

# 基于风光荷储联合优化的虚拟电厂竞价策略

刘佳楠<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 杨德昌<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;  
2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:**基于电力市场的竞价机制和虚拟电厂的运行机制,构建了以风电-光伏-负荷-储能联合运行体利润最大化为目标的优化决策模型。该模型充分考虑新能源机组,储能与负荷运行时的各项技术约束条件,通过虚拟电厂中风-光-荷-储间协调耦合运行的发电策略与出力安排等,实现新能源与电动汽车联合参与市场竞价。构建算例验证了该风光储联合运行优化决策模型的正确性与有效性,并通过对多组场景对比,分析新能源出力波动性对风-光-荷-储联合运行模式的竞价策略的影响。

**关键词:**虚拟电厂;新能源;出力波动;联合优化

**中图分类号:** TM74

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)06-0032-06

## 0 引言

近年来,随着煤炭资源日益匮乏以及环保需求的升温,针对可再生能源发电的研究不断深入,大规模的新能源发电在能源市场中扮演着越来越重要的角色<sup>[1,2]</sup>。然而由于分布式能源(distributed energy resource, DER)存在随机性、波动性、不确定性等客观问题<sup>[3]</sup>,传统电力系统的结构、形态与运行控制方式也需随之变革,包括发电厂、电网及用户在内的整个电力系统都需要与之相适应<sup>[4-6]</sup>。

在此背景下出现了虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的概念,在不改变分布式能源的情况下,通过一定的控制、通信策略,将大量分布式电源、储能、负荷等集合起来,统一参与电力市场调度运行,解决了独立分布式能源发电之间缺乏有效协调控制的问题<sup>[7-9]</sup>,为电力市场运营提供了新思路。

目前针对VPP在新能源电力消纳中的作用,国内外文献均有报道。文献[10]提出一种对含有风电机组和热电联产机组虚拟发电厂进行控制的方法,以达到平抑风电波动、降低发电成本的目标。文献[11]针对大规模风电场并网调度困难,提出将某区域风电机组和常规的水、火电机组及储能设备进行等效聚合的虚拟发电厂设想,对区域内机组设备实现电网功率的有效控制。文献[12]针对中国现有电力环境,对接入风电等清洁能源的问题和可能方案进行了讨论,然而未给出具体的方案和分析。文献[13]提出了考虑风电的电力联营市场日前出清模型,借鉴“事后电价”的思想,根据概率性

风电功率预测的结果生成多场景模型,兼顾系统运行的经济性和安全性。文献[14]基于多代理技术,建立了含传统发电商、风电商、供电商、储能服务商和用户的多方电价联动博弈模型。文献[15]提出了一种包含供给侧和需求侧的多代理双层优化模型,分析了风电商、电动汽车聚合商、提供需求响应的零售商等市场成员的竞价博弈行为。文献[16]基于多场景随机规划,建立了考虑网络约束含风电的单时段日前市场出清模型,针对风电出力的随机性,对日前能量和备用市场进行联合优化,但未考虑火电机组生产具有连续性的特征。文献[17]提出电力市场混合竞价模式及出清算法,对基础负荷采用分段竞价,并按照排队法进行出清,对波动负荷采用分时竞价,为市场竞价提供一种全新的思路。

在此基础上,本文基于电力市场中的竞标机制,在VPP的框架下,以VPP收益最大化为目标函数,统筹风电、光伏等新能源出力,联合电动汽车建立混合整数线性模型,从而进行VPP联合调度的优化设计,并利用仿真算例验证了竞价策略的有效性。

## 1 风光荷储互补策略

### 1.1 VPP 竞标机制

VPP的本质是对不同区域、多层次的新能源电站和储能等设备进行集中控制调度并完成市场运营<sup>[18]</sup>。在电网运行中,调度中心不直接控制这些发电机组或储能设备,而是通过控制VPP使其以整体的形式参与电网的运行和调度<sup>[19]</sup>。因此,与常规电厂一样,VPP同样可以参与电力市场交易和系统调度。

由于目前新能源在国内的应用仍然有限,本文

收稿日期:2017-06-30;修回日期:2017-07-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51407186)

将 VPP 看作电力市场价格的接收者,即默认其出力变化和策略优化调整对市场价格不会产生影响。假定 VPP 在日前能量市场中的竞标均按小时进行,设定单位时间内发电出力和电量在数值上相同,单位为 MW。VPP 利用风力发电和光伏发电作为新能源电力并网,当新能源产生出力偏差时会造成出力惩罚。

