第3卷第4期 2020年7月 全球能源互联网 Journal of Global Energy Interconnection Vol. 3 No. 4 Jul. 2020

文章编号: 2096-5125 (2020) 04-0374-11 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2020.04.006 中图分类号: TM73; TM912

文献标志码: A

# 考虑电池寿命的虚拟电厂调频竞标模型及 合作利润分配策略

陈雯<sup>1</sup>, 孙荣峰<sup>2</sup>, 邱靖<sup>1,2\*</sup>, 柴庆冕<sup>3</sup>

(1. 悉尼大学电气与信息工程学院, 澳大利亚 悉尼 2006;

齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院能源研究所,山东省生物质气化技术重点实验室,山东省 济南市 250014;
 新南威尔士大学电气工程与通信学院,澳大利亚 悉尼 2052)

# Profit Allocation and Frequency Regulation Bidding Strategy of Virtual Power Plant Considering Battery Cycle Life

CHEN Wen<sup>1</sup>, SUN Rongfeng<sup>2</sup>, QIU Jing<sup>1, 2\*</sup>, CHAI Qingmian<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney 2006, Australia;

2. Shandong Key Laboratory of Biomass Gasification Technology, Energy Institute of Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, Shandong Province, China;

Academy of Sciences), sman 250014, Shandong 110vince, emila,

3. School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

Abstract: Distributed energy resources can be aggregated as virtual power plant (VPP) to provide frequency regulation services for managing the increasing system variability. To actively engage VPP in the ancillary market, it is important to enhance the value of VPPs for their owners. This study proposes an optimal bidding strategy in frequency control ancillary services (FCAS) market with the aim to maximize the expected profit for VPP and then distribute the relevant profit to customers. The VPP comprises residential photovoltaic (PV) systems and battery energy storage systems (BESS). Subsequently, a profit maximized cooperative scheme of VPP and wind farms is incorporated into the optimal joint bidding model. Moreover, the cycle life of battery is realistically considered in both the bidding models. In addition, a payoff allocation approach based on Nash-Harsanyi Bargaining Solution is innovatively developed to distribute the augmented profit of cooperation, which reflects the true value of VPP. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed model and the payoff allocation approach.

**Keywords:** virtual power plant (VPP); frequency control ancillary services (FCAS); battery cycle life; Nash–Harsanyi bargaining solution (NHBS) 摘 要:聚合的分布式能源可作为虚拟电厂(virtual power plant,VPP)在电力市场中提供辅助调频服务,来应对低碳 经济下大规模可再生能源并网给电力系统稳定性带来的挑 战。为了引导VPP参与调频辅助服务市场,对VPP所有者的 经济激励尤为重要。研究了澳大利亚国家电力市场中调频辅 助服务市场机制,针对配网侧聚合的住宅屋顶光伏和电池 储能系统的VPP,以利润最大化为目标,提出了嵌入电池循 环寿命模型的调频市场优化竞标策略和与风电合作的联合 优化竞标策略。同时,根据讨价还价博弈理论,基于Nash-Harsanyi 讨价还价解提出了一种反映VPP真实价值的合作剩 余分配策略。算例结果验证了所提模型和方法的有效性,研 究成果为激发VPP潜在价值提供了一条途径。

关键词:虚拟电厂;调频辅助服务市场;电池循环寿命模型;Nash-Harsanyi讨价还价解

# 0 引言

在资源和环境约束以及低碳经济的推动下,分布 式能源以清洁、高效和创新的方式满足能源服务需 求,在全球经济和能源系统的结构性转型过程中起 到了重要作用<sup>[1]</sup>。然而,高比例分布式能源也给电网 带来间歇性和随机波动性的冲击,使系统需要更多 的辅助调频服务(frequency control ancillary services, FCAS)。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)具有

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019JZZY010901)。

Key Research and Development Program of Shandong Province (2019JZZY010901).

多样化电源集成的互补性和丰富的调控手段,将分布 式能源聚合为一个整体参与电网的运行和调度,发挥 分布式能源的优势参与调频辅助服务市场<sup>[2-3]</sup>。在澳大 利亚,VPP主要包括屋顶光伏(photovoltaic,PV)系 统,电池储能系统(battery storage systems, BESS) 以及可控负荷设备等。最大化VPP所有者的收益可以 激励其参与调频辅助服务市场,有利于提高整个系统 吸纳可再生能源的效率以及电网的稳定性和安全性。 鉴于VPP中电池的投资成本仍然较高,为了在波动的 市场价格以及电池老化成本的影响下获得可观的运营 利润,采取先进的调频竞标策略非常必要。

大量文献从集中式优化角度研究了虚拟电厂的调度策略。文献[4-9]分析了大规模储能电站<sup>[4-6]</sup>、聚合新能源电厂<sup>[7]</sup>、虚拟电厂<sup>[8]</sup>在现货及辅助服务市场的优化竞标模型,同时考虑了市场的不确定性和风险<sup>[9]</sup>。以上文献中虚拟电厂指的是聚合的新能源电厂、可中断负荷和储能设备中的某几类,与本文所研究的VPP 组成不同。本文中居民侧光伏电池系统与之不同,光 伏发电的间歇性以及居民负荷的波动性、随机性使 VPP具有更为复杂和不确定的行为。现有文献尚未深 入研究这类VPP在调频市场中的竞标策略。

在调频市场竞标策略相关研究中,另一个被忽视的重要问题是电池循环寿命模型。尽管大量研究电池 行为的文献通过不同的拟合技术获得电池循环寿命和 放电深度(depth of discharge,DOD)的关系式<sup>[10-12]</sup>, 但电池循环寿命模型并未应用在优化竞标策略目标 中。而且,非线性电池循环寿命模型很难通过商业软 件求解。因此,本文采取文献[4]和[11]的简化计算方 式,将时间价值引入资本回收系数(capital recovery factor, CRF) 来计算电池寿命损耗成本。

电池储能系统因其响应速度快、调节灵活,在电 力辅助调频中扮演重要角色。储能可以有效平缓风电 波动,协助风电参与调频服务<sup>[13-14]</sup>。因此VPP与风电可 以合作利用其互补优势获得更大的经济与环境效益<sup>[15]</sup>。 然而,此类VPP与风电合作的联合调频竞标模型以及 所得的合作剩余分配策略却鲜有研究。

