考虑风险分摊的多主体交易及利润分配方法

唐佳圆，赵文彬，卢武，高源
（上海电力大学 电气工程学院，上海 200090）

摘要：在电力市场环境下，虚拟电厂实现联合运营关键在于内部多主体间的利益分配。为解决虚拟电厂内各主体清洁能源出力不确定性对联盟最终利润分配的影响，基于条件风险价值理论（CVaR）和蒙特卡洛（Monte Carlo）模拟方法建立虚拟电厂内部计及各主体不确定性风险的惩罚成本函数，形成考虑风险分摊机制的多主体合作博弈模型；分析各个主体风险大小对收益的影响，采用纳什谈判理论构建考虑各主体不确定性风险和边际效益等因素的利润分配模型，最终实现虚拟电厂总收益的合理分配。通过算例仿真表明该模型能有效降低系统运行的风险，最大化各主体利益，证明该分配方法的合理性。

关键词：虚拟电厂；联合运营；条件风险价值；风险分摊；合作博弈；纳什谈判
中图分类号：TM28 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd23231

Multi-agent Transaction and Profit Distribution Method Considering Risk Allocation

TANG Jiayuan，ZHAO Wenbin，LU Wu，GAO Yuan
（*College of Electrical Engineering*，*Shanghai University of Electric Power*，*Shanghai* 200090，*China*）

Abstract: Under the electric power market environment，the key to achieve the joint operation of virtual power plants lies in the profit distribution among the internal multi-subjects. To solve the impact of the final profit distribution，which is caused by the uncertainty of the clean energy output of each main body in the virtual power plant，based on both CVaR and Monte Carlo simulation method，a penalty cost function considering the uncertain risks of each subject in the virtual power plant was built ，a multi-agent cooperative game model considering a risk-sharing mechanism was formed. Analyzing the impact of each subject's risk on returns，The Nash negotiation theory was adopted to construct a profit distribution model comprehensively considering various aspects such as uncertain risks of each main body and marginal benefits. Finally，a reasonable distribution of the total revenue in the virtual power plant would be realized. Numerical example simulation shows that the model can effectively reduce the risk of system operation and maximize the benefits of each subject. Consequently，the distribution method is proved reasonable.

Key words: virtual power plant；joint operation；conditional value at risk；risk sharing；cooperative game；Nash negotiation

伴随清洁、高效的分布式能源大力发展，我国能源匮乏和环境污染问题得到改善，但其不可控性和波动性风险对电网功率平衡带来巨大挑战。因此，聚合多种能源协调的优化管理技术亟待发展。虚拟电厂[1]作为分布式能源管理的重要技术手段，在参与电力市场运营时具备分布性、灵活性、经济性等优点。但虚拟电厂联合多主体（分布式能源和需求侧资源）运营的关键在于不同主体间的利益均衡方式，其自身内部多主体的不确定性风险将影响运营收益和分配制度，因此探索多主体不确定性风险参与下虚拟电厂交易方式和利润分配方法至关重要[2]。

针对虚拟电厂不确定性风险处置问题，常用的方法有鲁棒法、机会约束法和条件风险价值理论（conditional value at risk，CVaR）法等[3-8]，其中鲁棒优化法原理是以保证不确定变量在波动区

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51707113）
作者简介：唐佳圆（1995—），男，硕士研究生，Email：491204832@qq.com

间内满足约束条件为前提，求得目标函数最优解，文献[3-4]考虑需求侧资源不确定性，建立基于鲁棒法的经济调度模型；机会约束法的特点是允许一定程度上无法满足约束条件的变量存在，即所求解结果只要满足约束不小于设定的置信水平情况即可，文献[5]采用机会约束，将风机出力波动性和功率传输可靠性相结合，采用分层协调技术和随机优化技术建立了综合能源管理系统经济调度模型；条件风险价值理论则可以为研究对象提供一种在经济性和鲁棒性之间取得平衡的度量指标[6]，文献[7-8]采用条件风险价值理论刻画系统运行面临的风险，并以整体收益最大化为目标求解优化模型。

