

基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型

秦 婷¹, 刘怀东^{1,2}, 王锦桥¹, 方 伟¹, 冯志强¹

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:虚拟电厂(VPP)内参与合作的分布式能源(DERs)往往分属不同的利益实体,实现VPP收益公平合理的分配至关重要。基于讨价还价博弈理论,通过效用函数反映风险厌恶程度,综合考虑边际贡献、间歇性电源的预测能力、平衡市场的惩罚力度等因素量化谈判力水平,从而建立DERs联合参与短期能量市场的收益分配模型。通过对VPP的实际算例分析,验证了所提模型的可行性与合理性,该模型可有效评价各DER的特性,保证分配的相对公平性和联盟的稳定性,并可对DERs行为形成正向激励和引导,提高经济利益。

关键词:虚拟电厂;分布式能源;博弈论;利益分配;谈判力

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.020

0 引言

随着全球能源紧缺与环境压力问题的日益凸显,以可再生能源RESs(Renewable Energy Sources)为主要形式的分布式能源DERs(Distributed Energy Resources)开始在电网中出现,并以迅猛的速度发展^[1]。尽管DERs的部署在原则上可以减少对传统发电厂的依赖,但单机容量小、随机性波动性强等特点阻碍了其单独参与电力市场的进程。由于各DER的特性存在差异,存在很强的互补性,通过合作以虚拟电厂VPP(Virtual Power Plant)的形式参与电网运行与市场交易,可有效解决上述问题并提高其经济利益^[2]。在竞争的电力市场环境下,各DER的投资与财务是独立的,如何建立较为公平、合理、透明的利益分配机制,是成功维护VPP内DERs合作关系的关键,这将在很大程度上影响DERs的并网与扩建^[3-4]。

现有关于VPP的研究大多关注于其作为整体参与电力市场竞标^[5-7],而较少关注利益分配机制。文献[8]建立了VPP与配电公司的协调调度模型,利用Shapley值法进行二者之间的收益分配。文献[9]建立了VPP的两阶段随机调度模型,并分别用Shapley值与核仁法进行了收益分配。以上2种方法是合作博弈中的经典方法,在利益分摊方面得到了广泛应用,能在一定程度上保证分配的公平性。然而,Shapley值法仅关注于参与者的边际贡献,其实质是对成员边际贡献的加权平均;该法的另一缺陷是不能保证分配结果位于核中。核仁法的思想是使对分配方案的最大不满意程度降到最低,但其同样忽视了参与者的特性。文献[10]从增加联盟稳定性的角度出发,考虑DERs边际贡献及不确定性预测水平的差异,在Shapley值分配结果的基础上进行微调,然而其未计及风险因素对收益分配的影响。文献[11]研究了多个VPP的联合调度及利益分配

问题,建立了基于奖惩的合作评判参考,并提出按实际出力比重分配收益、按固定比重分配奖惩的方法,但比重参数需人为设定。

在上述背景下,本文引入讨价还价博弈理论,在“合作-竞争”的理论框架下,首先给出了计及风险的DERs合作竞标模型,然后在综合考虑风险态度、边际贡献以及不确定性预测精度等因素的基础上,分别量化DERs的效用函数及谈判力,从而建立了DERs收益分配的讨价还价模型。算例分析验证了本文所提方法的可行性与有效性。

1 DERs合作竞标模型

整体利益最大化是DERs之间合作的前提,也是收益分配的基础。本节将建立DERs合作竞标的两阶段随机优化模型。

1.1 电力交易模型

考虑两结算能量市场。在日前阶段对日前市场电价及间歇性电源出力进行预测,根据优化调度模型进行日前市场竞标。考虑到DERs(包括合作组成的VPP)的规模较小,假设其为价格接受者,其竞价行为不影响市场出清电价。在交易日,若间歇性电源的实际出力与竞标值出现偏差,其将在平衡市场中接受惩罚。当实际出力大于竞标出力时,DERs以低于日前电价的价格售电;反之,则以高于日前电价的价格购电^[5]。为简化处理,将正、负不平衡价格设为日前电价的一固定比例^[5,7,11]。

1.2 不确定性及风险

由于电价和间歇性电源出力存在不确定性,当日前竞标量确定之后、交易日到来之前,DERs的收益呈现一个概率分布,每一个不确定性的实现方式对应一个实际收益。对于不同风险偏好的DERs所有者,其不仅关注于收益的期望值,还关心收益的概率分布情况,如可能最差的收益是多少。即DERs的实际收益可能高于其期望值,也可能低于期望值,竞标的过程存在风险。