文献[16-18]利用合作博弈论中核仁法(nucleolus concept)和沙普利值法(Shapley solution)分配合作收益。然而,沙普利值法关注参与者的边际贡献,核仁法关注分配方案的不满意程度,两种方法都没有体现出参与者的特征和偏好,分配结果也未能体现参与者的不同行为与合作贡献。

John Nash在1950年提出讨价还价理论,纳什讨价 还价解研究了人们达成合作时如何分配合作得到的收 益,即收益分配问题<sup>[19-20]</sup>。1967年John Harsanyi基于 不对称信息研究了参与者谈判力<sup>[21]</sup>,此项研究是对讨 价还价理论的一项重要贡献。本文基于Nash-Harsanyi 讨价还价解(Nash-Harsanyi bargaining solution, NHBS),提出强调VPP和风电不同谈判力的合作剩余 分配策略。

### 1 研究框架

为了挖掘VPP的市场价值,使其利润最大化的经 济激励过程分为2个步骤:创造最大价值和利润合理 分配,如图1所示。在创造价值环节,由于电池频繁 充放电加速电池老化造成的寿命衰减成本不可忽视, 本文提出将电池循环寿命模型嵌入VPP单独调频竞标





Fig. 1 VPP components and steps to explore its value in FCAS market

模型和与风电合作联合竞标模型的目标函数中,在考虑电池损耗成本的前提下获得合理收益。在分配合作剩余价值环节,本文提出通过求解讨价还价博弈模型的NHBS和量化谈判力来反映VPP对合作的真实贡献。该博弈模型中的合作剩余、效用函数、谈判不一致点以及谈判力均来自创造价值环节相关结果。

虽然本文借鉴澳大利亚调频辅助服务市场机制, 但评估VPP价值及利润分配策略也适用于其他电力市 场框架。

### 2 调频市场框架及VPP特征模型

### 2.1 澳大利亚电力市场辅助服务市场机制

本文借鉴澳大利亚国家电力市场(Australia national electricity market, NEM)频率控制辅助服务 (FCAS)机制。澳大利亚能源市场运营商(Australian energy market operator, AEMO)利用FCAS使系统频率维持在接近50 Hz的标准上,调节方式分为调节调频(regulation)和应急调频(contingency)。本文研究调节调频,即通过响应负载或发电的微小偏差来维持发电和需求平衡,分为向上调节调频(raise reg)和向下调节调频(lower reg)。

澳大利亚辅助调频服务市场通过国家电力市场能 源调度引擎(NEM dispatch engine, NEMDE)集中 调度,调度时段为5 min,每0.5 h结算一次。由于调 频调度指令高度随机,参与者无法精准预测,本文假 设参与者收到的调频调度指令基于标准化调频信号计 算。调频信号集合中信号为1时表示向上调频,信号 为-1时表示向下调频,信号为0时表示未参与调频。 调频调度指令与调频竞标量相关,调频市场参与者的 收益取决于被调用的电量和出清价格。由于电力市 场将在2021年采用5 min结算规则,所以本文假设调 频时段与结算时段均为5 min。本文引入调频惩罚机 制,假设对市场参与者调频调度指令与实际调频量 之间的偏差按调频出清价格一定比例的惩罚系数进 行惩罚<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 电池循环寿命模型

1) 电池荷电状态与放电深度。

$$S_{\text{OC}t} = \frac{E_t^{\text{B}}}{E^{\text{m}}} \cdot 100\% \tag{1}$$

$$D_{\text{OD}t} = 1 - S_{\text{OC}t} \tag{2}$$

式中:电池荷电状态Soci是交易时段t结束时,电池储

存的能量*E*<sup>B</sup>与电池额定容量*E*<sup>m</sup>的比值;放电深度*D*<sub>obt</sub> 表示电池放电量与电池额定容量的比值,是电池老化 的重要衡量指标。

2) 电池循环寿命模型<sup>[4]</sup>。

电池循环寿命*T*<sub>c</sub>取决于其充放电循环行为。频繁 深度的充放电会加速电池老化,缩短电池循环寿命。 电池循环寿命可由式(3)得到。

$$T_{\rm C} = \frac{N_{DOD}^{\rm end}}{365 \times N_{DOD}^{\rm day}} \tag{3}$$

式中: $N_{DOD}^{end}$ 表示在放电深度 $D_{OD}$ 下电池达到寿命终点之前最大的循环次数; $N_{DOD}^{day}$ 表示电池在放电深度 $D_{OD}$ 每天的循环次数;每年电池使用天数设定为365天。普克特生命周期能量吞吐量模型(Peukert lifetime energy throughput model,PLET)基于普克特定律模拟不同工作强度下的电池循环寿命损失<sup>[22]</sup>。根据该模型,电池的PLET值与放电深度以及该放电深度下的循环次数有如下关系:

$$N_{100}^{\rm eq} = N_{DOD} \times D_{\rm OD}^{k_{\rm p}} \tag{4}$$

式中: *k*<sub>p</sub>对于同一种电池而言是常数,称为普克特生命周期常数,取值范围通常为0.8~2.1,不同电池的*k*<sub>p</sub>值一般通过拟合得到<sup>[4]</sup>; *N*<sup>eq</sup>表示电池以100%放电深度充放电时的循环次数。由于在每个时段一般不能完成一个完整的放电半循环,所以假设

$$\Delta D_{\text{OD}j} = D_{\text{OD}j,\text{end}} - D_{\text{OD}j,\text{start}}$$
(5)

$$N_{100}^{\mathrm{eq},j} \approx \left(\Delta D_{\mathrm{OD}\,i}\right)^{k_{\mathrm{p}}} \tag{6}$$

式中: ΔD<sub>op</sub>是连续放电时段电池放电深度的增量; *j* 表示放电时段; D<sub>oDj,start</sub>和D<sub>oDj,end</sub>分别表示第*j*个放电 时段开始和结束时的放电深度; N<sup>eq,j</sup><sub>100</sub>是在ΔD<sub>oDj</sub>等效 100%放电深度下的循环次数。根据PLET模型,累计 等效100%放电深度循环次数代表在不同放电深度下 电池寿命的损耗。电池每日等效100%放电深度循环 次数可由式 (7)得到。*T*代表—天内288个时段。

$$N_{100}^{\text{eq,day}} = \sum_{j \in T} \left( \Delta D_{\text{OD}j} \right)^{k_p} \tag{7}$$