在计及不确定性多主体交易框架下，公正合理的利益分配制度是虚拟电厂实现联合运营的关键[9]。通常合作联盟的利润分配方法包括核仁法[10]、Shapley值法[11]和Banzhaf-Owen值分配[12]方法等，文献[10]以所有参与者满意度最优为目标，为光伏、风电和火电调度总收益设计了基于核仁法的联盟利润分配策略；文献[11]在热电联供机组参与电网调峰后，采用Shapley值法以边际效益为依据，给出热力系统内部调峰的收益分配方案；文献[12]提出在电力系统多方合作联盟中，利用Banzhaf-Owen值对大联盟及优先联盟内部成员间的利润进行分配。上述文献从多角度考虑了合作利润分配的方法，但需要注意的是对虚拟电厂交易而言，内部主体的不确定性风险会影响整体及其他成员收益，所以风险大小也应该被作为利润分配的依据之一。

因此在现有研究基础上，本文建立一种计及不确定性风险分摊的多主体交易及利润分配方法，主要创新点如下：

1）基于条件风险价值理论量化虚拟电厂内的不确定风险[13]，建立不确定性的惩罚成本函数，形成考虑风险分摊机制的多主体合作博弈模型，保障各主体获得惩罚收益。

2）基于纳什谈判理论分析风险对收益的影响[14]，将各主体合作边际效益及其所承担的不确定性风险作为利润分配的影响因子，并以我国某地所能承受的风险区间作为权重，构建虚拟电厂利润分配模型。

1　多主体联合运营的市场框架

虚拟电厂聚合分布式电源、负荷、储能等多个主体，以联合运营的方式参与电力市场交易，平抑了风电、光伏输出功率波动性对电网的影响。此时，虚拟电厂作为市场独立主体，代理内部各主体的电力资源参与电力市场交易，基本框架如图1所示。

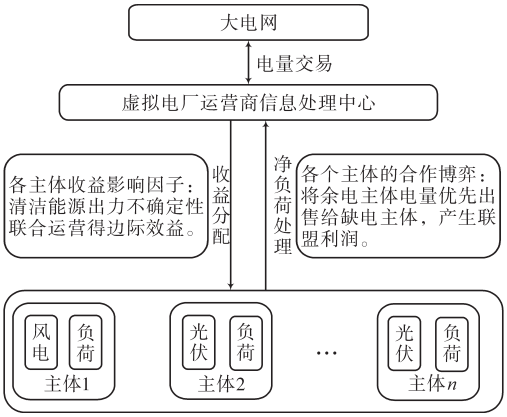

图1　虚拟电厂的交易框架

Fig.1　A trading framework for virtual power plant

在电力市场中虚拟电厂承担着对各个主体资源的灵活调度和利润分配的责任，各个主体间的利润分配是本文的研究重点。

2　基于条件风险价值理论的风险量化

随着分布式能源主体越来越多的参与到电力市场交易中，清洁能源出力的不确定性对电力市场经济稳定运行影响明显。因此，本文建立基于条件风险价值理论的惩罚模型，量化清洁能源出力不平稳时系统增加的运行风险[15]。

主体i在k时刻相对于实际出力偏差的惩罚成本函数可以定义为

$$g_k(P_{y1},\Delta\varepsilon_1)=\begin{cases}c_1\times\Delta\varepsilon_1 & \Delta\varepsilon_1>0\\ c_2\times(-\Delta\varepsilon_1) & \Delta\varepsilon_1<0\end{cases}\tag{1}$$

$$\Delta\varepsilon_1=P_{s1}-P_{y1}\tag{2}$$

式中：c_1为高估清洁能源出力的成本系数；c_2为低估清洁能源出力的成本系数；$\Delta\varepsilon_1$为预测误差；P_{s1}为实际出力；P_{y1}为预测出力。

假设由于高估出力或低估出力产生的惩罚成本最大值为a，则概率可以表示为

$$\Psi_1=(P_{y1},a)=\int_{g_k(P_{y1},\Delta\varepsilon_1)\leq a}f_1(\Delta\varepsilon_1)\mathrm{d}(\Delta\varepsilon_1)\tag{3}$$

$$a=\begin{cases}a_g & \Delta\varepsilon>0\\ a_d & \Delta\varepsilon<0\end{cases}\tag{4}$$

