第45卷 第19期 2021年10月10日
DOI：10.7500/AEPS20210105005
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 45 No. 19 Oct. 10, 2021

多售电主体点对点交易模式及其动态过网费机制

吴治国[1]，刘继春[1]，张　帅[1]，蒲天骄[2]，杨知方[3]，刘俊勇[1]
（1. 四川大学电气工程学院，四川省成都市 610065；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京市 100192；
3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室（重庆大学），重庆市 400044）

摘要：随着售电侧的放开，分布式发电与售电公司一同竞争形成多售电主体交易市场。现有交易模式存在过网费统一定价难以公平应对不同交易对电网运行成本的影响、集中式交易难以高效且经济地处理大量分布式交易等诸多弊端，因而建立合理的交易模式尤为重要。为此，文中探讨了动态过网费机制下多售电主体点对点交易模式。针对点对点交易小量、高频特性，建立基于灵敏度系数的动态过网费min-max问题并求解。利用连续双向拍卖的匹配机理，考虑售电主体提供的普遍-定制服务，提出计及动态过网费的2次连续双向拍卖多轮交易机制。多轮交易中，针对每一轮交易提出实时滚动的网络校核方法。考虑交易双方心理行为，提出改进型失望-后悔规避理论进行报价更新。仿真结果表明，所提动态过网费机制能够针对每笔交易特性更加合理地分摊电网运行成本，且设计的点对点交易机制可安全、经济、高效地实现计及动态过网费的多边竞价交易。

关键词：点对点；动态过网费；定制化服务；连续双向拍卖；失望-后悔规避理论

0　引言

2020年，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》[1]中提出发展新能源，降低碳排放强度。同时，新一轮电力体制改革中售电侧逐渐放开，中国分布式电源渗透率日益提升[2]，更多具有独立发电与决策能力的产消者与售电公司竞争，形成多售电主体市场。传统集中交易模式已不适合具有小量、高频特性的交易，同时大量电能交易占用电网资产，增加了配电网输电压力。设计合理的交易模式以及过网费收取办法，保证配电网侧电力资源优化配置以及电网公司运行成本合理分摊，成为当前研究重点。

《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》[3]中明确指出“分布式发电项目与电力用户进行电力直接交易，向电网企业支付过网费”，但关于过网费的收取并没有明确说明。文献[4]提出过网费收取应按交易所在电压等级、输电以及消纳水平分级确定。文献[5]提出过网费应与光伏成本联动，建立适应光伏学习曲线联动的过网费收取机制。文献[6-7]基于电气距离法和兆瓦-公里法结合的功率传输分布系数计算过网费。上述文献中过网费多为统一定价形式，且制定过程较少考虑线路因点对点交易而带来的输电阻塞成本问题、线路电压稳定成本问题以及小量、高频特性下分析单笔交易对电网运行成本的影响。

相比传统集中式交易，点对点交易机制更适应大量分布式电能交易。文献[8-9]采用VCG（Vickrey-Clarke-Groves）拍卖方法结合区块链技术进行多边竞价交易，该拍卖方法有助于激励市场成员真实报价。文献[10-12]基于连续双向拍卖（continuous double auction，CDA）机制和区块链技术分别提出了自适应进取性交易策略与分布式能源消纳水平提升方法以及具有层级化的智能配售电交易平台架构。上述文献在设计交易机制时几乎没有考虑网费以及网络安全校核等因素对交易的影响，且校核多在交易完成后进行，通过削减交易量或重新匹配来满足要求，对分布式电能消纳及交易成本有消极影响，不能达到实时要求。

针对上述文献的不足，本文提出了动态过网费（dynamic network fee，DNF）计算机制和基于CDA并计及DNF的多售电主体点对点交易机制。针对配电网中点对点交易小量、高频以及传统过网费制定不考虑博弈的特点，采用功率转移分布因子（power transfer distribution factor，PTDF）建立包含输电阻塞机会成本、线路占用成本以及电压治理成本的DNF博弈模型。将模型转化为无约束的

收稿日期：2021-01-05；修回日期：2021-05-09。
上网日期：2021-07-21。
国家自然科学基金资助项目（U2066209）。

min-max问题，并采用改进的熵函数法转化为极小熵问题，利用分布式算法求解。进一步地，匹配过程中考虑DNF以及定制化需求，设计了计及DNF的2次CDA多轮交易机制。该机制中，考虑拍卖双方心理行为，采用改进型失望-后悔规避理论的报价更新策略，针对线路潮流越限以及电压偏移问题，提出实时滚动的网络安全校核方法。算例证明本文提出的点对点交易模式可以保证大量主体正常交易并能够提高成交率。

1　多售电主体点对点交易分析

传统购售电交易通过中心化机构进行交易，配电网拓扑结构复杂和主体位置分散导致管理成本高，信息迟滞导致电力资源浪费和新能源发电的消纳水平不高，交易数据的安全性、各主体之间的信任度也较低[13]。在配电网下海量交易产生的过网费没有合理分摊机制，导致电网公司难以保证回收成本，同时在交易中过网费如何与交易机制融合也没有明确方法。

本文研究的配电网下多售电主体点对点交易结构如附录A图A1所示。配电网包含分布式光伏、分布式储能、售电公司、普通用户、带自发电能力的智能用户。每个主体对应一个节点，各售电主体可提供普遍-定制等多维服务，满足买方用电需求并提升售电主体的竞争力。电网公司作为一个节点参与其中，但不参与电能交易以及过网费的制定过程，只作为安全校核、认证并收取过网费的节点。本文设定DNF由电网公司向买方收取。

