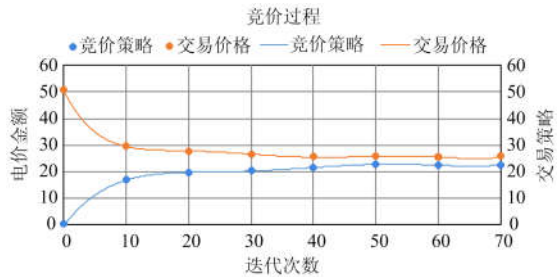


图 5 $D=50$ MW 时发电商竞价过程图

Fig. 5 Power generator bidding process diagram when demand is 50 MW

分析图 4、图 5 可知, 当双边储备市场的交易电价与日前市场的交易电价相同时, 竞价策略为 0, 此时风电商参与双边储备市场的行为不会对其利润产生提升, 所以交易不会发生, 与双边储备市场机制相契合。随着迭代次数的增加, 双边储备市场的交易价格和发电商的竞价策略均可以较快收敛。可以看出在双边储备市场中, 交易电价和发电商购售

电策略的收敛是同步的, 发电商通过自发的竞争过程达到策略和利润的同步收敛, 当迭代步数达到一定数值后, 曲线趋于稳定, 曲线稳定时对应的市场交易价格和竞价策略即为博弈模型的纳什均衡解。

5.2 市场均衡结果

表 1 表示当火电发电成本系数 $a_{11}=0.15$ 美元/(MW)²、 $b_{11}=12$ 美元/MWh 时, 市场需求不同的三组场景下, 博弈达到纳什均衡后, 发电商的策略、出力和利润情况, 表中同时包含日前市场和双边储备市场的结算价格。

表 1 市场交易均衡结果 1

Table 1 Market transaction equilibrium result 1				
日前市场需求 D		30	40	50
G_1	策略/(MW/美元)	0.372 2	0.457 8	0.471 6
	均衡出力/MW	15.643	20.058	22.862
	利润/(美元/h)	412.003	572.108	783.926
G_2	策略/(MW/美元)	0.346 7	0.427 8	0.411 8
	均衡出力/MW	14.569	18.506	19.930 1
	利润/(美元/h)	378.836	523.824	678.003
G_3	策略/(MW/美元)	0.105 9	0.141 6	0.160 5
	均衡出力/MW	5.26	7.07	8.47
	利润/(美元/h)	55.206	112.432	190.053
日前市场价格/(美元/MWh)		49.63	50.12	52.77
双边储备市场价格/(美元/MWh)		24.819	25.734	26.395

改变火电发电成本系数 $a_{12}=0.1$ USD/(MW)², $b_{12}=10$ USD/MWh, 再次计算得到市场交易均衡结果, 数据如表 2 所示。

表 2 市场交易均衡结果 2

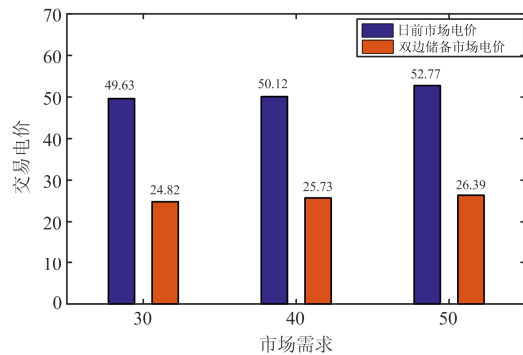
Table 2 Market transaction equilibrium result 2				
日前市场需求 D		30	40	50
G_1	策略/(MW/美元)	0.333 9	0.448 3	0.531 7
	均衡出力/MW	13.956	19.458	24.435
	利润/(美元/h)	392.209	603.647	823.232
G_2	策略/(MW/美元)	0.366 2	0.413 6	0.479 6
	均衡出力/MW	15.302	17.953	22.039
	利润/(美元/h)	437.508	566.692	756.574
G_3	策略/(MW/美元)	0.189 7	0.142 3	0.205 4
	均衡出力/MW	6.11	7.18	10.56
	利润/(美元/h)	121.501	173.402	327.141
日前市场价格/(美元/MWh)		48.97	50.45	51.83
双边储备市场价格/(美元/MWh)		22.489	24.231	25.921 7

从表 1、表 2 的数据结果可以看出, 双边储备市场的交易电价低于日前市场的交易电价。同时火电商的利润值普遍高于风电商, 这是由于在市场交

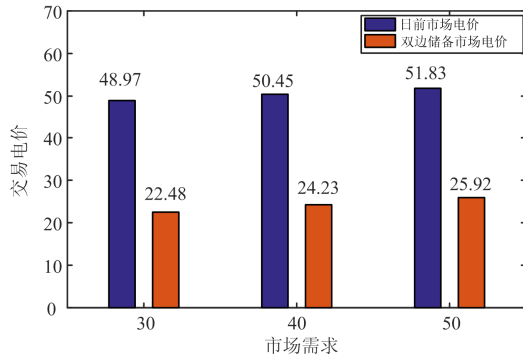
易中,火电机组因为发电的稳定性具有更加明显的竞争力,侧面说明提高清洁能源上网竞争力的必要性,需注意,表中火电商的策略和均衡出力数据包括日前市场和双边储备市场两部分。