式中：$f_1()$为概率密度函数；a_g为低估出力造成的惩罚最小值；a_d为高估出力造成的惩罚最大值。

在一定置信水平β下，风险价值VaR和条件

风险价值CVaR分别为

$$VaR = \min\{a \in R: \Psi_1(x,a) \geqslant \beta\} \tag{5}$$

$$\phi_\beta(x) = \frac{1}{1-\beta}\int_{g_i(x,y)\geqslant VaR} g_i(x,y)\cdot f_1(x)\mathrm{d}x \tag{6}$$

式中：$\phi_\beta(x)$表示条件风险价值CVaR。

为简化计算过程，根据文献[16]证明结果可将F_β代替$\phi_\beta(x)$：

$$F_\beta(x,a) = a + \frac{1}{1-\beta}\times\int[g_i(x,y)-a]^+ f_1(x)\mathrm{d}x \tag{7}$$

由于式(7)中含有风光预测误差$\Delta\varepsilon$概率密度函数的积分表达难以求解，所以采用蒙特卡洛模拟方法，对随机变量抽样取值。

在蒙特卡洛模拟中，风电功率预测误差$\Delta\varepsilon_{\mathrm{mt}}$采用结合偏态分布和混合分布的混合偏态分布模型描述短期风电功率的出力预测误差[17]。光伏出力功率预测误差$\Delta\varepsilon_{\mathrm{pv}}$服从均值为0、标准差为$\sigma_{\mathrm{pv}}$的标准正态分布。

通过蒙特卡洛模拟化简，虚拟电厂在k时刻最终的惩罚成本函数为

$$F_\beta(x,a) = a + \frac{1}{m(1-\beta)}\times\sum_{k=1}^{m}[g_i(x,y)-a]^+ \tag{8}$$

式中：x表示P_{y1}；y表示$\Delta\varepsilon_1$；m表示24时段；$[g_i(x,y)-a]^+$表示$\max\{g_i(x,y)-a,0\}$。

3　多主体交易方式及利润分配

3.1　多主体的直接交易模式

各主体由负荷、清洁电源、储能组成，通过配电网与电网连接。在电力市场交易时，各主体的清洁能源出力要优先满足自身负荷，随后可以根据自身需求同电网交换电量(余电时，以电网购电价格p_{s}售电；缺电时，以电网售电价格p_{d}购电，$p_{\mathrm{d}} > p_{\mathrm{s}}$)即直接交易模式。在此模式下，大电网单独承受所有主体的清洁能源出力不确定性风险；大电网将各个主体惩罚支出作为承担的风险收益。

以日为计算周期并等分为24个时段。在第k时间段内，主体i的负荷功率为$L_i(k)$；清洁能源出力为$P_i(k)$；电网的购电电价为$p_{\mathrm{s}}(k)$；售电电价为$p_{\mathrm{d}}(k)$；则主体i在k时刻的净负荷为：$Q_i(k) = L_i(k) - P_i(k) - \Delta\varepsilon_i$，主体$i$在一天时间内收益$M_i$为

$$M_i = \sum_{i=1}^{24} M_i(k) - E_i(k) \tag{9}$$

$$M_i(k) = \begin{cases} -p_{\mathrm{s}}(k)\times Q_i(k) & Q_i(k) < 0 \\ -p_{\mathrm{d}}(k)\times Q_i(k) & Q_i(k) > 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$E_i(k) = F_i(k) = F_\beta \tag{11}$$

式中：$E_i(k)$为主体i的惩罚支出。

3.2　基于合作博弈的联合运营交易方式

博弈论中合作博弈是指博弈参与者通过某种特定的约束协议结成联盟，从而获得更优的交易策略[18]。在电力市场交易中，虚拟电厂通过某种协议联合各个主体形成联盟，在联盟内部有多余电量的主体将余电优先出售给缺电主体，使缺电主体以电网售电的价格交易获取电量，即产生了各主体的合作利润[19]。在此模式下，虚拟电厂和大电网一起承担风光出力不确定所造成的风险，最终各主体的惩罚支出应为虚拟电厂和电网共同的惩罚收益，从而建立如图2所示的考虑风险分摊的合作模型。