在配电网拓扑结构下，设计了一种计及DNF的多售电主体点对点交易机制，如图1所示，具体流程如下。

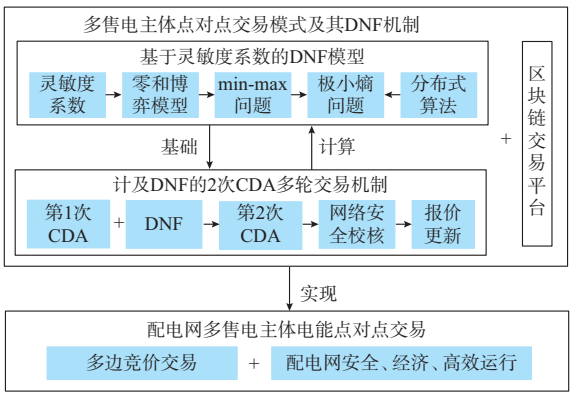

图1　多售电主体点对点交易总体框架

Fig. 1　Overall framework of peer-to-peer transactions for multiple power sellers

1）各主体在线上平台申报，通过第1次CDA进行交易匹配。

2）利用交易结果计算DNF并对买方报价曲线进行更新，再进行第2次CDA，若主体2次交易结果一致且满足定制化需求的交易，则视为成功出清。

3）电网公司对交易结果进行实时滚动的安全校核，未通过校核则进行阻塞管理以及无功补偿直至通过，并将交易结果传递至交易双方。

4）未完全出清的主体经报价更新继续参加下一轮交易。在本轮出清的交易主体链下进行协商并将结果上传至区块链自动执行，未能协商成功的解除本次交易，交易双方信息重置。

2　基于灵敏度系数的DNF建模与求解

2.1　DNF分析

由于主体具有分散且数量多、申报量小、随时申报等特点，因而在配电网点对点交易中具有小量、高频的特性。本文中每笔交易的过网费随着交易主体的策略、位置、交易量、交易时间、占用电网资产等因素的改变而动态变化，而非传统的统一定价。本文探讨了交易对配电网短期运行成本的影响。

针对小量特性和由于距离、传输量不同而导致传统过网费统一定价不公的情况，具体分析每笔交易的过网费，将监管允许回收的成本合理分摊到每一笔交易中。政府部门考虑公众利益、成本监审等方面，采取博弈方式动态生成DNF模型。该模型包含政府代理的博弈双方——电网公司与买方，模拟赋予双方议价权进行博弈，电网公司实际并不参与DNF的制定过程。以博弈方式合理分摊，更加符合市场，具体结构如附录A图A2所示。

针对高频特性，每5 min将申报同一交割时间的主体划进同一交易池，如附录A图A3所示，未全部出清主体加入下一个交易池中。该方法可对随时产生的大量申报进行连续出清，直至申报时间截止，有利于提高申报主体的成交率。

2.2　构建基于灵敏度系数的DNF博弈模型

灵敏度分析方法可给出支路潮流与节点注入功率之间的关系[14]。灵敏度系数有多种形式，本文采用PTDF，其物理意义为：在指定的送电端与受电端之间传输单位有功功率时各支路潮流的变化[15]，推导过程见附录B。

零和博弈中所有参与者的支付函数总和为零，该博弈可转化为min-max问题求解[16]。在单笔交易中，博弈双方的支付函数即DNF之和为零，博弈策略为各自议价因子，因此形成零和博弈。

DNF计算过程应主要考虑短期运行成本，即输

电阻塞机会成本、线路占用成本、电压治理成本。故而可得到DNF的min-max问题。

$$\min_{\pi}\{\max_{\delta} F\}=\sum_{l}(Z_l+D_l+U_l) \tag{1}$$

式中：F为过网总费用；π和δ分别为电网公司和买方议价因子；Z_l、D_l、U_l分别为线路l的输电阻塞机会成本、线路占用成本、电压治理成本。

1)输电阻塞机会成本Z_l

由于日前计划占据较多线路容量，随着交易的产生，发生阻塞概率变高，线路容量裕量变小，阻塞机会成本变大。建模时应考虑交易产生的线路潮流增量以及议价权问题，因而有：

$$\begin{cases} Z_l=R_{\mathrm{LMCC},l}\left(\Delta P_l\ln\dfrac{\pi}{\delta}\alpha(P)\right)\mathrm{e}^{\beta(P)} \\ \alpha(P)=\dfrac{P_l+\Delta P_l}{P_l} \\ \beta(P)=\dfrac{\Delta P_l}{P_{l,\max}} \\ \Delta P_l=k_{\mathrm{PTDF},ij,l}P_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$R_{\mathrm{LMCC},l}$、P_l、ΔP_l、$P_{l,\max}$分别为线路l的节点容量边际成本、已有潮流、潮流增量、最大容量；$k_{\mathrm{PTDF},ij,l}$为节点i、j间线路l的功率转移分布因子；P_{ij}为节点i、j的成交量。

节点容量边际成本指节点增加单位负荷而引起的支路扩容增量[17]，计算方法如下。

假设线路扩容方式为增加相同设施进行并联运行，则有：

$$R_l=\frac{C_l}{(1+\eta)^{T_l}} \tag{3}$$

式中：R_l、C_l、T_l分别为线路l的贴现值、扩容成本、扩容时间；η为折现率。

扩容时间的计算方法如下。

$$T_l=\frac{\ln\left(\dfrac{P_{l,\max}-P_l}{\Delta P_l}+1\right)}{\ln(1+d)} \tag{4}$$