然而,从另一方面看,也正是不确定性及风险的存在为 DERs 提供了合作的空间。比如,一台风机在交易日中的实际出力大于其日前竞标值,若其单独运行,将在平衡市场中以低价卖出。若其参与到 VPP 中,则存在以下可能:填补另一间歇性电源(如光伏)的功率缺额,后者在单独运行时将在平衡市场中以高价买入所缺功率;将多发的电能存储到储能装置中,以备将来可能出现的功率缺额或在高电价时段卖出。上述场景的存在使得合作后的总收益大于其单独运行时的利润之和,体现了“1+1>2”的直观效果,产生了合作剩余^[9]。

本文采用场景分析法对电价和间歇性电源的出力进行处理,包括场景生成和削减 2 个阶段。采用自回归-滑动平均 ARMA (AutoRegressive Moving Average) 模型生成场景^[12],误差服从均值为 0 的正态分布。采用基于 Kantorovich 距离的快速前代选择算法进行场景削减^[11-12],加速削减相似场景,提高计算速度。设电价的场景数量为 N_D ,风电、光伏的出力场景数量分别为 N_W 、 N_P ,则总场景数 $N_S = N_D N_W N_P$ 。

1.3 VPP 日前优化运行模型

本文同时计及期望收益与交易风险,采用条件风险价值 CVaR (Conditional Value at Risk) 作为风险计量指标。

1.3.1 目标函数

$$\max \beta \sum_{\omega=1}^{N_S} \sum_{t=1}^T \pi_{\omega} \Pi_{t\omega} + (1-\beta) \left(\zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega=1}^{N_S} \pi_{\omega} \eta_{\omega} \right) \quad (1)$$

$$\Pi_{t\omega} = \lambda_{t\omega}^{\text{DA}} P_t^{\text{DA}} + \lambda_{t\omega}^{\text{DA}} (r^+ P_{t\omega}^+ - r^- P_{t\omega}^-) - C(P_{t\omega}^{\text{MT}}) \quad (2)$$

其中, $\beta \in (0, 1]$ 为权重因子(本文称之为风险系数),反映了决策者的风险厌恶水平,其取值会对竞标量以及收益产生显著影响^[9],其值越大表明风险厌恶水平越低,当 $\beta=1$ 时表示风险中性; T 为调度周期内的总时段数; π_{ω} 为第 ω 个场景的概率; $\Pi_{t\omega}$ 为时段 t 场景 ω 下的交易收益; ζ 表示风险价值 (VaR); α 为置信水平; η_{ω} 为非负的辅助变量,表示 VaR 与场景 ω 下收益的差值,当差值为负时, $\eta_{\omega}=0$; $\lambda_{t\omega}^{\text{DA}}$ 为时段 t 场景 ω 下的日前市场电价; P_t^{DA} 为 VPP 在日前市场的竞标值,值为正时表示向市场售电,值为负时表示向市场购电; r^+ 、 r^- 分别为正、负不平衡价格系数,满足 $0 \leq r^+ \leq 1 \leq r^-$; $P_{t\omega}^+$ 、 $P_{t\omega}^-$ 分别为 VPP 实际出力与竞标出力的正偏差和负偏差; $P_{t\omega}^{\text{MT}}$ 为微型燃气轮机 MT (Micro gas Turbine) 的出力, $C(P_{t\omega}^{\text{MT}})$ 表示其成本,本文采用分段线性化处理。

目标函数包括两部分: VPP 的期望收益; CVaR, 其能够反映收益分布的“尾部”特征,可以由 VaR 得到,其含义为当置信水平为 α 时收益低于 VaR 部分

的条件均值^[12]。

1.3.2 约束条件

a. 功率平衡约束:

$$P_{t\omega}^{\text{W}} + P_{t\omega}^{\text{PV}} + P_{t\omega}^{\text{MT}} + P_{t\omega}^{\text{SD}} + P_{t\omega}^- = P_t^{\text{DA}} + P_{t\omega}^{\text{SC}} + P_{t\omega}^+ \quad (3)$$