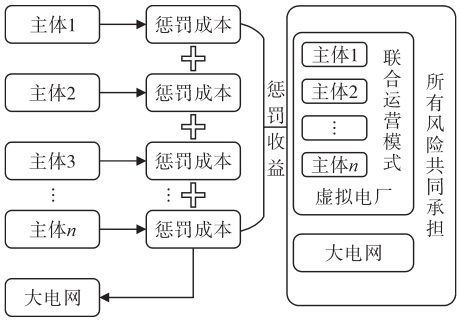

图2　惩罚收益图

Fig.2　Punishment gain

假设一个虚拟电厂内有n个主体，则虚拟电厂的收益$V(s)$、电网与虚拟电厂共同的惩罚收益$F(s)$为

$$V(s) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{24} G_i \times [p_{\mathrm{d}}(k) - p_{\mathrm{s}}(k)] \tag{12}$$

$$G_i = \sum_{k=1}^{24}\min\{\sum_{i\in P_k} -Q_i(k), \sum_{j\in Q_k} -Q_j(k)\} \tag{13}$$

$$F(s) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{24} E_i(k) \tag{14}$$

式中：$P(k)$，$Q(k)$分别为k时刻所有多电主体和缺电主体的集合；G为存在合作收益交易电量的总和。

3.3　基于纳什谈判方法的利润分配

合作联盟总体利润确定后，就该考虑如何公平、公正的合理分配。合作联盟的利润分配必须满足合作博弈的核心理论。

在本文模型中，联盟参与者利润分配的影响因素为各主体承担的不确定性风险大小和合作

利润的边际效益。单一的Shapley分配满足核心理论，但只考虑合作的边际效益却忽视合作所承担的风险大小。因此基于联盟利益分配影响因素，将纳什谈判模型应用于虚拟电厂多主体合作博弈的利润分配[20]。在谈判模型中，采用Shapley法和惩罚成本函数共同确定虚拟电厂内各主体的利润分配因子。

3.3.1　纳什谈判模型

假设合作联盟中各主体的利益分配因子分别为$b_1,b_2,...,b_n$。分配因子表示参与者各自对联盟总收益的利益分配比例。x_i为联盟参与者的最终收益，则各个参与者的效用函数为

$$U_i = (x_i)\frac{b_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i} \tag{15}$$

各个参与者效用乘积最大化，即联盟效用最大化，其纳什均衡求解方程为

$$\mathrm{MAX}\prod_{i=1}^{n}(x_i)\frac{b_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i} \tag{16}$$

$$s.t.\begin{cases} 0 \leqslant x_i \leqslant V \\ \sum_{i=1}^{n} x_i \leqslant V \end{cases} \tag{17}$$

3.3.2　分配因子的确定

计算分配因子只需对影响分配因子的因素进行分析。文中包含两点：一是联盟合作利润的边际效益，二是联盟参与者的惩罚成本。则分配因子b_i为

$$b_i = \boldsymbol{w}_i \times (\alpha_i,\gamma_i)^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

式中：α_i为合作利润的比重因子；γ_i为惩罚成本的比重因子；$\boldsymbol{w}_i$为比重因子的权重，是行向量。

风险惩罚因子的权重与该地区输电网络的稳定性有关，能接受较大网络波动时权重就小；反之权重则大。

采用Shapley值法确定合作利润边际效益的比重因子[19]。用Shapley值可以初步得到合作利润的分配结果，将其结果进行处理，可反映联盟参与者在合作利润中的比重。

Shapley合作利润分配公式为

$$\varphi_i = \sum_{s \in s_i} w(|s|) \times [v(s) - v(s-i)] \tag{19}$$

$$w(|s|) = \frac{(|s|-1)!(n-|s|)!}{n!} \tag{20}$$

式中：φ_i为虚拟电厂i在多主体中所分配的利润；s_i为所有含主体i的联盟子集；$v(s)$为s对应的利润；$v(s)-v(s-i)$为主体i参与所带来的影响。

联盟参与者合作利润的比重因子为

$$\alpha_i = \frac{\varphi_i}{\sum_{i=1}^{n}\varphi_i} \tag{21}$$

承担风险的比重因子用风光惩罚成本大小来计算，每位参与者的惩罚成本就是除自身外其他联盟参与者和大电网所承担风光不确定性的风险收益，则其式为

$$\gamma_i = \frac{\frac{1}{n}\sum_{l \in s_i} F_l}{\sum_{i=1}^{n+1} F_i} \tag{22}$$