式中：d为负荷增长率。

因此当线路l潮流增加ΔP_l时，有

$$R_{\mathrm{LMCC},l}=\frac{R_l'-R_l}{\Delta P_l} \tag{5}$$

式中：R_l'为线路l扩容后的投资现值。

当$\Delta P_l\to 0$时，有

$$R_{\mathrm{LMCC},l}=\frac{\partial R_l}{\partial\Delta P_l}=\frac{\partial R_l}{\partial T_l}\frac{\partial T_l}{\partial\Delta P_l}=\frac{C_lT_l(P_{l,\max}-P_l)}{(1+\eta)^{T_l-1}(P_{l,\max}-P_l+\Delta P_l)\Delta P_l\ln(1+d)} \tag{6}$$

2)线路占用成本D_l

线路占用成本是占用电网资产和网损对电网造成的成本影响，主要依据交易双方之间的电气距离和网损率以及交易量建立模型，同时考虑电网公司和买方的议价权。

$$D_l=\frac{\pi\gamma}{\delta}d_{ij}P_{ij} \tag{7}$$

式中：$d_{ij}=\sum_{l}|k_{\mathrm{PTDF},ij,l}|(1+\eta_{l,\mathrm{loss}})$为节点$i$、$j$间的电气距离，其中$\eta_{l,\mathrm{loss}}$为网损率；$\gamma$为单位距离传输单位功率的费用。

3)电压治理成本U_l

针对交易后潮流变化可能导致的配电网节点电压越限，发电公司需要提供无功支持服务，此时电网公司向发电公司支付电压治理成本为：

$$U_l=\kappa\Delta u_l \tag{8}$$

式中：κ为单位电压偏移治理成本；Δu_l为去除基准节点的节点偏移电压。

$$\Delta u_l=\frac{u_l-u_{\mathrm{N}}}{u_{\mathrm{N}}} \tag{9}$$

式中：u_l为交易产生后的节点电压；u_{N}为额定电压。

节点i、j间进行交易的DNF为：

$$C_{\mathrm{DNF},ij}=\frac{F_{ij}}{P_{ij}} \tag{10}$$

式中：$C_{\mathrm{DNF},ij}$和F_{ij}分别为节点i、j间动态过网费和过网总费用。

2.3 博弈模型求解

目前求解min-max问题的方法很多，文献[18-19]分别利用广义梯度投影算法和Lasserre半定松弛算法求解min-max问题，算例表明2种方法具有较好的收敛性，但对精度要求低时求解速度较慢。本文采用文献[20]中改进的熵函数法构造熵函数，对熵函数中的参数进行更新，防止出现病态问题。

将式(1)等价为：

$$\min\{\varphi(x)=\max F(x)\} \tag{11}$$

式中：x为策略集$\{\pi,\delta\}$；$F(x)$为过网总费用函数；$\varphi(x)$为过网总费用极大函数。

定义熵函数：

$$\phi(x,p)=\frac{1}{p}\ln(\mathrm{e}^{pF(x)}-1) \tag{12}$$

式中：p为控制参数，且$p\geqslant 1$。易知$p\to\infty$时，$\phi(x,p)$单调递增且一致收敛于$\varphi(x)$，证明过程详见附录C。

可将式(11)等价于：

$$\min\phi(x,p) \tag{13}$$

当p过大时会出现病态问题，故逐步更新p，更新公式为：

$$p_{i+1}=\left(1+\frac{1}{\ln p_i}\right)p_i \tag{14}$$

式中：p_i为迭代求解中第i次的控制参数。

采用分布式迭代算法对式(13)求解，具体步骤如下。

1)算法1：策略更新

步骤1：参数初始化。

步骤2：计算目标函数梯度g_i和下降方向h_i。

$$\begin{cases}g_i=\nabla_{x_i}\phi(x_i,p_i)\\h_i=-t_ig_i\end{cases} \tag{15}$$

式中：x_i为第i次更新的策略；t_i为梯度下降方向参数；∇_{x_i}表示在x_i处求梯度。

步骤3：计算步长k_i。

$$k_i=\max\{b^l|\phi(x_i+b^lh_i,p_i)-\phi(x_i+b^lh_i,p_i)\leqslant-ab^l\|h_i\|^2\}\quad l\in\mathbf{N}^+ \tag{16}$$

式中：a、b为常数参数，分别取0.5、0.8。

步骤4：更新策略x_i。

$$x_{i+1}=x_i+k_ih_i \tag{17}$$

步骤5：判断$\|x_{i+1}-x_i\|\leqslant3\times10^{-4}$是否满足，若满足则停止计算，否则转算法2。

2)算法2：参数更新

步骤1：参数初始化。

步骤2：判断条件$\|\nabla_{x_i}\phi(x_i,p_i)\|^2\leqslant0.0001$是否满足，若满足则进行下一步，否则置$p_{i+1}=p_i$，$i=i+1$后转到算法1的步骤2。