普克特生命周期能量吞吐量N<sup>end</sup>表示100%放电深 度下电池达到寿命终点之前的最大循环次数。至此, 普克特电池循环寿命T<sub>Cvcle</sub>可由式(8)得到。

$$T_{\rm Cycle} = \frac{N_{\rm 100}^{\rm end}}{365 \times N_{\rm 100}^{\rm eq,day}}$$
(8)

3) 电池每日循环寿命损耗成本。

因为电池运行年限的限制,每日损耗成本不能直 接将初始投资成本平均到每日,需要考虑时间价值, 采用资本回报系数(capital recovery factor, CRF)进行修正<sup>[23]</sup>。电池的运行年限由循环寿命决定,循环寿命的减少导致每日损耗成本的增加。

$$C^{B,A} = C^{B,cap} \times CRF = C^{B,cap} \times \frac{r(1+r)^{T_{cycb}}}{(1+r)^{T_{cycb}} - 1}$$
(9)

$$C^{\rm B,D} = \frac{1}{365} \times C^{\rm B,A}$$
(10)

式中: *C*<sup>B,A</sup>为电池年损耗成本; *C*<sup>B,cap</sup>为电池单位成本 现值; *r*为贴现率; *C*<sup>B,D</sup>为电池每日循环寿命损耗成本。

### 2.3 光伏板组件出力模型

该VPP模型中的发电模块为屋顶光伏发电组件 (rooftop PV),光伏板*t*时刻的实际出力*P*<sup>PV</sup>与太阳辐射 强度及温度相关<sup>[24]</sup>。

$$P_t^{\rm PV} = S^{\rm PV} \cdot P^{\rm stc} \cdot \frac{I_t^{\rm r}}{I^{\rm stc}} \cdot \left[1 + \alpha_T \left(T_t - T_{\rm stc}\right)\right]$$
(11)

式中:  $S^{PV}$ 为光伏板接受太阳光照射的面积, m<sup>2</sup>;  $P^{stc}$ 为标准条件下(对应太阳辐射强度 $I^{stc}$ =100 W/m<sup>2</sup>, 温度 $T_{stc}$ =25 °C)光伏板的出力;  $a_T$ 为光伏板的功率温度系数;  $I_i^t$ 为t时刻实际的太阳辐射强度;  $T_i$ 为t时刻光伏板的温度。

# 3 考虑电池循环寿命的VPP优化调频竞标模型

### 3.1 目标函数

VPP参与调频市场竞标模型的目标为最大化VPP 的日利润。

$$\operatorname{Max} Pr_{T}^{\operatorname{VPP}} = \sum_{SC \in \mathcal{Q}_{SC}} r_{SC} \left[ \sum_{t \in T, R \in \mathcal{Q}^{\operatorname{Re}}} \left( R_{t}^{\operatorname{VPP}, R} - C_{t}^{\operatorname{G}} - Pe_{t}^{\operatorname{VPP}, R} \right) - C^{\operatorname{B}, \operatorname{D}} \right]$$

$$(12)$$

$$R_{t}^{\text{VPP},R} = \lambda_{t}^{R} \cdot \left| P_{t}^{\text{VPP},R,\text{en}} \right| \cdot \Delta t \qquad (13)$$

$$C_t^{\rm G} = \lambda_t^{\rm ToU} \cdot P_t^{\rm buy} \cdot \Delta t \tag{14}$$

$$Pe_{t}^{\text{VPP},R} = \rho^{R} \cdot \lambda_{t}^{R} \cdot \left\| P_{t}^{\text{VPP},R,\text{en}} \right\| - S \cdot P_{t}^{\text{VPP},R,\text{b}} \right\|$$
(15)

式中: VPP竞标模型的目标函数日利润 $Pr_{r}^{VPP}$ 等于调频 市场所获收益 $R_{l}^{VPP,R}$ 与各项成本之差,成本包括用户 从电网购电的成本 $C_{l}^{G}$ ,因未完成调频目标而产生的惩 罚成本 $Pe^{VPP,R}$ 和电池循环寿命日损耗成本 $C^{B,D}$ ; $\gamma_{sc}$ 是 场景集合 $\Omega_{sc}$ 中sc场景发生的概率;R属于调频市场集 合 $\Omega^{Reg}$ ,包括r和l,分别表示向上调频市场和向下调 频市场;公式(13)表示调频市场收益等于调频市场 出清价格 $\lambda_t^R$ 乘以VPP被调用的调频电量 $P_t^{VPP,R,en}$ ;  $\Delta t$ 表示每5 min的时间间隔; 公式(14)中购电成本是VPP 用于满足用户用电需求从电网买电的成本,等于居民 分时电价(time-of-use, TOU)与买电量的乘积; 公式 (15)中调频惩罚成本等于调频调度指令投标量 $P_t^{VPP,R,b}$ 和被调用调频电量之间偏差与惩罚系数 $\rho^R$ 及调频出清 价格的乘积; 电池循环寿命日损耗成本可由式(7)~ (10)得到。