式中：F_i为大电网的惩罚成本；s_i为除了i以外参与者组成的联盟。

4　求解方法

文中数据处理步骤如图3所示。

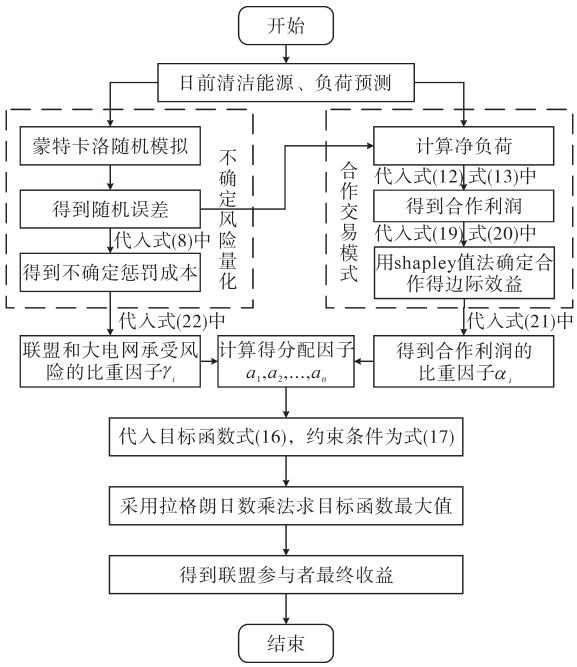

图3　求解步骤

Fig.3　Solution step

由图3可知，数据处理主要求解步骤如下：

1）通过蒙特卡洛模拟得到随机误差，计算各个虚拟电厂的惩罚成本，通过惩罚成本计算得到各主体承担风险的比重因子；

2）计算随机误差存在时各虚拟电厂的净负荷；通过净负荷得到合作联盟的合作利润，并用Shapley值得到合作利润的分配结果，处理结果得到联盟参与者在合作利润中的比重；

3）结合比重因子的权重得到各个主体的分配因子，带入目标函数后利用拉格朗日数乘法求解。

5 算例分析

5.1 基础数据

本文以某地区包含三个主体联合运营的虚拟电厂系统为例。置信水平β取0.9，蒙特卡洛模拟抽取样本数M取1 000，权重向量$\boldsymbol{w}_i$取(0.2，0.8)。

三个主体的清洁能源出力预测如图4所示(时间间隔为1小时，分为24时段)，主体1主要为大功率光伏出力，见图4光伏1曲线；主体2主要为风能出力，见图4风机2曲线；主体3主要为小功率光伏出力，见图4光伏2曲线。

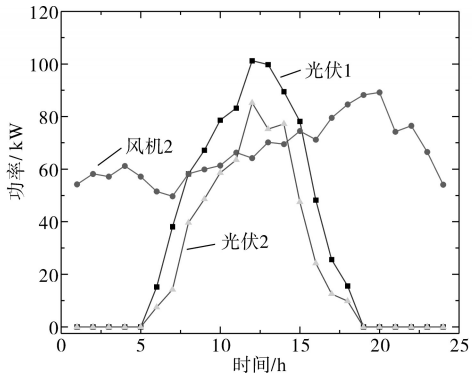

图4　清洁能源出力图

Fig.4　Clean energy output

各个主体自身需求负荷如图5所示(时间间隔为1 h，分为24时段)。

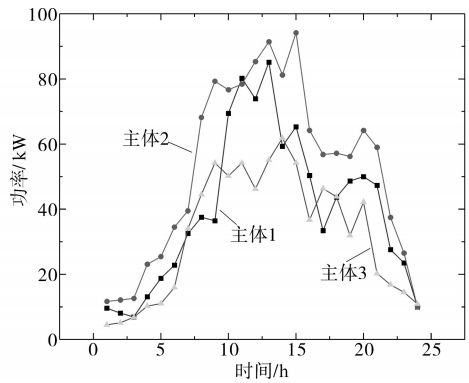

图5　各主体负荷需求情况

Fig.5　Each load demand situation

光伏和风机出力成本如表1所示。

表1　成本数据

Tab.1　Cost data

类型	功率下限/kW	功率上限/kW	运行成本/[¥·(kW·h)$^{-1}$]
电网	0	∞	分时电价
风电机组	0	预测值	0.35
光伏	0	预测值	0.45