步骤3：利用式(14)更新控制参数p_i。

步骤4：计算辅助参数u_i、r_i。

$$\begin{cases}u_i=x_{i+1}-x_i\\r_i=g_{i+1}-g_i\end{cases} \tag{18}$$

若$u_i^lr_i=0$，停止计算，否则转入步骤5。

步骤5：更新参数t_i。

$$t_{i+1}=t_i+\frac{\left(1+\frac{r_i^lt_i}{u_i^l}\right)u_i}{r_i}-(u_ir_i^l+r_iu_i^l)u_i^l \tag{19}$$

然后置$i=i+1$后转算法1中步骤2。

3　计及DNF的2次CDA多轮交易机制

在制定DNF机制后，利用CDA出清结果以及该机制计算DNF，利用DNF对买方报价更新后进行CDA，从而实现本文所设计的计及DNF的2次CDA。

3.1　CDA机制

CDA以“价格优先、时间优先”准则进行匹配，交易模型如附录A图A4所示。买方的最高报价称为买方最优报价，卖方的最低报价称为卖方最优报价[10]。当买方最优报价高于卖方最优报价时，则匹配出清，完成出清的主体退出拍卖，成交价取平均价，成交量取较小申报量。此时，次优报价主体变为最优报价主体进行匹配出清，直至买方最优报价低于卖方最优报价或到达拍卖结束时间，则完成本次拍卖交易。

3.2　计及DNF的出清方法

为实现计及DNF的出清，提出计及DNF的2次CDA交易机制。首先进行第1次CDA交易，根据交易结果和网络拓扑信息以及日前计划确定的潮流信息等测算出DNF，如附录A图A5所示。DNF包含在买方报价中且由买方另行支付给电网公司，与卖方无关，故买方的报价需要扣除DNF得到相对于卖方的有效报价。计及DNF后买方的报价曲线发生改变，如果此时排在第1位的买方不是最优报价且不进行第2次出清，仍取第1次出清为结果，则对于最优报价的卖方不公平且有违匹配机制，故须对扣除掉DNF的买方重新排序，进行第2次CDA出清，如附录A图A6所示。除此之外，将DNF包含在报价中，购电价将在买方可控范围内，不至于在CDA机制下匹配完成后发现DNF过高而难以达成交易，减少试错成本。

对比2次CDA结果，当交易结果相同且定制化服务满足买方需求时，认为出清成功。未完全出清主体须更新报价进行下一轮交易，直至本交易池中的交易时间结束，未全部出清主体加入下一交易池继续参加交易。

3.3　实时滚动的网络安全校核

匹配出清可能会对配电网产生一定的影响，例如潮流越限导致线路阻塞、电压偏移导致电力设备损伤等问题，因而须在每一轮达成交易后进行网络安全校核，主要考虑潮流越限问题以及电压偏移问题。

1)潮流越限问题主要是以实时滚动的方式对交易量进行削减。

对每轮交易的线路容量裕量进行实时更新，并同时判断是否有线路潮流越限，若有则对经过此线路的所有交易按其交易量的比例削减，削减量加入下一轮交易，达到滚动效果。单笔交易的削减量为：

$$P_{\mathrm{r}}=\frac{P_{\mathrm{deal}}}{P_{\mathrm{all}}}P_{\mathrm{e}} \tag{20}$$

式中：P_{r}、P_{e}、P_{deal}、P_{all}分别为削减量、潮流越限量、原成交量、该线路总成交量。

网络安全校核后的成交量$P_{\mathrm{deal,reduce}}$为：

$$P_{\mathrm{deal,reduce}}=P_{\mathrm{deal}}-P_{\mathrm{r}} \tag{21}$$

2)电压偏移问题主要依靠无功支持服务,结算时电网公司将相应费用支付给提供服务的主体,具体步骤为:①判断是否有电压越限;②若无越限,则结束电压校核,反之计算无功补偿量;③补偿后重新计算电压,若仍有越限则继续无功补偿,反之结束电压校核。

3.4 考虑心理行为的报价更新策略

目前考虑心理行为的分析研究较多,但较少用于报价,本文对失望和后悔规避理论进行了改进并用于报价更新。后悔规避理论是由Bell[21]和Loomes[22]分别于1982年提出,Bell[23]又继续深入对失望规避理论进行研究。失望和后悔规避理论都是决策者提前设置规避因子,与可能较优策略比较结果后改进自身策略,避免出现失望和后悔的心理行为,即决策者在决策过程中对后悔和失望进行规避[24]。

选用买方的成交效用值应随着报价提高而增大,卖方的成交效用值应随着报价提高而减小,则有:

$$v_{\mathrm{buy}}(p_{\mathrm{quo}})=\frac{p_{\mathrm{quo}}}{p_{\mathrm{grid,b}}}\mathrm{e}^{\frac{p_{\mathrm{quo}}}{p_{\mathrm{grid,b}}}-1} \tag{22}$$

$$v_{\mathrm{sell}}(p_{\mathrm{quo}})=\frac{p_{\mathrm{quo}}}{p_{\mathrm{grid,s}}}\mathrm{e}^{-\frac{p_{\mathrm{quo}}}{p_{\mathrm{grid,s}}}+1} \tag{23}$$

式中:$v_{\mathrm{buy}}(\cdot)$和$v_{\mathrm{sell}}(\cdot)$分别为买、卖方的成交效用值;p_{quo}为报价;$p_{\mathrm{grid,b}}$和$p_{\mathrm{grid,s}}$分别为向电网购、售电的价格。

$$\Delta v_{\mathrm{buy}}=v_{\mathrm{buy}}(p_{\mathrm{buy}})-v_{\mathrm{buy}}(p_{\mathrm{buy,e}}) \tag{24}$$

$$\Delta v_{\mathrm{sell}}=v_{\mathrm{sell}}(p_{\mathrm{sell}})-v_{\mathrm{sell}}(p_{\mathrm{sell,e}}) \tag{25}$$