#### 3.2 约束条件

$$P_t^{\mathrm{B}} + P_t^{\mathrm{load}} - P_t^{\mathrm{PV}} = P_t^{\mathrm{buy}} - P_t^{\mathrm{VPP},R,\mathrm{en}}$$
(16)

$$P_t^{\text{VPP},R,\text{en}} = P_t^{\text{VPP},r,\text{en}} \cdot \mu_t^r - P_t^{\text{VPP},l,\text{en}} \cdot \mu_t^l \qquad (17)$$

$$P_t^{\rm B} = P_t^{\rm B,ch} \cdot u_t^{\rm ch} - P_t^{\rm B,dch} \cdot u_t^{\rm dch}$$
(18)

$$0 \leq P_t^{\text{VPP},t,\text{en}}, P_t^{\text{VPP},r,\text{en}}, P_t^{\text{buy}}, P_t^{\text{B},\text{ch}}, P_t^{\text{B},\text{dch}}, P_t^{\text{VPP},R,\text{b}} \quad (19)$$

$$-P^{\mathrm{m}} \leq P_{t}^{\mathrm{B}} \leq P^{\mathrm{m}} \tag{20}$$

$$u_t^{\rm ch} + u_t^{\rm dch} \leq 1 \tag{21}$$

$$\mu_t^r + \mu_t^l \leqslant 1 \tag{22}$$

式中:  $P_t^{B} \pi n P_t^{load} \beta n \beta_t$ 时段的电池交换功率和用户负 荷;  $P_t^{B,ch} \pi n P_t^{B,dch} \beta n \beta_t$ 电和放电功率,电池不能同 时充放电,受0-1变量 $u_t^{ch} \pi u_t^{dch} \beta n$ ;  $P^{m}$ 是电池额定功 率;  $P_t^{VPP,r,en} \pi n P_t^{VPP,l,en} \beta n \beta_t$ 局上及向下调频被调用量, 受0-1变量 $u_t^{r} \pi u_t^{l} \beta n$ 。

2) 电池相关约束。

$$S_{\text{OC}t} = S_{\text{OC},t-1} + \frac{(P_t^{\text{B,ch}} \cdot \eta \cdot u_t^{\text{ch}} - P_t^{\text{B,dch}} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot u_t^{\text{dch}}) \cdot \Delta t}{E^{\text{m}}} \quad (23)$$

$$\underline{S_{\rm oc}} \leqslant S_{\rm oc} \leqslant \overline{S_{\rm oc}} \tag{24}$$

$$S_{\rm OC0} = S_{\rm OCT} \tag{25}$$

式中: η是电池充放电效率;荷电状态S<sub>oc</sub>限制为10%到 90%;优化中初始和结束荷电状态S<sub>oc</sub>相同,均为50%。

# 4 VPP和风电联合优化调频竞标模型

### 4.1 VPP与风电参与调频市场的合作方案

由于风电出力的间歇性和不可避免的预测误差, 实际输出功率无法完全满足能量市场及调频市场的调 度指令。而VPP可以添加更多的灵活性和可控性资源 来平稳风电出力、增加调频能力,同时也可以改善 VPP的循环寿命。所以适当的合作方案可以提高VPP 与风电合作参与调频市场的经济性。结合文献[15]中

$$P_t^{\text{CO,R,S}} = S_t \cdot (P_t^{\text{VPP,R,b}} + P_t^{\text{W,R,b}})$$
(26)

$$0 \leq P_t^{W,E,b} \leq (1-k) \cdot P_t^{W,m}, \ 0 \leq P_t^{W,R,b} \leq k \cdot P_t^{W,m}$$
(27)

$$P_t^{W,R,a} = S_t \cdot P_t^{W,R,b} + \varepsilon^{R,pre}$$
(28)

$$P_{t}^{W,E,a} = P_{t}^{W,E,b} + \varepsilon^{E,pre}$$
(29)

式中:公式(26)表示合作的调频调度指令 $P_t^{\text{CO,R,S}}$ 等 于VPP和风电各自调频竞标量 $P_t^{\text{VPP,R,b}}$ 与 $P_t^{\text{W,R,b}}$ 之和与当 时调频信号 $S_t$ 的乘积; k代表风电最大可用出力 $P_t^{\text{W,m}}$ 中可用于调频的比例, $k \cdot P_t^{\text{W,m}}$ 表示风电可用于调频竞 标的出力上限,(1-k)· $P_t^{\text{W,m}}$ 表示风电可用于能量市场 竞标的出力上限,公式(27)分别表示风电调频竞标 量及风电在能量市场竞标量 $P_t^{\text{W,E,b}}$ 的出力范围;公式 (28)表示风电实际调频出力 $P_t^{\text{W,R,a}}$ 等于其竞标量与出 力偏差 $\varepsilon^{R,\text{pre}}$ 之和;公式(29)表示风电在能量市场的实 际出力 $P_t^{\text{W,E,a}}$ 等于其竞标量与出力偏差 $\varepsilon^{E,\text{pre}}$ 之和; $\varepsilon^{R,\text{pre}}$ 和  $\varepsilon^{E,\text{pre}}$ 为随机变量。

$$P_t^{W,R,en} = S_t \cdot P_t^{W,R,a} \tag{30}$$

$$P_t^{\text{VPP},R',\text{Req}} = P_t^{\text{CO},R,S} - P_t^{\text{W},R,\text{en}}$$
(31)

$$P_t^{\text{CO},R,\text{en}} = P_t^{\text{W},R,\text{en}} + P_t^{\text{VPP},R',\text{en}}$$
(32)

$$P_{t}^{\text{CO},R,\text{de}} = P_{t}^{\text{VPP},R',\text{Req}} - P_{t}^{\text{VPP},R',\text{en}}$$
(33)

式中:公式(30)表示风电实际调频量 $P_t^{W,R,en}$ 等于其 竞标量与当时调频信号 $S_t$ 的乘积;公式(31)中风电实 际调频量未满足合作整体调度指令的部分为VPP的调 频要求 $P_t^{VPP,R',Req}$ ;公式(32)表示合作整体的实际调频 量 $P_t^{CO,R,en}$ 等于VPP实际调频量 $P_t^{VPP,R',en}$ 与风电实际调频 量之和;公式(33)中 $P_t^{CO,R,de}$ 为合作整体的调频出力 偏差,等于合作调频调度指令与合作整体实际调频量 之差,用于计算调频出力偏差惩罚,因为风电首先响 应调频调度指令,未满足的部分由VPP响应,所以 也就等于VPP调频要求 $P_t^{VPP,R',Req}$ 与实际调频量 $P_t^{VPP,R',en}$ 之差。