其中, $P_{t\omega}^{\text{W}}$ 、 $P_{t\omega}^{\text{PV}}$ 分别为风电、光伏出力; $P_{t\omega}^{\text{SC}}$ 、 $P_{t\omega}^{\text{SD}}$ 分别为储能设备的充、放电功率。

b. 风险约束:

$$\zeta - \sum_{t=1}^T \Pi_{t\omega} \leq \eta_{\omega} \quad (4)$$

$$\eta_{\omega} \geq 0 \quad (5)$$

此外,包括 MT 和抽水蓄能电站 (PHSP) 的运行约束,如出力上下限、最小开停机时间、爬坡速率和蓄水容量等,可参见文献[7],本文不再赘述。上述式(1)~(5)构成了日前竞标模型,记为 P1。

1.3.3 VPP 的风险系数

VPP 内的成员 (DERs) 往往具有不同的风险厌恶态度 β_i ,联合调度时应予以考虑。可考虑以各 DER 单独调度时的期望收益 $E(\Pi(i))$ 作为权重,求得联合调度时的风险系数:

$$\beta = \sum_{i=1}^M k_i E(\Pi(i)) \beta_i / \sum_{i=1}^M k_i E(\Pi(i)) \quad (6)$$

其中, M 为 DERs 的总数量; k_i 为状态变量,若第 i 个 DER 加入联盟其值为 1,否则为 0。

1.4 VPP 实时优化运行模型

在交易日,不确定量逐渐实现,VPP 可根据其实现方式实时作出调整,从而最大化自身收益。因此,上述调度模型需重新计算,与日前调度的区别是日前电价、风光出力及日前竞标量作为确定量。此时,调度模型从随机规划变为确定性规划,记为 P2。

上述 P1、P2 模型均为混合整数线性规划问题,可用成熟商用求解器如 CPLEX、Gurobi 解算。

2 DER 收益分配模型

本节采用讨价还价博弈理论进行 VPP 内部 DERs 的收益分配。

2.1 合作博弈基础

一个公平、合理的分配方案应满足合作博弈的一般原则。

定义 1 设 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 为博弈者集合, N 的任意子集 $S \subseteq N$ 称为一个联盟。

定义 2 给定博弈者集合 N , 联盟 S 的总收益 $v(S)$, 若 v 满足 $v(\emptyset) \neq 0$, 则称 $v(\cdot)$ 为特征函数。

定义 3 联盟博弈 (N, v) , 博弈的所有参与者 i 的收益值 X_i 构成的 n 维向量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 满足:

$$X_i \geq v(\{i\}) \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} X_i = v(N) \quad (8)$$

则称 X 为联盟博弈 (N, v) 的一个分配。

定义 4 对于任意联盟 $S \subseteq N$, 所有满足式(9)的分配 X 构成的集合称为该联盟博弈的核, 记为 $C(N, v)$ 。

$$\sum_{i \in S} X_i \geq v(S) \quad (9)$$

式(7)称为个体理性条件, 对于个体而言, 参与合作联盟能够较“单干”时获得更多收益, 个体才会有合作的意愿; 式(8)称为整体理性条件, 大联盟所得收益需全部分配给所有参与者; 式(9)称为联盟理性条件, 若干参与者在联盟中分得的收益之和应不少于它们组成的小联盟的收益, 否则联盟是不稳定的, 参与者会选择退出大联盟而结成小联盟。当且仅当位于核中, 一个收益分配才是稳定的^[13]。

2.2 讨价还价博弈理论

讨价还价博弈理论作为博弈论的重要分支, 是研究利益分配问题的有力工具, 可更为准确地刻画合作收益的分配过程, 更为方便地计及各种因素对分配结果的影响^[14], 其已成功地应用于网络资源配置、中长期购电计划制定等领域^[15-16]。

对于一般的讨价还价问题, Nash 在 4 条公设(个人理性、Pareto 强有效性、尺度协变性、无关选择的独立性)下证明了使得广义 Nash 积最大化的解 x_i^* 就是该问题的均衡解(广义 Nash 讨价还价解)^[15]:

$$x_i^* = \arg \max_{x_i} \prod_{i \in N} (U_i(x_i) - U_i(x_{i, \min}))^{\alpha_i} \quad (10)$$

其中, $\arg \max_x f(x)$ 表示 $f(x)$ 取最大值时 x 的取值; $x_i \in (0, 1)$ 为参与者分配到的收益在大联盟总收益中的占比, 是决策变量; $U_i(\cdot)$ 为效用函数; $\alpha_i > 0$ 为各成员的谈判力, 满足 $\sum_{i \in N} \alpha_i = 1$; $x_{i, \min}$ 为参与者的谈判初始点。

因此, 利益分配问题转化为求 Nash 讨价还价解的过程, 该均衡解的经济学意义是使联盟的总效用最大化。从式(10)可知, Nash 讨价还价解受效用函数、谈判初始点以及谈判力的影响, 下面分别加以叙述。