电网售电电价采用分时电价，峰时段为10:00~15:00，18:00~21:00；平时段为7:00~10:00，15:00~18:00，21:00~24:00；谷时段为0:00~7:00；各时段电价如表2所示。

表2　分时电价

Tab.2　Time-of-use power price

时间	售电电价/[¥·(kW·h)$^{-1}$]	购电电价/[¥·(kW·h)$^{-1}$]
平时段	0.53	0.38
峰时段	0.83	0.65
谷时段	0.22	0.17

5.2 仿真结果分析

5.2.1 置信水平对惩罚成本的影响分析

以主体2在12时刻仿真结果为例，如表3所示，其惩罚成本$\widetilde{F}_\beta$随着置信水平β的增加而增大。这是由于在置信水平不断增大时，虚拟电厂运行考虑规避的风险也就越大，对自身的运行要求也就越高，所以针对清洁能源出力的惩罚成本也会不断提高。

表3　不同置信水平下的惩罚成本

Tab.3　Penalty costs at different confidence levels

β	$\widetilde{F}_\beta$
0.90	3.43
0.91	3.79
0.93	4.82
0.95	6.67
0.97	10.90
0.99	32.60

5.2.2 总收益和利润分配方案分析

多主体直接交易模式和虚拟电厂联合运营交易的总收益和惩罚成本如表4所示。

表4　不同模式下的收益

Tab.4　Benefits of different participants

模式	惩罚支出/元	总收益/元
直接交易	231.9	−441.2
联合运营	77.4	−206.2
差值	154.5	235.0

由表4可知，联合运营模式下的惩罚支出为77.4元，较直接交易模式的惩罚支出减少了154.5元，各主体通过风险分摊获取风险收益降低惩罚支出；联合运营模式下的总收益为−206元，即支出206元，较直接交易模式的支出减少235.2元。联合运营总收益包含各主体承担风险所得的风险收益和合作利润，因此其收益远高于直接交易模式。