# 4.2 VPP与风电合作参与调频市场的联合竞标优 化模型

#### 1) 目标函数。

联合竞标模型以VPP和风电合作整体日利润最大 为目标。

$$\operatorname{Max} Pr_{T}^{CO} = \sum_{SC \in \mathcal{Q}_{w}} r_{SC} \left[ \sum_{t \in T, R \in \mathcal{Q}^{beg}} \left( \begin{array}{c} R_{t}^{W,E} + R_{t}^{CO,R} - Pe_{t}^{W,E} - \\ Pe_{t}^{CO,R} - C_{t}^{G} \end{array} \right) - C^{B,D} \right] (34)$$

$$R_t^{W,E} = \lambda_t^E \cdot P_t^{W,E,a} \cdot \Delta t \tag{35}$$

$$R_{t}^{\text{CO},R} = \lambda_{t}^{R} \cdot \left| P_{t}^{\text{CO},R,\text{en}} \right| \cdot \Delta t$$
(36)

$$Pe_{t}^{W,E} = \rho^{E} \cdot \lambda_{t}^{E} \cdot \left| P_{t}^{W,E,en} - P_{t}^{W,E,b} \right| \cdot \Delta t \qquad (37)$$

$$Pe_{t}^{\text{CO},R} = \rho^{R} \cdot \lambda_{t}^{R} \cdot \left| P_{t}^{\text{CO},R,\text{de}} \right| \cdot \Delta t$$
(38)

式中:公式(34)表示VPP和风电合作整体日利润  $Pr_{T}^{CO}$ 等于风电在能量市场的收益 $R_{t}^{W,E}$ 加上合作整体在 调频市场的收益 $R_{t}^{CO,R}$ ,减去风电在能量市场的出力偏 差惩罚 $Pe_{t}^{W,E}$ 、合作整体在调频市场的出力偏差惩罚  $Pe_{t}^{CO,R}$ 、电网购电成本 $C_{t}^{G}$ 以及VPP电池循环寿命的损耗 成本 $C^{B,D}$ ;公式(35)表示风电在能量市场的收益等 于风电在能量市场的出力与能量市场出清价格的乘积; 公式(36)表示合作整体在调频市场的收益等于合作整 体的实际调频量与调频市场出清价格 $\lambda_{t}^{R}$ 的乘积;公式 (37)表示风电在能量市场的出力偏差惩罚等于风电在 能量市场出力偏差与能量市场出力偏差惩罚系数 $\rho^{E}$ 和 能量市场出力偏差惩罚等于合作整体在调频市场出 力偏差与调频市场出力偏差惩罚系数 $\rho^{R}$ 和调频市场出 清价格的乘积。

2) DC潮流约束。

本文考虑潮流约束以功率传输分布因子(PTDF) 为基础,通过各节点的注入转移分布因子(ISF) $\Psi_{gd}^{\ell}$ 计算PTDF,线路 $\ell$ 的潮流可由式(39)得到:

$$P_{\ell t} = \sum_{g \in \Omega_o} \sum_{d \in \Omega_o} \Psi_{gd}^{\ell} \cdot P_{Inj} (P_t^g - P_t^d)$$
(39)

式中:  $P_{Inf}(P_t^g - P_t^d)$ 表示节点功率流入流出向量;  $\Omega_G$ 和  $\Omega_D$ 表示发电和负荷集合,包括风电和VPP。

3) 功率平衡及其他约束。

$$P_{t}^{B} + P_{t}^{load} - P_{t}^{PV} - P_{t}^{W,R,a} - P_{t}^{W,E,a} = P_{t}^{louy} - P_{t}^{W,E,en} - P_{t}^{CO,R,en}$$
(40)

$$P_t^{\text{CO}, R, \text{en}} = P_t^{\text{CO}, r, \text{en}} \cdot \mu_t^r - P_t^{\text{CO}, l, \text{en}} \cdot \mu_t^l$$
(41)

$$0 \leq P_t^{\text{CO},r,\text{en}}, P_t^{\text{CO},l,\text{en}}$$
(42)

式中:  $P_t^{CO,r,en} \pi P_t^{CO,l,en}$ 分别是合作整体调频量 $P_t^{CO,R,en}$ 的向上调频量及向下调频量;式(40)表示功率平衡约束;式(16)~(25)的电池能量和 $S_{OC}$ 约束同样适用。

TI

# 5 基于Nash-Harsanyi讨价还价解的合作剩 余分配策略

#### 5.1 Nash - Harsanyi讨价还价博弈模型

对于讨价还价博弈( $\Gamma$ ,d),假设有i个参与者, i=(1,2),每个参与者对于分配结果的不同偏好通过 期望效用函数U,表达。分配配置集Γ是非空有界闭 合集,通过双方谈判,从谈判不一致点d<sub>i</sub>出发,从 分配配置集Γ中找出一个合理的配置作为谈判的结 果,这样得到的配置 f(Γ,d) 就是讨价还价博弈的解 函数。产生纳什讨价还价解的公理称为"纳什公 理"。考虑Harsanyi提出信息不对称的条件,不同参 与者的谈判力(braining power, BP)为a<sub>i</sub>。所以不 对称Nash-Harsanyi讨价还价解(NHBS)是指博弈的 参与者根据不同的谈判力,经过多次讨价还价后获 得的均衡解,此解需要满足4个纳什公理,分别为个 体理性 (individual rationality), 帕累托最优 (Pareto optimality),线性变换无关 (invariance),无关选择 的独立性(independence of irrelevant alternatives)。纳 什在提出这些公理后证明了使得纳什积最大化的解就 是纳什讨价还价解,是满足4个纳什公理的唯一解<sup>[25]</sup>。 可表述为:

 $f(\Gamma, d) = \arg \max \left[ U_1(\Gamma_1) - U_1(d_1) \right]^{a_1} \left[ U_2(\Gamma_2) - U_2(d_2) \right]^{a_2} (43)$ 

式中:  $d_i \leq \Gamma_i \in \Gamma, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

在两人讨价还价博弈模型中,合作给双方带来的 好处超过他们分别单独工作时的效用,形成对参与者 的激励。同时,由于参与者的个人理性,他们又都希 望从合作产生的额外好处中多分得一些,因此产生了 谈判和讨价还价,形成了两人讨价还价博弈的基本点。

由第2章可知,VPP和风电互补的特性使其合作 整体在调频市场中获得可观的额外收益。如何分配额 外的收益需要双方根据自身优势进行谈判,讨价还价 问题就是在寻找一个分配收益的合理方案,获得的 NHBS保证了双方愿意继续合作。