2.3 效用函数

效用描述的是决策者对收益的偏好, 具有主观和客观两重特性, 能反映决策者的风险态度^[17]。经标准化处理, 效用函数是定义域和值域都在 $[0, 1]$ 区间的一个单调递增函数。采用风险系数作为折算标准, 当 $\beta = 1$ 即风险中性时, 效用函数是一条直线; 当 $\beta < 1$ 即风险规避时, 效用函数是一条上凹曲线^[17], 且风险厌恶水平越高, 效用函数曲线越“凹”。本文选取应用较为广泛的对数型效用函数模型^[18]。

$$U_i(x) = \begin{cases} c_i + b_i \ln \{x + \beta_i^2 / [4(1 - \beta_i)]\} & 0 < \beta_i < 1 \\ x & \beta_i = 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中, c_i, b_i 为待定系数, 当给定 β_i 后可通过 $(0, 0)$ 、 $(1, 1)$ 两特殊点求得。

2.4 谈判初始点

谈判初始点是各参与者可能得到的最差收益份额, 表明了参与者的“底线”, 若分得的收益小于谈判初始点, 则谈判破裂, 联盟面临解散。由个体理性, 以参与者“单干”时的收益来计算是合理的, 即:

$$x_{i, \min} = \frac{v(\{i\})}{v(N)} \quad (12)$$

2.5 谈判力

从 Nash 讨价还价解的形式上可以看出, 各参与者获得的收益与其谈判力密切相关。在所有参与者的谈判力均等的条件下(对称讨价还价问题), 讨价还价解将均分参与者的效用增量^[13]; 在非对称条件下, 若某一参与者的谈判力增强, 其将会分得更多的收益。本文将谈判力从边际贡献和不确定性预测精度两方面进行量化。

2.5.1 边际贡献

收益分配过程应体现“论功行赏”的原则, 而边际贡献是 DERs 价值的直观表现, 定义如下^[10]:

$$S_i^{\text{MC}} = \frac{v(N) - v(N - \{i\})}{v(N)} \quad (13)$$

由上述定义可知, DERs 的边际贡献越大, 其 S_i^{MC} 越大, 且该指标自然地位于 $[0, 1]$ 标准区间。

2.5.2 预测精度

在 1.1 节中已经述及, VPP 参与电力市场的不确定性来源于电价及间歇性电源出力 2 个方面。前者为所有成员共同面对, 在不考虑各 DER 电价预测方法差异的情况下, 该因素不对相对谈判力产生影响。对于后者, 在平衡市场的惩罚机制下, 无论在日前市场多报还是少报, 相较于按实际出力竞价, 都会导致收益的减少。因此, 该因素的存在将会使间歇性电源在谈判中处于不利地位, 有必要对其进行量化分析。

文献[19]基于连续分级概率评分 CRPS (Continuous Ranked Probability Score) 量化 DERs 出力预测表现, 可有效评价 DERs 的预测水平并激励其组成联盟。定义如下:

$$S(F_i, e_u) = \frac{1}{1 - \text{CRPS}(F_i, e_u)} \quad (14)$$

$$\text{CRPS}(F_i, e_u) = - \int_{-1}^1 (F_i(x) - u(x, e_u))^2 dx \quad (15)$$

$$u(x, e_u) = \begin{cases} 1 & x \geq e_u \\ 0 & x < e_u \end{cases} \quad (16)$$

$$e_{it} = \frac{P_{it} - \tilde{P}_{it}}{\tilde{P}_{it}} \quad (17)$$

其中, $S(\cdot) \in (0, 1]$ 为预测精度评分, “完美预测者”的值为 1; F_i 为 DER 上报的预测误差累积分布, 如图 1 所示; e_{it} 为实际误差; P_{it} 、 $\tilde{P}_{it}$ 分别为 DER 的实际出力和平均预测出力。

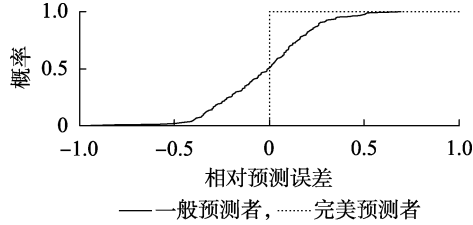


图 1 预测误差的累积分布函数

Fig.1 Cumulative distribution function of prediction errors

然而, 该评分机制未考虑正、负预测误差对收益的不同影响。事实上, 对正、负不平衡的惩罚力度往往不一致, 为更加准确地评价间歇性电源的预测表现, 应当加以区分。本文定义平衡市场的正、负不平衡惩罚力度系数:

$$\begin{cases} \rho^+ = c(1-r^+) \\ \rho^- = c(r^- - 1) \end{cases} \quad (18)$$