选取表 1、表 2 中市场需求 $D = 50 \text{ MW}$ 、火电发电系数不同的数据,对日前市场和双边储备市场的交易电价,以及发电商参与双边储备市场前后的利润值进行对比,其结果如图 6、图 7 所示。

从图中可以看出,相比参加双边储备市场前,发电商参与双边储备市场进行购售交易所获得的市场



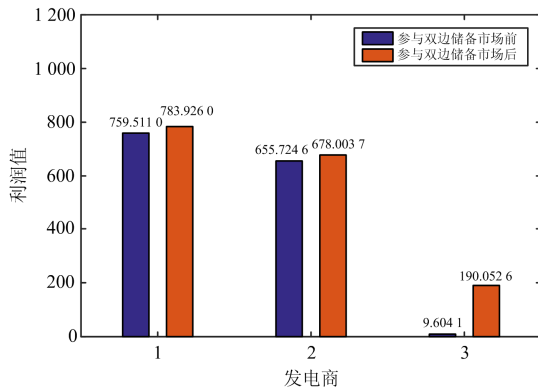
(a) $a_{11}=0.15 \text{ 美元}/(\text{MW})^2$ 、 $b_{11}=12 \text{ 美元}/\text{MWh}$



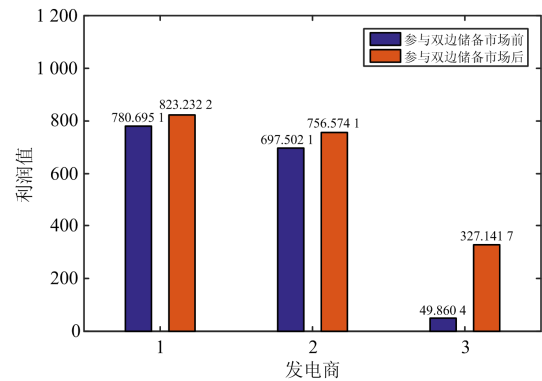
(b) $a_{12}=0.1 \text{ 美元}/(\text{MW})^2$ 、 $b_{12}=10 \text{ 美元}/\text{MWh}$

图 6 日前市场与双边储备市场交易电价值对比

Fig. 6 Comparison of trading value between day-ahead market and bilateral reserve market



(a) $a_{11}=0.15 \text{ 美元}/(\text{MW})^2$ 、 $b_{11}=12 \text{ 美元}/\text{MWh}$



(b) $a_{12}=0.1 \text{ 美元}/(\text{MW})^2$ 、 $b_{12}=10 \text{ 美元}/\text{MWh}$

图 7 发电商参与双边储备市场前后的利润值对比

Fig. 7 Comparison of the profit value of power producers before and after participating in the bilateral reserve market

利润值均有提升。其中,风电商通过双边储备市场交易规避了高额的偏差惩罚费用,同时其购电需求为火电商创造了二次收益。对比考虑双边储备市场前的交易机制,当发电商采用本文的购售电模型时,发电商自身的利润会得到提升。

6 总结

1) 考虑到风电在投标过程中可能产生的投标偏差,引入双边储备市场,激励发电商之间进行购售电交易,在不改变原有市场机制和储备电量的前提下,构建日前市场和双边储备市场相结合的交易模型,实现发电商各自利益的最大化。

2) 通过绿证交易机制,促进风电的上网竞价交易,在提高风电利用率并减少弃风现象的同时,有效减少碳排放,以市场方式合理配置可再生能源,激励风电上网竞价,以达到促进风电消纳的目的。

3) 利用改进的古诺-鲁宾斯坦模型,构建参与日前市场和双边储备市场交易的发电商利润联合模型,并利用改进和声搜索算法对模型进行有效求解。

储能变电站及用户需求侧响应是下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] YU Y, MI Z, ZHENG X, et al. Accommodation of curtailed wind power by electric water heaters based on a new hybrid prediction approach[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7: 525-537.
- [2] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.