为了激励VPP参与调频市场与合作,需要突出 VPP的特征和贡献,使之获得与贡献相匹配的分配所 得。在Nash-Harsanyi讨价还价博弈模型中,可以通过 参与者的效用函数突出风险偏好,特别是通过构建谈 判力具体衡量参数来反映参与者贡献度。因此,基于 NHBS的合作剩余分配策略可以更好的反映VPP在与 风电联合调频合作中的贡献。

# 5.2 基于NHBS的VPP与风电联合参与调频市场 合作剩余分配策略

构建满足纳什公理的Nash-Harsanyi讨价还价博弈 模型并求解,过程如下。

### 1)确定VPP和风电的效用函数。

Nash-Harsanyi博弈中,效用函数表示了不同参与者的风险偏好<sup>[26]</sup>。首先,需要确定基于风险偏好系数(risk preference, RP) $\beta$ 的VPP和风电的效用函数 模型<sup>[27]</sup> $U_1(x)$ 和 $U_2(x)$ ,即式(44)。c和b为效用函数系数; $\beta$ <0.5表示参与者是风险规避型; $\beta$ >0.5表示参与者是风险规避型; $\beta$ >0.5表示参与者为风险中立型。本文中, $x_1$ 和 $x_2$ 分别代表VPP和风电分配所得利润 $x_1$ 和 $x_2$ 在总合作剩余水自式(34)的结果。式(46)表示所有合作剩余将被完全分配给VPP和风电。

$$f(x) = \begin{cases} c + b \ln\left(x + \frac{\beta^2}{1 - 2\beta}\right), & \beta < 0.5 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} 1 - c + b \ln \left( 1 - y + \frac{1 - \beta}{1 - 2(1 - \beta)} \right) \end{bmatrix}, \quad \beta > 0.5$$

$$x, \qquad \beta = 0.5$$

$$x_1 = \frac{X_1}{V_{(1+2)}}, \ x_2 = \frac{X_2}{V_{(1+2)}}$$
 (45)

$$X_1 + X_2 = V_{(1+2)} \tag{46}$$

# 2)确定VPP和风电合作中谈判不一致点。

本文假设在该博弈中,谈判不一致点为VPP和风 电单独参与调频市场所获得的利润。即如果合作分配 利润低于单独调频所获利润,合作将会终止。定义*d*<sub>1</sub> 和*d*<sub>2</sub>分别为VPP和风电单独调频时的利润*v*<sub>1</sub>和*v*<sub>2</sub>与合作 剩余*V*<sub>(1+2</sub>的比值。

$$d_1 = \frac{v_1}{V_{(1+2)}}, d_2 = \frac{v_2}{V_{(1+2)}}$$
(47)

$$x_1 \ge d_1, x_2 \ge d_2 \tag{48}$$

# 3)确定VPP和风电的谈判力。

VPP和风电在联合参与调频服务中具有不同的特征和贡献。本文使用评分机制来确定双方的谈判力。根据调频服务的贡献度,谈判力考虑边际贡献(marginal contribution factor, MC)和精确度(precision score factor, PS)2个因素,通过合作前与合作后的变化衡量参与者的贡献。

$$\alpha_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \tag{49}$$

$$W_i = \gamma_1 F_i^{\rm MC} + \gamma_2 F_i^{\rm PS}$$
(50)

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1 \tag{51}$$

$$F_{i}^{MC} = \frac{V_{i}^{R}(N - \{i\}) - v_{i}^{R}(N - \{i\})}{v_{i}^{R}(N - \{i\})} + \frac{v_{i}^{C}(N - \{i\}) - V_{i}^{C}(N - \{i\})}{v_{i}^{C}(N - \{i\})}$$
(52)

$$F_{i}^{PS} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{t \in T, R \in \Omega^{Res}} \left| \frac{P_{t}^{i, R, en} - P_{t}^{i, R, S}}{P_{t}^{i, R, S}} \right|$$
(53)

式中:参与者谈判力 $a_i$ 是个人评分 $W_i$ 在总评分中的比例;每个参与者的评分 $W_i$ 是边际贡献因素 $F_i^{MC}$ 和精确 度因素 $F_i^{PS}$ 的加权之和,权重分别为 $y_1$ 和 $y_2$ 。参与者 i的 $F_i^{MC}$ 取决于参与者 $N - \{i\}$ 增加的收益和减少的成 本; $F_i^{MC}$ 值越大,合作中的贡献越大。 $F_i^{PS}$ 借鉴美国 PJM电力市场辅助调频绩效机制中的精确度指标,反 应参与者响应调频调度指令的精确度<sup>[28]</sup>。本文 $F_i^{PS}$ 由 调频调度指令与实际调频量之间的误差绝对值的全天 平均值表示,n代表全天时间间隔数量。 $V_i^{R}(N - \{i\})$ 、  $v_i^{R}(N - \{i\})$ 代表收益, $V_i^{C}(N - \{i\})$ 、 $v_i^{C}(N - \{i\})$ 代表成 本,分表是参与者 $N - \{i\}$ 在合作和单独参与调频时的 值; $P_i^{iRen}$ 和 $P_i^{iRS}$ 分别表示参与者i单独参与调频时实际 调频量与调频调度指令。

4) 求解NHBS。

 $x_1^*, x_2^* = \arg \max [U_1(x_1) - U_1(d_1)]^{a_1} [U_2(x_2) - U_2(d_2)]^{a_2}$ (54) 式中:  $x_1^*, x_2^*$ 为NHBS值,表示在合作剩余分配中所有 参与者的最优分配比例,即可获得在合作利润分配中 VPP和风电各自获得的份额。

## 6 算例

### 6.1 算例假设与数据说明

算例根据AEMO网站<sup>[29]</sup>的辅助调频服务市场出清 价格以及调频信号公开数据和pvoutput.com网站的光 伏出力数据生成相关场景。每个屋顶光伏系统额定功率 为3 kW,电池系统额定功率为10 kW,容量为25 kWh。 用户符合早晚双峰样式,峰值功率为5 kW,平均日用 电量为18 kWh。本文假设200个屋顶光伏-电池系统行 为一致,聚合后等价于1个屋顶光伏电池系统,VPP 具体参数见表1。风电参数基于Aneroid Energy网站<sup>[30]</sup> Kiata电厂数据生成相关场景,额定功率为10 MW,风 电出力用于调频服务的比例k为30%。惩罚系数 $\rho^{E}$ 和 $\rho^{R}$ 分别设置为1和1.05。VPP和风电的风险偏好系数分别 设置为0.6和0.5。