式中:p_{buy}和p_{sell}分别为买、卖方报价;$p_{\mathrm{buy,e}}$和$p_{\mathrm{sell,e}}$分别为上一轮交易买、卖方的最优报价;Δv_{buy}和Δv_{sell}分别为买、卖方的成交效用差值。

1)基于改进型失望规避理论的报价更新

改进型失望规避理论用于交易前对主体报价进行更新。将报价策略的成交效用值与上轮交易中最优报价的成交效用值比较,计算出失望-愉悦值。通过设置失望规避因子ε来规避失望,并防止申报主体因为自身决策失误而报出不合理的价格,提高交易成功率以及降低成本。买、卖方的失望-愉悦函数分别为$D_{\mathrm{buy}}(\Delta v_{\mathrm{buy}})$和$D_{\mathrm{sell}}(\Delta v_{\mathrm{sell}})$。

$$D_{\mathrm{buy}}(\Delta v_{\mathrm{buy}})=\tau^{-\Delta v_{\mathrm{buy}}}-1 \tag{26}$$

$$D_{\mathrm{sell}}(\Delta v_{\mathrm{sell}})=1-\tau^{-\Delta v_{\mathrm{sell}}} \tag{27}$$

式中:τ为失望规避系数。

若当前报价策略的失望-愉悦值大于ε则进行下一步,否则更新报价,重新计算失望-愉悦值,直至超过ε。报价更新公式如下:

$$p_{\mathrm{buy}}(k+1)=(1-\lambda_1)p_{\mathrm{buy}}(k)+\lambda_1 p_{\mathrm{buy,e}} \tag{28}$$

$$p_{\mathrm{sell}}(k+1)=(1-\lambda_1)p_{\mathrm{sell}}(k)+\lambda_1 p_{\mathrm{sell,e}} \tag{29}$$

式中:λ_1为失望报价更新系数;k为迭代次数。

2)基于改进型后悔规避理论的报价更新

后悔规避理论用在进行一轮交易后,将报价策略的成交效用值与本轮交易中最优报价的成交效用值比较,计算出后悔-欣喜值。通过设置后悔规避因子σ来规避后悔并提高交易成功率。买、卖双方的后悔-愉悦函数$R_{\mathrm{buy}}(\Delta v_{\mathrm{buy}})$和$R_{\mathrm{sell}}(\Delta v_{\mathrm{sell}})$为:

$$R_{\mathrm{buy}}(\Delta v_{\mathrm{buy}})=\frac{1-\mathrm{e}^{-\alpha\Delta v_{\mathrm{buy}}}}{\alpha^2} \tag{30}$$

$$R_{\mathrm{sell}}(\Delta v_{\mathrm{sell}})=\frac{1-\mathrm{e}^{-\alpha\Delta v_{\mathrm{sell}}}}{\alpha^2} \tag{31}$$

式中:α为后悔规避系数。

若当前报价策略的后悔-欣喜值大于σ则进行下一步,否则更新报价,重新计算后悔-欣喜值,直至超过σ。报价更新公式如下:

$$p_{\mathrm{buy}}(k+1)=(1-\lambda_2)p_{\mathrm{buy}}(k)+\lambda_2 p_{\mathrm{buy,e}} \tag{32}$$

$$p_{\mathrm{sell}}(k+1)=(1-\lambda_2)p_{\mathrm{sell}}(k)+\lambda_2 p_{\mathrm{sell,e}} \tag{33}$$

式中:λ_2为后悔报价更新系数。

为防止每轮交易后报价更新结果相似,需要对后悔规避因子σ更新,公式如下:

$$\sigma(k+1)=\lambda_3\sigma(k) \tag{34}$$

式中:λ_3为后悔规避因子更新系数。

计及DNF的2次CDA多轮交易流程如附录A图A7所示。

4 配电网下分布式电能点对点交易分析

4.1 参数设置

本算例中共设置16个主体验证设计模式的有效性。卖方分别为:分布式光伏A、H,售电公司B、D,分布式储能C、E,智能发电用户F、G。买方分别为:售电公司I、P,储能用户J、K,用户L、M,智能用电用户N、O。各售电主体提供普遍-定制服务。普遍服务主要指常规电力电量平衡服务,定制化服务主要指提供高供电可靠性等服务。供电可靠性指标可依据文献[25],考虑各售电主体供电能力和中性点接地方式以及网架结构综合计算得到。

买卖双方申报信息见附录D表D1。配电网结构选用IEEE 33节点系统,各主体所在节点见附录D图D1。本文只考虑日内实时市场,并假设日前发用电计划已确定,则可知线路传输容量裕量。线路传输容量裕量见附录D表D2。其他参数为:负荷年增长率$d=3\%$,折现率$\eta=8\%$,单位距离传输单位功率费用取0.02元/(m·kW),单位电压偏移治理成本κ取0.02元,控制参数p取$10^3/3$,买方初始策略

取0.4，电网初始策略取0.5，失望规避系数τ取0.3，后悔规避系数α取0.5，失望报价更新系数λ_1取0.9，后悔报价更新系数λ_2取0.6，后悔规避因子更新系数λ_3取0.9。