VPP 在负荷低谷期从能量市场购买电能安排电动汽车充电,负荷高峰期电动汽车电池为新能源提供备用,同时作为可控电源通过控制实际的充放电功率和计划充放电功率(preferred operating point, POP)的偏差来向系统提供调节服务。电动汽车一方面作为储能部分,另一方面作为负荷环节参与虚拟电厂的运营中。

## 1.2 新能源参与市场

新能源参与日前能量市场时,向独立系统运行机构(independent system operator, ISO)提交次日各个时段  $t$  的日前竞标出力,中标后接受 ISO 的调度发电。时间  $T$  内 VPP 竞标收入  $R_n$  可表示为:

$$R_n = \sum_{t=1}^T \lambda_{e,t} P_{n,b,t} \Delta t \quad (1)$$

式中:  $P_{n,b,t}$  为新能源机组的竞标出力;  $\lambda_{e,t}$  为日前能量市场的价格;  $\Delta t$  为单位时段的长度。

电动汽车通过充放电为 VPP 新能源竞标出力提供的备用为  $P_{ev,c,t}$  和  $P_{ev,dc,t}$ 。假设新能源实际出力大于、小于竞标出力的偏差分别为  $P_{pc,h,t}$  和  $P_{pc,l,t}$ ,对应的惩罚系数分别为  $\gamma_{pc,h}$  和  $\gamma_{pc,l}$ ,则新能源出力偏差导致的经济惩罚  $C_{pc}$  如下所示。

$$C_{pc} = \sum_{t=1}^T \lambda_{e,t} (\gamma_{pc,h} P_{pc,h,t} u_{h,t} + \gamma_{pc,l} P_{pc,l,t} u_{l,t}) \Delta t \quad (2)$$

$$P_{pc,h,t} = P_{n,r,t} + P_{ev,dc,t} - P_{ev,c,t} - P_{n,b,t} \quad (3)$$

$$P_{pc,l,t} = P_{n,b,t} + P_{ev,c,t} - P_{ev,dc,t} - P_{n,r,t} \quad (4)$$

式中:  $P_{n,r,t}$  为新能源机组的实际出力;  $u_{h,t}$ ,  $u_{l,t}$  为 0-1 变量,  $P_{pc,h,t} > 0$  时  $u_{h,t}$  为 1,  $P_{pc,l,t} > 0$  时  $u_{l,t}$  为 1。  $\gamma_{pc,h}$ ;  $\gamma_{pc,l}$  取值均大于 0。

## 1.3 电动汽车参与市场

VPP 中的电动汽车参与调节市场竞价时,可同时提供上调备用、下调备用和旋转备用服务,  $P_{POP,t}$  表示时段  $t$  电动汽车计划充放电功率。

VPP 管理电动汽车的收入分为闲置时对电网放电的收入,以及为电动汽车充电向车主收取的电费。总收入可表示为:

$$R_{BEV} = \sum_{t \in T} (\lambda_{t,u} P_{BEV,dc,u,t} + \lambda_{t,d} P_{BEV,dc,d,t} + \lambda_{t,r} P_{BEV,dc,r,t}) + \lambda_c \sum_{t \in T} P_{BEV,dri,t} \Delta t \quad (5)$$

式中:  $P_{BEV,dc,u,t}$ ,  $P_{BEV,dc,d,t}$ ,  $P_{BEV,dc,r,t}$  分别为时段  $t$  电动汽车向电网提供的上调、下调、旋转备用的功率;  $P_{BEV,dri,t}$  为时段  $t$  电动汽车充电功率;  $\lambda_{t,u}$ ,  $\lambda_{t,d}$ ,  $\lambda_{t,r}$  分别为调节市场的上调、下调和旋转备用的容量价格;  $\lambda_c$  为 VPP 向车主收取的单位电价, VPP 为电动汽车用户提供优惠电费以吸引其参与调度。

VPP 在管理电动汽车的过程中,某时间段可调度电动汽车数量、电动汽车与虚拟电厂持续连接时间等都不确定。本文假设参与调度的电动汽车数量足够多,忽略相关调整系数,将所有电动汽车等值为一辆电动汽车<sup>[20]</sup>。同理假设 VPP 中参与电力市场竞价的风电机组、光伏电池板数量足够且型号都相同,将所有风机、光伏等值为一个风机、一个光伏阵列。

本文假定 VPP 为了降低购电成本,同时从双边合同市场和实时能量市场购电为电动汽车充电<sup>[21]</sup>。则电动汽车的购电成本如式(6)所示。

$$C_{ev,pur} = \lambda_{s,t} Q_c + \sum_{t=1}^T \lambda_{pur,t} E(P_{ev,c,t}) \Delta t \quad (6)$$