将联合运营总收益采用纳什谈判法对各主体逐时收益进行分配，并和直接交易下各个主体

收益比较，对比结果如图6~图8所示。

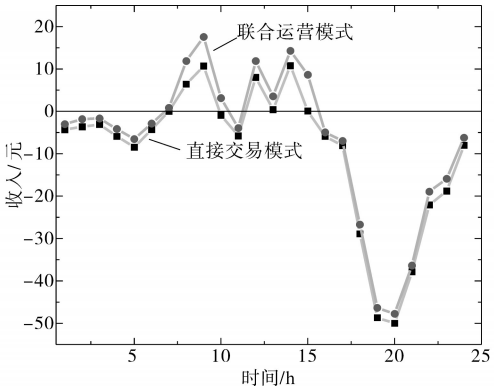

图6　主体1收益比较

Fig.6　Revenue comparison of the participant 1

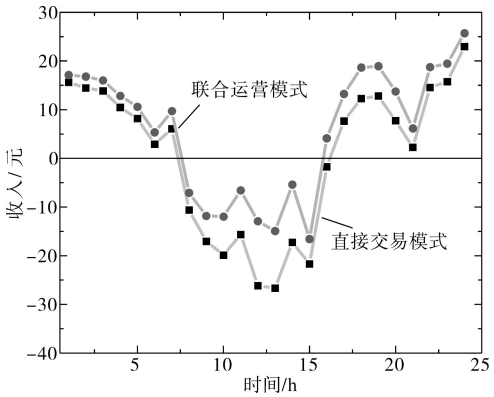

图7　主体2收益比较

Fig.7　Revenue comparison of the participant 2

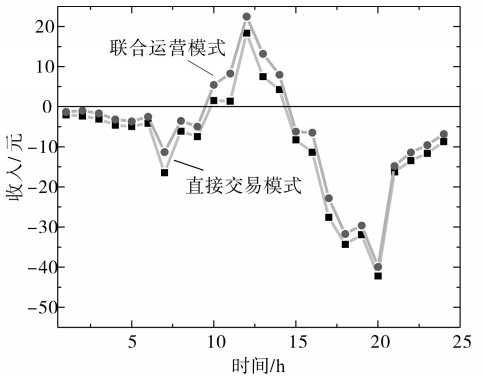

图8　主体3收益比较

Fig.8　Revenue comparison of the participant 3

联合运营模式下，各个主体逐时收益较直接交易模式都有所增加，支出有所减少，满足合作博弈中利润分配的核心理论[11]，证实了该分配制度的有效性。为进一步证明分配方案的合理性，将分配结果与采用Shapley值法的分配结果对比，并分析风险大小对利润分配影响，结果如表5所示，单位 元。由表5可知，主体3在联盟中惩罚成本最小，主体1和主体2的惩罚成本较大，表明在该联盟中主体3的风险相对较小，主体1次之，主体2造成的风险最大。

表5　各主体的收益（元）

Tab.5　Benefits of different participants（yuan）

模式	惩罚成本	纳什谈判法	Shapley值法	差值
主体1	67.4	−160.5	−168.7	8.2
主体2	129.3	100.0	131.6	−31.6
主体3	35.2	−145.7	−169.1	23.4
合计	/	−206.2	−206.2	0.0

文中所提的纳什谈判分配制度综合考虑了各个主体的风险大小和边际效益，因而结果与Shapley值法产生差异，由表5可知，在纳什谈判法下主体3获得更高收益，主体1收益少量增加，而主体2收益则降低31.6元，该结果是因为主体2对联盟造成的风险远高于其他主体，而主体1和主体3的风险相对较低所导致。

5.2.3　承受风险能力对合作模型的影响

本文利润分配方法考虑了各主体边际效益大小和风险大小，当两者权重向量发生改变时，$w_i(1,\ 0)$到$w_i(0,\ 1)$，即该区域电网出力波动性承担能力从最大到最小时，各个主体收益与电网惩罚收益如图9所示，图10是对图9中主体1和主体3的细节描述。

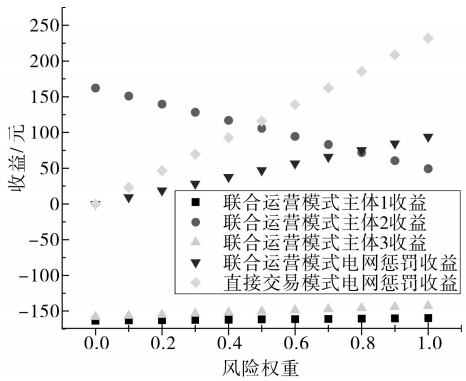

图9　各个主体在不同权重下的仿真结果

Fig.9　Simulation results of different participants under different weights

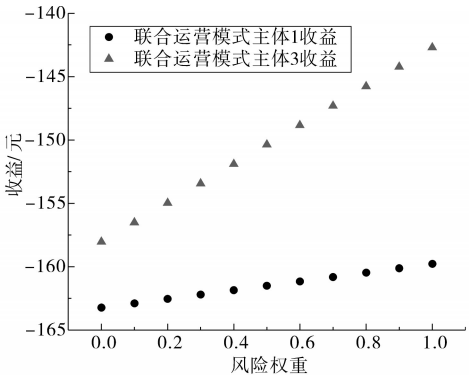

图10　主体1和主体3不同权重下的收益

Fig.10　Benefits of participant 1 and participant 3 at different weights

随着电网出力波动性承担能力的降低，电网承担的风险和获取的风险收益不断变大。在联合运营模式下，多虚拟电厂组成联盟分摊部分电网承担的风险，降低电网所承担的风险，因此较直接交易的惩罚收益有所降低。

由图9可知，在电网对功率波动性承担能力最大时，联盟内部主体2收益最大，主体1和3收益最小，这是因为该时刻风险权重为0，只考虑合作边际效益，此时合作收益与主体贡献正相关；当电网对风险承受能力下降、风险权重不断增加时，主体2造成的风险和惩罚成本最大，收益不断降低；主体1和主体3造成的风险较小，收益增加。