4.2　结果分析

首先，采用前述的数据与方法进行计及DNF的第1次CDA仿真，结果如附录D图D2所示。每笔交易成交价为扣除DNF后的买方报价与卖方报价的平均值。仿真结果表明：更新后部分交易的买方报价低于卖方报价，不能达成交易，例如P与D的交易；更新后P、H交易中的买方P的买方最优报价，而卖方最优报价为卖方C，此时匹配结果违反了CDA的匹配规则，且成交价变低，对卖方不公平。综上数据分析，更新后买方报价重新排序进行第2次CDA出清的必要性。

其次，经13轮交易后，共14笔交易达成，如图2(a)所示，交易量分别为2.5、1.4、1.6、1.2、3.1、2.0、1.0、2.2、3.9、0.7、3.0、0.1、1.7、2.4 kW。经交易后，主体I和K以及L分别差1.0、0.7、0.4 kW电量未购得，分析表明线路阻塞导致交易量被削减。同时售电公司I只与智能发电用户F进行交易，因为能满足F的高供电可靠性要求。但F能与其他买方达成交易，可见提供定制化服务能扩大买方群体，提高买方黏性。

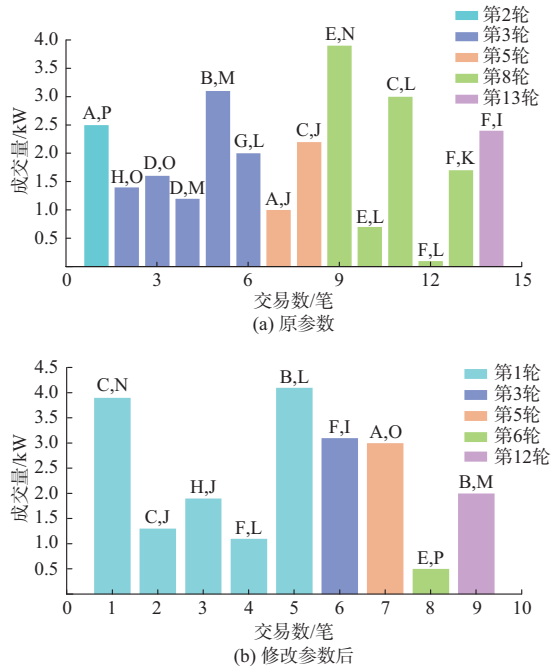

图2　点对点交易结果
Fig. 2　Results of peer-to-peer transactions

再将部分DNF的参数减小后进行仿真，进而观察DNF对交易结果的影响，结果如图2(b)所示。从图中对比可知在不同过网费情况下，交易结果相差巨大。可见，DNF对交易结果有重要影响。

仿真中传输容量裕量如图3所示。在第13轮交易完成后线路5的传输容量裕量为0，可分为2种情况：①经过交易，传输容量裕量恰好为0；②潮流越限，经安全校核后为0。未安全校核时发现符合情况2：线路5潮流越限1.1 kW，原本交易10、12、13的成交量分别为1.0、0.2、2.4 kW。可见本文提出的实时滚动网络安全校核效果显著，保证线路不会潮流越限。同时点对点交易产生的反向潮流对部分线路传输容量裕量有提升作用。

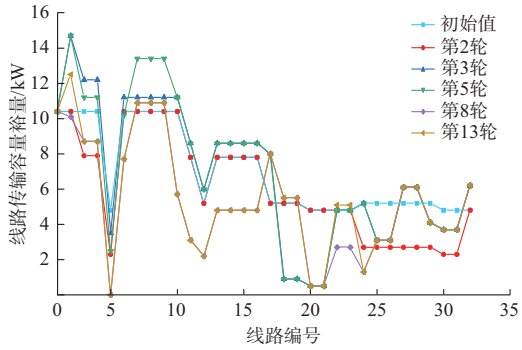

图3　线路传输容量裕量变化曲线
Fig. 3　Margin change curves of line transmission capacity

买方交易结果如图4所示，分别为购电价、成交价、DNF。购电价是买方在结算时支付的总价格，成交价是买方需要支付给卖方的价格。易知交易10、12的DNF偏高，根据前述的线路容量裕量，可知这2笔交易造成线路5潮流越限，同时交易双方距离较远。交易4的DNF最高是由于距离最远，占用电网资产最大且网损最大；交易7、8、14的DNF偏低是因为交易双方的距离较近，部分交易有反向潮流，提升了线路的容量裕量。这3种特殊交易验证了本文设计的DNF机制对于分摊电网运行成本更加合理、公平。

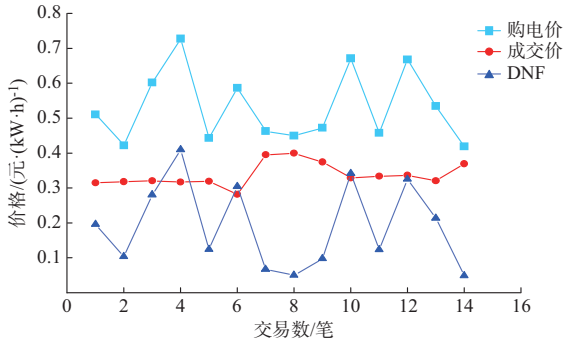

图4　买方交易结果
Fig. 4　Transaction results of buyers

最后，对DNF机制中有无博弈的结果进行对比，如图5所示。易知不论购电价格还是DNF在有博弈的情况下几乎都比没有博弈的情况小，改变了传统过网费制定过程中买方没有议价权的情况。但是有无博弈的差距不会过大，因为电网公司的策略在博弈过程中和买方策略相互跟随，保证DNF的收取不会过低或过高，进而合理分摊成本。