表 1 VPP参数设置 Table 1 VPP Parameters

光伏系统 /MW	日平均用电量 /MWh	负荷峰值 /MW	$P^{\rm m}/{ m MW}$	E <sup>m</sup> /MWh
0.6	3.6	1	2	5
T/a	电池最大充放 次数	C <sup>B,cap</sup> / <b>澳元</b>	$k_{ m p}$	η
10	5000	1 000 000	2	95%

基础场景: VPP不参与调频市场,屋顶光伏-电 池系统保证满足用户高峰期用电。

场景1(a): VPP独立参与调频市场,不考虑电池 循环寿命损耗。

场景1(b): VPP独立参与调频市场,考虑电池循 环寿命损耗。

场景1(c):风电独立参与能量和调频市场。竞标 模型与联合竞标模型一致,相关VPP参数设置为零。

场景2: VPP与风电合作参与调频市场,考虑电池 循环寿命损耗。

场景3: 基于Shapley值的合作剩余分配策略。

场景4: 基于Nash-Harsanyi讨价还价解的合作剩 余分配策略。

#### 6.2 考虑电池循环寿命模型优化分析

图2表示了VPP调频优化模型嵌入电池循环寿命模型的优势。图2(a)优化结果例1和例2段中,不连续的蓝线表明考虑电池损耗使电池停止放电,避免了电池连续深度放电,减少了电池的过度损耗。图2(b)中柱状的高度和数量分别表示电池DOD损耗成本的大小和发生损耗的时段多少,蓝色柱状数量更多,但大









多数时段比橙色柱状更短,说明考虑电池损耗的竞标 模型中,电池经历了较多较浅的充放循环,降低了损 耗成本。

### 6.3 VPP和风电联合调频竞标模型分析

VPP和风电联合调频的竞标优化结果如图3所示。 同方向橙色和蓝色柱状在黄色线内表示VPP和风电合 作联合调频可以精确满足调用指令;橙色和蓝色柱状 反方向表示VPP与风电的互补作用。比如在131~196 时段,向下调频信号中,VPP吸收了风电多余的向下 调频量,进行充电而非放电。所以合作整体使调频指 令不会产生出力偏差惩罚,VPP减少了放电损耗,同 时平缓了风电出力波动,增加了不稳定风电的消纳。





表2对比了场景1和场景2的收益成本。结果表明, VPP和风电合作调频的利润高于其单独参与调频的利 润之和。合作剩余主要来自3部分,由于多吸纳风电 而增大的调频收益,由于偏差减少而减少的调频惩 罚,以及由于深度充放减少而减少的电池损耗成本。

表 2 场景1和场景2成本-收益结果对比

Table 2 Comparison of cost analysis between Case 1 and Case 2

	场景2	场景1	场景1(b)	场景1(c)	场景2-场景1
能量市场 收益/澳元	7 339.44	7 339.44	0	7 339.44	0
能量市场 惩罚/澳元	-614.14	-614.14	0	-614.14	0
调频市场 收益/澳元	1 812.88	1 726.72	696.05	1 030.67	86.15
调频市场 惩罚/澳元	0	-217.16	0	-217.16	217.16
电池损耗 成本/澳元	-143.25	-149.80	-149.80	0	6.55
总利润/澳元	8 394.93	8 085.07	546.25	7 538.82	309.86

图4的对比结果进一步表明了VPP与风电合作的优势,场景2中VPP获得的最高利润达673澳元。在电池损耗方面,由于电池参与调频而产生更多的充放电循环导致损耗成本增大。场景1(a)虽然比场景1(b)调频收益高,但是更大的电池损耗反而使利润骤减。因此,在竞标模型中考虑电池损耗成本可以避免以高电池损耗为代价高估调频收益。场景2中与风电的互补作用使电池减少充放,其电池损耗成本最低。



2 compared with Base Case.

# 6.4 基于Nash- Harsanyi 讨价还价解的合作剩 余分配策略分析

基于Shapley值和本文提出的Nash-Harsanyi讨价 还价解的利润分配策略对比如表3所示。场景3使用 Shapley值分配利润,此方法按照参与者的边际贡献率 进行分摊,强调边际贡献,并不能反映参与者的其他 特征。所以VPP分得的收益等于对合作边际贡献的一 半,未能完全反映VPP的其他优势,比如较高的响应 调频信号精确度。场景4中VPP获得的分配利润最高, 相对单独调频利润增加了37.6%。风电在合作之后所 得利润增加,但是场景4中所得利润减少。可转移利 润分配反映了VPP在合作中具有较大的贡献。

表 3 各场景下利润分配结果 Table 3 Profit allocation results in different cases

	场景1	场景3	场景4		
VPP分配利润/澳元	546.25	702.66	751.41		
风电分配利润/澳元	7 538.82	7 692.27	7 643.52		
合作利润/澳元	_	8 394.93	8 394.93		

谈判力是基于Nash-Harsanyi讨价还价解的利润分 配策略中非常重要的一个特征,这一指标反映了VPP 的合作贡献。图5中,赋予边际贡献指标和精确度指 标相同权重时,VPP和风电的谈判力分别为65.5%和 34.5%。就边际贡献指标而言,VPP得分96%代表在合 作增加的收益和减少的成本中边际贡献更大。准确度 指标方面,风电间歇性特征导致得分81%,低于VPP 得分为100%的精准度。总之,该分配策略通过VPP 较高的谈判力反映出其真实的合作贡献,从而使其在 利润分配中获得与贡献匹配的合理份额,进一步激励 VPP参与合作调频。



谈判力和风险偏好系数都能反应参与者的特征并 影响分配结果,图6展示了其对收益分配结果的敏感 度分析。图6左侧表示谈判力对分配利益的影响,可 看出随着VPP的谈判力从10%增加至90%,VPP所获分 配利润占合作剩余的比例从10%增加至90%,这表明 谈判力越高分配利润越大。图6右侧表示风险偏好系 数对分配利益的影响,可看出风险偏好系数的变化并 未影响利润分配结果的比例。所以,任何参与者并不 能通过谎报自身风险偏好系数而增加分配收益。