通过上述仿真结果，能够为联合运营工作人员在电网不同风险承受能力时，选取不同风险权重分配利润提供参考。

6 结论

在含多主体联合运营的虚拟电厂参与的电力市场中，本文考虑清洁能源出力不确定性对交易的影响，建立多方参与的合作博弈模型，并采用纳什谈判方法将不确定风险和合作边际效益结合并完成利润分配，具体研究结论如下：

1）考虑风险分摊机制的多主体合作交易模式参与市场交易时，不仅能增加收入、减少支出，还能降低清洁能源不确定性对电网造成的风险。

2）采用纳什谈判模型的利润分配方法让联盟参与者的最终收益更加合理，降低联盟高风险参与者收益、增加低风险参与者收益，平衡风险和收益关系。不同权重（即地区风险承受能力变化）下各主体的收益变化趋势，也为管理人员提供参考。

参考文献

[1] 卫志农，余爽，孙国强，等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化，2013，37(13)：1-9.
Wei Zhinong，Yu Shuang，Sun Guoqiang，*et al*. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(13)：1-9.

[2] Zhu Jizhong，Liu Qiaobo，Xiong Xiaofu，*et al*. Multi-time-scale robust economic dispatching method for the power system with clean energy[J]. The Journal of Engineering，2019(16)：1377-1381

[3] 孙鹏，滕云，回茜，等. 考虑热惯性不确定性的多能源系统两阶段鲁棒优化调度模型[J]. 中国电机工程学报，2021，41(21)：7249-7260，中插6.
Sun Peng，Teng Yun，Hui Qian，*et al*. Two-stage robust optimal scheduling model for multi-energy systems considering thermal inertia uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE. 2021，41(21)：7249-7260，中插6.

[4] 张军，张中丹，王洲，等. 基于数据驱动的微电网双层鲁棒优化调度[J]. 电气传动，2022，52(1)：68-75.
Zhang Jun，Zhang Zhongdan，Wang Zhou，*et al*. Double layer robust optimal dispatching of micro-grid based on data-driven[J]. Electrical Drive，2022，52(1)：68-75.

[5] Chen Kening，Wu Wenchuan，Zhang B.H，*et al*. Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2015，6(2)：587-597.

[6] 晋宏杨，孙宏斌，牛涛，等. 考虑风险约束的高载能负荷-风电协调调度方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(16)：9-18.
Jin Hongyang，Sun Hongbin，Niu Tao，*et al*. Coordinated dispatch method of energy-extensive load and wind power considering risk constraints[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43 (16)：9-18.

[7] 刘怀东，冯志强，王锦桥，等. 计及条件风险价值的综合能源系统经济调度[J]. 电网技术，2018，42(5)：1385-1392.
Liu Huaidong，Feng Zhiqiang，Wang Jinqiao，*et al*. Economic dispatch of integrated energy systems considering conditional value-at-risk[J]. Power System Technology，2018，42(5)：1385-1392.

[8] 郭红霞，高瑞，杨苹. 基于条件风险价值的微电网现货市场两阶段调度[J]. 电网技术，2019，43(8)：2665-2674.
Guo Hongxia，Gao Rui，Yang Ping. Two-stage dispatch of microgrid spot market based on conditional value-at-risk[J]. Power System Technology，2019，43 (8)：2665-2674.

[9] 王宣元，刘敦楠，刘蓁，等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术，2019，43(9)：3175-3183.
Wang Xuanyuan，Liu Dunnan，Liu Wei，*et al*. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things[J]. Power System Technology，2019，43(9)：3175-3183.

[10] 伍栋文，于艾清. 大规模多源联合外送协调调度中基于核仁理论的利润分配[J]. 电网技术，2016，40(10)：2975-2981.
Wu Dongwen，Yu Aiqing. Research on nucleolus theory based profit distribution method for joint delivery system of large-scale hybrid power generation[J]. Power System Technology，2016，40(10)：2975-2981.

[11] 周一凡，胡伟，闵勇，等. 热电联产参与电网调峰补偿定价与利益分配方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5325-5335，5579.