- [3] 王辉, 陈波波, 赵文会, 等. 可再生能源配额制下跨省区电力交易主体最优决策[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1987-1995.
WANG Hui, CHEN Bobo, ZHAO Wenhui, et al. The optimal decision of power transaction subjects in inter-provincial regions under the renewable energy quota system[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1987-1995.
- [4] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [5] 栗然, 霍启敬, 陈宇, 等. 基于非零和博弈的互联系统协同消纳风电调度法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 94-100, 126.
LI Ran, HUO Qijing, CHEN Yu, et al. Non-zero-sum game based scheduling method for collaboratively accommodating wind power by interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 94-100, 126.
- [6] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615.
SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. A joint optimization model for power generation, energy storage and demand side to promote wind power consumption[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [7] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 考虑风电的电力联营市场日前出清模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 45-50.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. A model for the development of power generation market in wind power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 45-50.
- [8] 施琳. 含新能源的独立电网储能容量配置和运行策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
SHI Lin. Research on energy storage sizing and operation strategy of independent power grid with new energy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [9] 郭曼兰, 陈皓勇, 张聪, 等. 偏差电量考核机制下售电公司的最优经营策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 17-25.
GUO Manlan, CHEN Haoyong, ZHANG Cong, et al. Optimal management strategy of power sales companies under deviated electricity assessment mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 17-25.
- [10] HUANG M, WANG X, ZHANG S. Analysis of an electricity market equilibrium model with penalties for wind power's bidding deviation[C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), November 26-29, 2015, Changsha, China.
- [11] DU E, ZHANG N, KANG C, et al. Managing wind power uncertainty through strategic reserve purchasing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2547-2559.
- [12] LIANG J, GRIJALVA S, HARLEY R G. Increased wind revenue and system security by trading wind power in energy and regulation reserve markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(3): 340-347.
- [13] 徐基光. 基于绿色证书交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 中国电力, 2016, 49(7): 145-150.
XU Jiguang. Low-carbon economic dispatching for power grid integrated with wind power system based on the green certificate trading mechanism[J]. Electric Power, 2016, 49(7): 145-150.
- [14] 于雄飞, 郭雁珩. 绿色电力证书定价动态模型及交易策略研究[J]. 水力发电, 2018, 44(6): 94-97.
YU Xiongfei, GUO Yanheng. Research on dynamic pricing model and trading strategies of renewable energy certificate[J]. Water Power, 2018, 44(6): 94-97.
- [15] 赵新刚, 梁吉, 任领志, 等. 能源低碳转型的顶层制度设计: 可再生能源配额制[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1164-1169.
ZHAO Xingang, LIANG Ji, REN Lingzhi, et al. Top-level system design for energy low-carbon transformation: renewable energy quota system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1164-1169.
- [16] 安学娜, 张少华, 李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 84-89.
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopoly electricity market considering green certificate trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 84-89.
- [17] 张高航, 李凤婷, 周强, 等. 考虑风电并网友好性的日前分层调度计划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 118-124.
ZHANG Gaohang, LI Fengting, ZHOU Qiang, et al. A model of day-layer scheduling scheduling considering wind-grid grid-friendly friendliness[J]. Power System

- Protection and Control, 2019, 47(6): 118-124.
- [18] 陈臻, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73, 11.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73, 11.
- [19] 于娜, 李伟蒙, 黄大为, 等. 计及可转移负荷的含风电场日前调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 61-67.
YU Na, LI Weimeng, HUANG Dawei, et al. A day-end scheduling model for wind farms with transferable loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 61-67.
- [20] SAVELLI I, GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, et al. An optimization model for the electricity market clearing problem with uniform purchase price and zonal selling prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2864-2873.
- [21] 索瑞鸿, 宋依群. 计及负荷规模效应的售电公司决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 95-110.
SUO Ruihong, SONG Yiqun. Decision-making research of power sales companies considering load scale effect[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 95-110.
- [22] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑输电约束的期权市场与现货市场联合均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 35-39.
WANG Ruiqing, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Joint equilibrium analysis of option and spot markets considering transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 35-39.
- [23] 张宇波, 罗先觉, 薛钧义. 非完全信息下电力市场中电厂机组出力优化的改进古诺模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 7-12.
ZHANG Yubo, LUO Xianjue, XUE Junyi. Improved Cournot model for power plant unit output optimization in power market under incomplete information[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 7-12.
- [24] 付艳兰, 赵雪霖, 刘铠诚, 等. 基于演化算法和讨价还价博弈的多目标最优潮流研究[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 20-24.
FU Yanlan, ZHAO Xuelin, LIU Yucheng, et al. Research on multi-objective optimal power flow based on evolutionary algorithm and bargaining game[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 20-24.
- [25] 郭海斌. 鲁宾斯坦模型下的并购溢价影响因素研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
GUO Haibin. Research on M&A premium factors about Rubinstein bargaining model[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [26] 刘磊. 基于改进的讨价还价博弈的异构无线网络选择算法研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
LIU Lei. Research on network selection algorithm for heterogeneous wireless networks based on improved bargaining-game theory[D]. Chengdu: Xihua University, 2011.
- [27] 刘连光, 刘鸿熹, 刘自发, 等. 基于古诺模型的风火电合作容量优化[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(5): 467-474.
LIU Lianguang, LIU Hongxi, LIU Zifa, et al. Optimization of cooperative capacity of wind-fired power based on Cournot model[J]. Science in China, 2016, 46(5): 467-474.

收稿日期: 2019-06-15; 修回日期: 2019-11-01

作者简介:

魏震波(1978—), 男, 博士(后), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制、电力市场; E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn

隋东旭(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场及需求侧响应。E-mail: 920410728@qq.com

(编辑 许威)