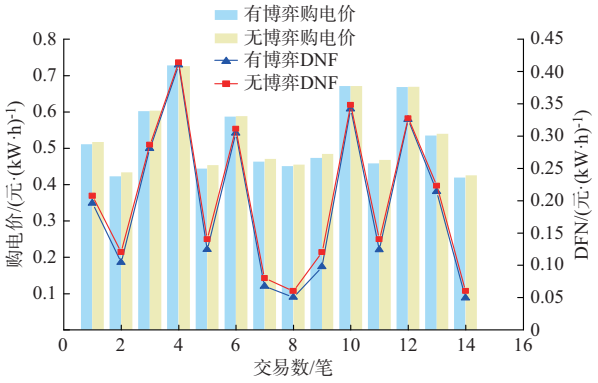

图5　有无博弈比较
Fig. 5　Comparison with or without games

同时，报价更新阶段对有无采取本文提出的考虑心理行为的报价更新方式进行比较，进行20轮交易后的结果如表1所示。可知采用本文提出的方法可大幅提高成交率，因为在开始交易前就已经进行一次基于改进型失望规避理论的报价更新，对报价不合理的主体根据其设定的失望规避因子进行报价更新，提高了成交的概率。然后在每一轮交易后对于没有完全出清的主体再进行一次基于改进型后悔规避理论的报价更新，对报价快速更新，又一次提高交易成功率，同时减少交易轮数，进一步减少交易成本。

表1　是否考虑心理行为的差异
Table 1　Difference between considering psychological behavior or not

报价更新方式	最大可交易量/kW	交易量/kW	成交率/%
考虑心理行为	28.9	26.8	92.73
不考虑心理行为	28.9	18.0	62.28

5　结语

本文面向配电网下多售电主体点对点交易模式，在考虑配电网点对点交易小量、高频、随时发生等特性的基础上，分析了配电网过网费的收取机制及其博弈模型求解方法；考虑DNF以及定制化服务与需求的基础上，提出了计及DNF的2次CDA多轮交易机制以及实时滚动的安全校核方法，并应用改进型失望-后悔规避理论进行报价更新。算例仿真结果验证本文所提DNF机制和多售电主体点对点交易模式有效性及可行性。主要结论如下。

1)构建了基于零和博弈的DNF计算模型，并采取划定交易池的模式实现交易出清。分析显示：在线路容量裕量较小或距离较远时，DNF较高；考虑博弈时相对于无博弈的DNF以及购电成本均较低。建立的DNF机制更加合理地分摊了电网成本。

2)建立了计及DNF的2次CDA多轮交易机制及出清方法，能够确保多主体点对点交易准确公平有序进行。

3)提出了实时滚动的网络安全校核办法，能够解决线路潮流越限问题以及电压问题，提高成交率。

4)引入了改进型失望-后悔规避理论的报价更新方式。该方式可扩大点对点交易成交量，提高交易成交率。

本文接下来的研究将考虑市场主体的报量策略以及在区块链平台进行的仿真实验，探讨更加完善的配电网下多售电主体点对点交易模式。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)，扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL].[2020-11-03].http://www.xinhuanet.com/politics/2020-11/03/c_1126693341.html.
Recommendations of the Central Committee of the Communist Party of China on formulating the Fourteenth Five-Year Plan for national economic and social development and long-term goals for 2035 [EB/OL]. [2020-11-03]. http://www. xinhuanet. com/politics/2020-11/03/c1126693341.html.

[2] 平健，严正，陈思捷，等.基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J].中国电机工程学报，2019，39(24)：7137-7145.
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145.

[3] 国家发展改革委，国家能源局.关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL].[2017-10-31].http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the pilot of distributed generation market trading [EB/OL]. [2017-10-31]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.html.

[4] 王冰钰，颜拥，文福拴，等.基于区块链的分布式电力交易机制[J].电力建设，2019，40(12)：3-10.
WANG Bingyu, YAN Yong, WEN Fushuan, et al. A blockchain based distributed power trading mechanism [J].

Electric Power Construction, 2019, 40(12): 3-10.

[5] 石方迪，刘敦楠，余涛，等.适应光伏学习曲线的分布式交易过网费机制[J].智慧电力，2020，48(3)：96-103.
SHI Fangdi, LIU Dunnan, YU Tao, et al. Probe into mechanism of use of system charge in distributed trading adapted to photovoltaic learning curve[J]. Smart Electricity, 2020, 48(3): 96-103.

[6] PAUDEL A, SAMPATH L P M I, YANG J, et al. Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4727-4737.

[7] 童格格.基于区块链的分布式发电市场化交易研究[D].南京：东南大学，2019.
TONG Gege. Research on market based on transaction of distributed generation based on blockchain [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[8] 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.

[9] 单俊嘉，胡俊杰，吴界辰.面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型[J].电网技术，2020，44(9)：3401-3408.
SHAN Junjia, HU Junjie, WU Jiechen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3401-3408.

[10] 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.

[11] 王蓓蓓，李雅超，赵盛楠，等.基于区块链的分布式能源交易关键技术[J].电力系统自动化，2019，43(14)：53-64.
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.