其中, ρ^+ 、 ρ^- 非负, 其值越大, 惩罚力度越大; c 为尺度变换因子, 本文取 10。

因此, 将式(14)修正为:

$$S_{it}^{PA} = \frac{1}{1 - g(e_{it}) \text{CRPS}(F_i, e_{it})} \quad (19)$$

$$g(e_{it}) = \begin{cases} \rho^+ & e_{it} \geq 0 \\ \rho^- & e_{it} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

间歇性电源的预测精度越低, 平衡市场的惩罚力度越大, 其预测精度评分 S_{it}^{PA} 越低。在一个结算周期内的预测精度评分取各个时段的平均值:

$$S_i^{PA} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T S_{it}^{PA} \quad (21)$$

2.5.3 谈判力计算

综合以上 2 个因素, 可以得到 DER 的总评分:

$$S_i = \lambda_1 S_i^{MC} + \lambda_2 S_i^{PA} \quad (22)$$

其中, λ_1 、 λ_2 分别为边际贡献和预测精度在谈判力中所占的权重, 满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 需在联盟形成前达成共识, 并可随联盟成员的变动而动态调整。对上式规范化处理, 即得到各 DER 的谈判力:

$$\alpha_i = \frac{S_i}{\sum_{i \in N} S_i} \quad (23)$$

综上, VPP 的收益分配模型(记为 P3)如下:

$$\begin{cases} \max_{x_i} \prod_{i \in N} (U_i(x_i) - U_i(x_{i, \min}))^{\alpha_i} \\ \text{s.t. } x \subseteq C(N, v) \end{cases} \quad (24)$$

其中, $x = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 为优化后收益分配, 保证分配结果位于核中。

该模型保证了只要核存在, 那么分配结果一定位于核中。从数学上看, 该模型的约束条件全为线性, 仅目标函数为非线性, 可用内点法快速求解。

3 算例分析

3.1 算例描述

本文算例包括 1 台 MT、1 座 PHSP、1 台风电机组(WT)和 1 台光伏机组(PV)共 4 个 DER 单元, 为简洁起见, 将其依次编为 1—4 号。MT 采用 TAU5670 型号, 具体参数见文献[7]。PHSP 上级水池等值蓄电量为 40 MW·h, 抽水和发电额定功率分别为 6 MW 和 8 MW, 假定效率均为 87%^[5], 初始时刻蓄水池容量为 0。WT、PV 实际出力见文献[7]。为便于后文分析预测精度对收益的影响, 假定 WT、PV 的预测误差服从均值为 0 的正态分布。通常而言, WT 和 PV 的日前预测误差在 10%~30% 之间^[10], 本文假定其方差分别为 0.25、0.15。对 WT、PV 的预测出力各随机生成 100 组场景, 削减后分别得到 5 组场景。日前市场电价根据 Iberian Peninsula 市场 2016 年 10 月份实际数据^[20]进行削减, 鉴于电价的预测精度相对较高, 因此产生 4 组场景。总场景数为 $5 \times 5 \times 4 = 100$ 。正、负不平衡价格系数分别取 0.8、1.3^[5]。置信水平 α 为 0.95, MT、PHSP、WT、PV 风险系数分别为 1、0.8、0.6、0.4。

竞标模型在 MATLAB 上利用 Gurobi 进行求解, 收益分配问题用内点法求解。所有联盟的 P1 模型运算时间在 10 s 以内, P2、P3 的运算时间均在 1 s 以内。

3.2 合作收益分配

本文有 4 个博弈者, 共有 $2^4 - 1 = 15$ 个非空子联盟, 每个子联盟的收益见表 1。

表 1 不同联盟模式下的收益

Table 1 Profits under different coalition modes

联盟 S	收益/€	联盟 S	收益/€
{1}	804	{2, 4}	3 274
{2}	414	{3, 4}	4 903
{3}	2 004	{1, 2, 3}	3 395
{4}	2 859	{1, 2, 4}	4 205
{1, 2}	1 219	{1, 3, 4}	5 915
{1, 3}	2 924	{2, 3, 4}	5 372
{1, 4}	3 777	{1, 2, 3, 4}	6 422
{2, 3}	2 418	—	—