边际贡献指标和精确度指标权重也直接影响各参与者谈判力的大小。如图7所示,边际贡献指标权重增加,VPP谈判力从55.2%增加至81.4%,而风电的谈

判力从44.8%减少至18.6%,这反映出VPP的边际贡献 更大。还可以发现,不管两项指标的权重如何改变, VPP的谈判力始终大于风电的谈判力,说明VPP具有 更大的综合合作贡献,从而证明了该方法可以真实全 面的反应VPP的价值。



图 6 合作剩余分配比例与谈判力和风险偏好的关系





# 7 结论

住宅屋顶光伏-电池系统不仅可以满足用户自供电 的需求,聚合成为VPP还可以参与调频市场,在自身 获得收益的同时为系统稳定性提供支持。本文首先提 出了在澳大利亚国家电力市场调频辅助服务市场框架 下,VPP参与调频市场的优化竞标策略。与常规竞标 模型相比,所提模型分析了VPP的特征,并将电池循 环寿命损耗成本纳入目标函数反映真实合理的市场收 益。为了进一步探讨VPP参与调频市场的贡献,本文 提出了VPP与风电联合调频竞标策略。模拟结果显示 VPP可以平滑风电出力,减少电池循环寿命损耗,提 高自身收益。此外,本文结合Nash-Harsanyi讨价还 价解提出了合作剩余分配模型,所提模型可以最大化 VPP收益,凸显其合作贡献。

#### 383

# 参考文献

- International Energy Agency. Prospects for distributed energy systems in China (2017 edition)[R]. Paris: IEA, 2017. https:// www.iea.org/reports/prospects-for-distributed-energy-systemsin-china.
- [2] STEBER D, BAZAN P, GERMAN R. SWARM strategies for providing frequency containment reserve power with a distributed battery storage system[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). 4-8 April 2016, Leuven, Belgium. IEEE, 2016: 1-6.
- [3] 刘吉臻,李明扬,房方,等.虚拟发电厂研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5103-5111.
  LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5103-5111(in Chinese).
- [4] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2359-2367.
- [5] KAZEMI M, ZAREIPOUR H, AMJADY N, et al. Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1726-1735.
- [6] AKHAVAN-HEJAZI H, ASGHARI B, SHARMA R K. A joint bidding and operation strategy for battery storage in multitemporal energy markets[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 18-20 Feb. 2015, Washington, DC, USA. IEEE, 2015: 1-5.
- [7] QIU J, ZHAO J H, WANG D X, et al. Two-stage coordinated operational strategy for distributed energy resources considering wind power curtailment penalty cost[J]. Energies, 2017, 10(7): 965.
- [8] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: part I: problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 949-956.
- [9] DABBAGH S R, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Risk assessment of virtual power plants offering in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3572-3582.
- [10] DUFO-LÓPEZ R, BERNAL-AGUSTÍN J L, DOMÍNGUEZ-NAVARRO J A. Generation management using batteries in wind farms: Economical and technical analysis for Spain[J]. Energy Policy, 2009, 37(1): 126-139.
- [11] YOU S, RASMUSSEN C N. Generic modelling framework for economic analysis of battery systems[C]//IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). Edinburgh, UK. IET, 2011: 1-6.
- [12] THORBERGSSON E, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Primary frequency regulation with Li-ion battery based

energy storage system-evaluation and comparison of different control strategies[C]//Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, SMART POWER AND EFFICIENCY. VDE, 2013: 1-6.

- [13] MIAO L, WEN J Y, XIE H L, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2732-2742.
- [14] TAN J, ZHANG Y C. Coordinated control strategy of a battery energy storage system to support a wind power plant providing multi-timescale frequency ancillary services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1140-1153.
- [15] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3559-3568.
- [16] 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.
- [17] LI B S, WANG X, SHAHIDEHPOUR M, et al. Robust bidding strategy and profit allocation for cooperative DSR aggregators with correlated wind power generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1904-1915.
- [18] CHENG Y, NI J M, FAN S L, 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. Institution of Engineering and Technology, 2015: 1-6.
- [19] NASH JR J F. The bargaining problem[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1950: 155-162.
- [20] 王锦桥. 基于讨价还价博弈的分布式能源合作收益分配策略[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [21] HARSANYI J C. Games with incomplete information played by 'Bayesian' players, part III. the basic probability distribution of the game[J]. Management Science, 1968, 14(7): 486-502.
- [22] TRAN D, KHAMBADKONE A M. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1289-1296.
- [23] DUGGAL I, VENKATESH B. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of dischargebased cost model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2110-2118.
- [24] 张曦,康重庆,张宁,等.太阳能光伏发电的中长期随机 特性分析[J].电力系统自动化,2014,38(6):6-13.
  ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13(in Chinese).

- [25] HARSANYI J C, SELTEN R. A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information[J]. Management Science, 1972, 18(5): 80-106.
- [26] VON NEUMANN J, MORGENSTERN O. Theory of games and economic behavior (60th anniversary commemorative edition)[M]. Princeton: Princeton University Press, 2007.
- [27] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [28] PJM. PJM manual 12: balancing operations[R]. PJM, 2014.
- [29] AEMO. Dispatch summary [DB/OL]. [2020-04]. http://www. nemweb.com.au/#dispatchis-reports.
- [30] Aneroid Energy. Wind energy [DB/OL].[2020-04]. https:// anero.id/energy/wind-energy.

收稿日期:2020-04-12;修回日期:2020-06-16。 作者简介:



陈雯(1985),女,博士生,工 程师,研究方向为虚拟电厂经济运 行、分布式能源和电力市场。

孙荣峰(1974),男,研究员, 研究方向为低碳能源减排。

邱靖(1986),男,博士,研究 员,研究方向为电力系统规划、综合 能源系统建模、能源经济学等。通信

作者, E-mail: qiujing0322@gmail.com。

柴庆冕 (1986),男,博士生,研究方向为电力系统 仿真与计算、电网优化与控制、可再生能源并网稳定性 分析。

(责任编辑 张宇)