[12] 韩冬，张程正浩，孙伟卿，等.基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J].电力系统自动化，2019，43(7)：89-96.
HAN Dong, ZHANG Chengzhenghao, SUN Weiqing, et al. Framework design of smart distribution on trading platform based on blockchain technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 89-96.

[13] XUE L, TENG Y, ZHANG Z, et al. Blockchain technology for electricity market in microgrid [C]// 2nd International Conference on Power and Renewable Energy, September 20-23, 2017, Chengdu, China: 704-708.

[14] QI M, YANG H, WANG D, et al. Prosumers peer-to-peer transaction decision considering network constraints[C]// 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration, November 8-10, 2019, Changsha, China: 643-647.

[15] 刘升.电网可用输电能力的研究[D].北京：中国电力科学研究院，2008.
LIU Sheng. Research on available transmission capacity of power grid [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.

[16] 王亚萍.博弈论在含光伏电站和电动汽车的区域电网鲁棒优化调度中的应用[D].西安：西安理工大学，2016.
WANG Yaping. Robust optimal dispatch of power system with photovoltaic power stations and electric vehicle based on game theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.

[17] 钱佳琦，江岳文.计及配电网节点边际容量成本的多类型分布式电源规划[J].电力自动化设备，2016，36(3)：94-99.
QIAN Jiaqi, JIANG Yuewen. Multi-type distributed generator planning considering locational marginal capacity cost of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 94-99.

[18] 马国栋.一般约束极大极小优化问题一个强收敛的广义梯度投影算法[J].数学物理学报，2020，40(3)：641-649.
MA Guodong. A strongly convergent generalized gradient projection algorithm for general constrained minimax optimization problems[J]. Acta Mathematica Physics, 2020, 40(3): 641-649.

[19] 赵文杰，周光明.多项式极大极小问题的数值方法[J].湘潭大学学报(自然科学版)，2020，42(2)：28-40.
ZHAO Wenjie, ZHOU Guangming. Numerical methods for polynomial minima problems[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2020, 42(2): 28-40.

[20] 侯同运，邵金平.求解极大极小问题的熵函数法的改进[J].山东农业大学学报(自然科学版)，2009，40(3)：451-453.
HOU Tongyun, SHAO Jinping. Improvement of entropy function method for solving minimax problems[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 40(3): 451-453.

[21] BELL D E. Regret in decision making under uncertainty[J]. Operations Research, 1982, 30(5): 961-981.

[22] LOOMES G, SUGDEN R. Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty[J]. The Economic Journal, 1982, 92(368): 805-824.

[23] BELL D E. Disappointment in decision making under uncertainty[J]. Operations Research, 1985, 33(1): 1-27.

[24] 李娜，高雷阜，王磊.基于Pythagorean模糊熵的风险型决策方法—考虑后悔与失望规避[J].运筹与管理，2020，29(6)：130-138.
LI Na, GAO Leifu, WANG Lei. Risky multiple attribute decision making based on Pythagorean fuzzy entropy with regret aversion and disappointment aversion[J]. Operations Research and Management, 2020, 29(6): 130-138.

[25] 赵旭阳，王聪，牛胜锁，等.综合考虑中性点接地方式和网架结构的配电网供电可靠性的评估[J].电测与仪表，2019，56(18)：49-56.
ZHAO Xuyang, WANG Cong, NIU Shengsuo, et al. Evaluation of power supply reliability of distribution network

considering neutral grounding mode and grid structure [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 56(18): 49-56.

吴治国(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力市场。E-mail:2294900713@qq.com

刘继春(1975—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统经济性分析及电力市场。E-mail:jichunliu@scu.edu.cn

张　帅(1987—),男,博士研究生,主要研究方向:可再生能源互补发电及电力市场。E-mail:shuaizhang@stu.scu.edu.cn

(编辑　王梦岩)

Peer-to-Peer Transaction Model of Multiple Power Sellers and Its Dynamic Network Fee Mechanism

WU Zhiguo[1], *LIU Jichun*[1], *ZHANG Shuai*[1], *PU Tianjiao*[2], *YANG Zhifang*[3], *LIU Junyong*[1]

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: With the deregulation of the power sale side, distributed power generation and electricity sale companies compete together and form a trading market with multiple electricity sale entities. However, existing trading models have many drawbacks. For example, the uniform pricing of network fees is difficult to fairly deal with the impact of different transactions on grid operation costs, and the centralized transaction form is difficult to efficiently and economically process a large number of distributed transactions. Therefore, it is especially important to establish a reasonable trading model. For this reason, this paper discusses the peer-to-peer transaction model of multiple electricity sellers with the dynamic network fee mechanism. Considering the small-volume and high-frequency characteristics of peer-to-peer transactions, the min-max problem of dynamic network fees based on sensitivity coefficients is established and solved. Using the matching mechanism of continuous double auctions and considering the general-customized service provided by electricity sellers, the multi-round transactions mechanism of two continuous double auctions with dynamic network fees is proposed. In multi-round transactions, a real-time rolling network verification method is proposed for each round of transactions. Considering the psychological behavior of both parties of the transaction, an improved disappointment-regret avoidance theory is proposed to update the quotation. Simulation results show that the proposed dynamic network fee mechanism can allocate the operation cost of the power grid more reasonably according to the characteristics of each transaction, and the designed peer-to-peer transaction mechanism can safely, economically and efficiently realize the multilateral bidding transactions considering the dynamic network fees.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2066209).

Key words: peer-to-peer; dynamic network fee; customized service; continuous double auction; disappointment-regret avoidance theory