各 DER 的效用函数见图 2。利用本文方法得到收益分配见表 2。由表 2 可知, 未合作时 DERs 的总

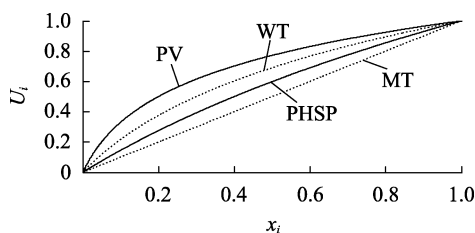


图 2 效用函数曲线

Fig.2 Utility function curves

表 2 收益分配结果

Table 2 Results of profit allocation

DER	谈判力	非合作收益/€	合作收益/€	提高比例/%
{1}	0.246 6	804	899.0	11.82
{2}	0.228 6	414	471.9	13.99
{3}	0.240 6	2 004	2 099.4	4.87
{4}	0.284 2	2 859	2 951.7	3.24
总和	1.000 0	6 081	6 422.0	5.61

收益为 € 6 081, 合作组成 VPP 之后的总收益为 € 6 422, 合作剩余为 € 341, 提高比例为 5.61%。分配后各 DER 的收益均有不同程度的提高, 满足个体理性。

表 3 给出了讨价还价模型、Shapley 值法和核仁法的分配结果以及各 DER 收益相对于非合作收益的提高比例。Shapley 值法未考虑参与者的预测精度评分, 使 PHSP 收益仅提高 € 33.7 (8.14%)。VPP 中 PV 边际贡献最大 (为 47.13%), 但核仁法对 PV 收益的提高比例仅约为其他 2 种方法的 1/2。对比而言, 本文方法在综合考虑 DERs 的边际贡献、预测精度及风险态度和市场对不平衡量的惩罚力度后, 使得分配结果更合理、公平。

表 3 不同收益分配方法比较

Table 3 Comparison among different profit allocation methods

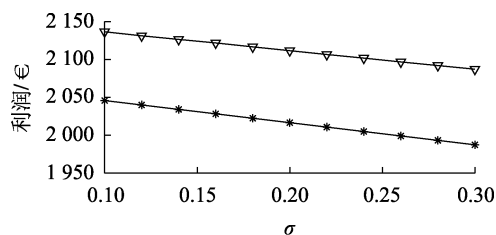
DER	Shapley 值法		核仁法		讨价还价模型	
	分配结果/€	提高比例/%	分配结果/€	提高比例/%	分配结果/€	提高比例/%
{1}	927.3	15.34	918.0	14.18	899.0	11.82
{2}	447.7	8.14	4 60.5	11.23	471.9	13.99
{3}	2 103.4	4.96	2 130.0	6.29	2 099.4	4.87
{4}	2 943.6	2.96	2 905.5	1.62	2 951.7	3.24

3.3 影响因素分析

DERs 在电力市场中的获利受外界因素 (如电价、不平衡惩罚力度) 和内部因素 (如机组技术特性、竞标策略) 的共同影响。本节从 DER 个体角度出发, 分析其预测精度和风险厌恶程度对获利的影响。

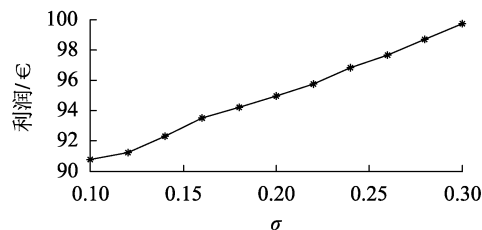
a. 预测精度影响分析。

以 WT 为例, 分析其预测精度对收益的影响。假定 WT 预测水平 σ 为 0.1~0.3, 其值越大, 预测精度越低。保持其他 DERs 的数据不变, WT 在非合作和合作下的收益如图 3 所示。



—△— 合作, —★— 非合作

(a) WT 收益



(b) WT 合作剩余

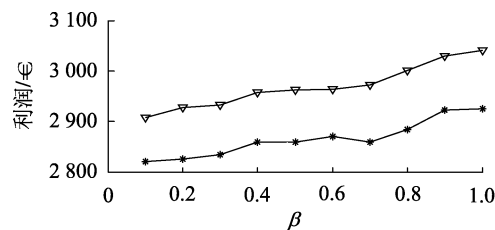
图 3 预测精度对 WT 收益影响

Fig.3 Effect of prediction accuracy on WT's profit

从图 3(a) 可以看出, 无论是在合作还是非合作模式下, 随着预测精度的降低, WT 收益都会随之下降, 且非合作模式下的下降幅度更大。图 3(b) 表明, WT 合作后增加的收益即合作剩余会随预测精度的下降而增加。上述结果表明, 本文的分配方法能够激励随机性电源通过投资监测计量设备、优化预测方法等手段来提高对出力的预测精度, 且当预测精度较低时, 随机性电源参与 VPP 的动力越强, 合作空间越大。

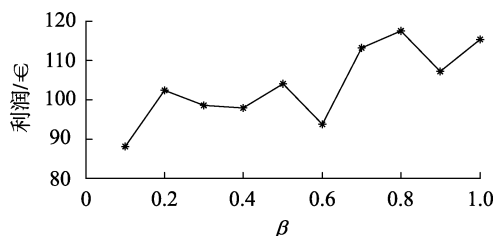
b. 风险系数影响分析。

以 PV 为例, 分析其风险系数对收益的影响。假定光伏风险系数为 0.1~1, 其值越大, 风险厌恶水平越低。保持其他 DERs 的数据不变, PV 在非合作和合作下的收益如图 4 所示。



—△— 合作, —★— 非合作

(a) PV 收益



(b) PV 合作剩余

图 4 风险系数对光伏收益影响

Fig.4 Effect of risk coefficient on PV's profit

从图4(a)可以看出,总体而言,光伏收益随 β 的增大而增大,符合投资组合理论中的“高风险、高收益”的特点。值得指出的是,DERs或VPP的实际收益与不确定性的具体实现方式有关,风险态度趋于偏好型可以增加期望收益,但并不能保证一定增加实际收益。图4(b)表明,PV合作剩余与风险系数并无必然的单调关系,即DERs无法保证通过改变 β 实现在VPP中获取更多的合作剩余。上述结果表明,本文方法可以保证DERs在权衡收益与风险的关系后,能够真实地上报各自的风险态度。

4 结论

为了维持VPP内DERs的合作关系,在确保整体利益最优的前提下,有必要协调与平衡每个DER的个体利益。本文基于讨价还价博弈理论,综合考虑风险态度、实际贡献、预测精度、市场机制对不平衡的惩罚力度等因素,建立了DERs的收益分配模型,为深入理解DERs合作剩余分配的影响因素和作用过程进行了有益尝试。通过算例分析,得出以下结论:

a. 该方法可以得到较为公平、合理的收益分配结果,且保证该结果位于核中;

b. 该分配机制可以激励各DER尤其是间歇性电源提高其对不确定性的预测精度,以获取更多的收益与合作剩余;

c. 在该分配模型中,DERs无法在不提高自身贡献的前提下,仅通过谎报风险态度的行为增加收益与合作剩余。

本文所提的收益分配模型具有良好的通用性与扩展性,可为DERs的合作谈判提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 吴薇,刘俊勇,刘友波,等. 智能营销研究概述(四)——DER带来的变革[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):131-135.
WU Wei, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Research summary of intelligent sales and marketing of smart grid(4): innovation brought by DER[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 131-135.
- [2] 臧海祥,余爽,卫志农,等. 计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):96-102.
ZANG Haixiang, YU Shuang, WEI Zhinong, et al. Safety-constrained two-layer optimal dispatch of virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 96-102.
- [3] 任洪波,杨健,班银银,等. 分布式能源互联网的探索与展望[J]. 中国能源,2015,37(3):38-41.
REN Hongbo, YANG Jian, BAN Yinyin, et al. Exploration and prospect of distributed energy internet[J]. Energy of China, 2015, 37(3): 38-41.
- [4] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [5] 余爽,卫志农,孙国强,等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):43-49.
YU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43-49.
- [6] 孙国强,袁智,许晓慧,等. 碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):97-103.
SUN Guoqiang, YUAN Zhi, XU Xiaohui, et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 97-103.
- [7] 周亦洲,孙国强,黄文进,等. 计及电动汽车和需求响应的虚拟电厂多类电力市场竞标模型[J]. 电网技术,2017,41(6):1759-1766.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1766.
- [8] 董文略,王群,杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):75-81.
DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81.
- [9] DABBAGH S R, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Risk-based profit allocation to DERs integrated with a virtual power plant using cooperative game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 368-378.
- [10] CHENG Yan, FAN Songli, NI Jianmo, et al. An innovative profit allocation to distributed energy resources integrated into virtual power plant[C]//International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). Beijing, China: IET, 2015: 1-6.
- [11] 胡殿刚,刘毅然,王坤宇,等. 多商业型虚拟发电厂联合竞标及分配策略[J]. 电网技术,2016,40(5):1550-1557.
HU Diangang, LIU Yiran, WANG Kunyu, et al. Joint bidding and distribution strategies for multiple commercial virtual power plant[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1550-1557.
- [12] CONEJO A J, CARRION M, MORALES J M. Decision making under uncertainty in electricity markets[M]. New York, USA: Springer, 2010: 63-92.
- [13] 汪贤裕,肖玉明. 博弈论及其应用[M]. 2版. 北京:科学出版社,2016:179-200.
- [14] 卢强,陈来军,梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [15] 刘蕴,冯穗力. 基于广义纳什讨价还价解的资源分配方法[J]. 电路与系统学报,2012,17(6):21-26.
LIU Yun, FENG Suili. Resource allocation algorithm based on generalized Nash bargaining solution[J]. Journal of Circuits and Systems, 2012, 17(6): 21-26.
- [16] 王一,龚媛,王程,等. 基于讨价还价博弈的中长期购电计划制定方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(2):136-142.
WANG Yi, GONG Yuan, WANG Cheng, et al. Medium and long-term power purchase plan based on bargaining game[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(2): 136-142.

- [17] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-51.
- [18] 李春杰, 程艳从, 赵会茹. 基于效用函数的电力普遍服务综合评价[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 50-54.
LI Chunjie, CHENG Yancong, ZHAO Huiru. Comprehensive utility evaluation of electric power universal service based on utility function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 50-54.
- [19] VALENTIN R, GEORGIOS C, RAMACHANDRA K, et al. Rewarding cooperative virtual power plant formation using scoring rules[J]. Energy, 2016, 117: 19-28.
- [20] OMIE. Our electricity markets[EB/OL]. [2017-03-10]. <http://www.omel.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>.

作者简介:



秦 婷

秦 婷(1993—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟电厂和电力市场(E-mail: qinting888@tju.edu.cn);

刘怀东(1963—), 男, 山东东明人, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统、电力市场等(E-mail: hdlu@tju.edu.cn);

王锦桥(1992—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统(E-mail: jin-qiaowang@tju.edu.cn)。

Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory

QIN Ting¹, LIU Huaidong^{1,2}, WANG Jinqiao¹, FANG Wei¹, FENG Zhiqiang¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The cooperative DERs(Distributed Energy Resources) in a VPP(Virtual Power Plant) usually belong to different interest entities, so a fair and reasonable profit allocation of VPP is crucial. A profit allocation model of DERs' joint participation in the short-term energy market is built based on bargaining game theory, which uses the utility function to reflect the degree of risk aversion, and comprehensively considers the quantified bargaining power levels of factors such as the marginal contribution, the forecasting accuracy of intermittent power generation, the punishment strength of balancing market, etc. The feasibility and rationality of the proposed model are verified by the actual case analysis of VPP. The proposed model can effectively evaluate the characteristics of each DER, guarantee relative allocation fairness and coalition stability, form a positive incentive and guide for DERs' behaviors, and improve economic interests.

Key words: VPP; distributed energy resources; game theory; profit allocation; bargaining power

(上接第133页 continued from page 133)

Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy

SU Hao^{1,2}, ZHANG Jiancheng¹, FENG Donghan², WANG Ning¹, SONG Zhaoxin¹, ZHAO Jiqing¹

(1. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problems of power shortage compensation of the islanded DC microgrid and the power allocation among multiple types of energy storage media and multiple energy storage units, a modular integrated architecture of "ESU(Energy Storage Unit)-HESM(Hybrid Energy Storage Module)-HESS(Hybrid Energy Storage System)" is designed, and the corresponding dual-level energy management strategy combined with global optimization and local allocation is proposed. The upper-level optimization calculates the power shortage of the microgrid quickly based on the over-limit of DC bus voltage, and then considering the maximum supportable power and residual capacity of each HESM and making use of the principle of "able one should do more work", the power allocation scheme among HESMs with the best operation economy is found. The lower-level controllers decide the operation priorities of ESUs and allocate the upper level results among ESUs based on the partition combination of SOC(State Of Charge) of each ESU. The example results show that the proposed strategy can maintain the stable operation of the DC microgrid while ensuring the good operation economy of the HESS.

Key words: hybrid energy storage system; multiple energy storage units in parallel; modularization; energy management