式中:  $\lambda_{s,t}$  为虚拟电厂从双边合同市场的购电价格;  $\lambda_{pur,t}$  为实时能量市场的购电价格;  $E(P_{ev,c,t})$  为电动汽车实际充电功率的期望值;  $Q_c$  表示虚拟电厂为电动汽车充电而从合同市场的购电量。

$$Q_c = \sum_{t=1}^T P_{ev,dc,t} \quad (7)$$

虚拟电厂的成本主要由购电成本  $C_{ev,pur}$  和电动汽车电池损耗成本  $C_{ev,dc}$  两部分构成。电动汽车电池放电的损耗成本为:

$$C_{ev,dc} = \sum_{t=1}^T c_{dis} E(P_{ev,dc,t}) u_{dc,t} \frac{\Delta t}{\eta_{dc}} \quad (8)$$

式中:  $E(P_{ev,dc,t})$  为电动汽车实际放电功率的期望值;  $\eta_{dc}$  为电池放电效率;  $c_{dis}$  是常量,为单位电量放电损耗成本,单位为美元/(MW·h)。

## 2 风光荷储互补优化模型

### 2.1 目标函数

VPP 环境下,风机、光伏与电动汽车联合运行的优化决策目标为联合体的总利润最大化:

$$\max R = R_n + R_{BEV} - C_{pc} - C_{ev,pur} - C_{ev,dc} \quad (9)$$

式中:  $R$  为虚拟电厂最终总收益;  $R_n$  为虚拟电厂参与市场竞标获得的收益。

### 1.2 约束条件

(1) 风机、光伏出力约束。

$$u_{h,t} + u_{l,t} = 1 \quad (10)$$

$$P_{n,min,t} \leq P_{n,r,t} \leq P_{n,max,t} \quad (11)$$

式(10)为同一时段  $t$  中新能源机组的实际出力

和竞标出力的偏差约束,式(11)为各时段新能源机组出力上下限约束。

(2) 电动汽车出力约束。

$$u_{dc,t} + u_{c,t} = 1 \quad (12)$$

$$S_{t+1} = S_t - E(P_{EV,dc,t})/\eta_{dc} - E(P_{EV,c,t})\eta_c \quad (13)$$

$$S_{t,\min} \leq S_t \leq S_{t,\max} \quad (14)$$

$$S_1 = S_{24} \quad (15)$$

$$P_{BEV,dc,d,t} + P_{POP,t} + P_{ev,dri} + P_{ev,c,t} - P_{ev,dc,t} \leq P_{ev,\max} \quad (16)$$

$$P_{POP,t} + P_{ev,c,t} - P_{BEV,dc,u,t} - P_{BEV,dc,r,t} - P_{ev,dc,t} \geq -P_{ev,\max} \quad (17)$$

$$P_{w,r,t}, P_{BEV,dc,u,t}, P_{BEV,dc,r,t}, P_{BEV,dc,d,t}, P_{ev,dri,t}, P_{ev,c,t}, P_{ev,dc,t} \geq 0 \quad (18)$$

电动汽车电池充放电约束如式(12—17)所示。式(12)为充放电状态约束,式(13)中 $S_t$ 为电动汽车电池在时段 $t$ 的SOC值,每一时刻电池SOC值由上一时间段决定。考虑电动汽车具有行驶需求及电池损耗等因素,无法实现电池完全充放电,因此在式(14)中对SOC进行约束,其中 $S_{t,\min}$ 和 $S_{t,\max}$ 分别为 $S_t$ 的最小值和最大值。式(15)中,电池每日起始电量状态与前一日结束时相同。此外,还需要考虑电动汽车电池放电约束,见式(16)、式(17), $P_{ev,\max}$ 为最大充放电功率约束。式(18)中限定了模型决策变量的取值均为非负值。

### 3 求解方法

由第2章分析可知,虚拟电厂的环境下,风光荷储联合运行的优化决策模型为多时段、大规模的混合整数线性规划模型(mixed integer linear programming, MILP)。本文基于GAMS优化平台调用CPLEX商业优化软件来进行优化求解<sup>[22]</sup>。其中针对线性规划问题,CPLEX采用单纯形法进行求解,如图1所示。

### 4 算例分析

为验证上述模型的可用性,本文列举算例模拟虚拟电厂调度风机、光伏和电动汽车参与电力市场运行。考虑到新能源发电出力不确定性对市场的影响,算例最终分别得出多组场景下虚拟电厂收益并进行相关分析。

#### 4.1 基础数据

针对风机和光伏机组出力情况,假设虚拟电厂中新能源存在出力区间,24h内出力均在出力上下限之间波动,具体数据如图2所示。

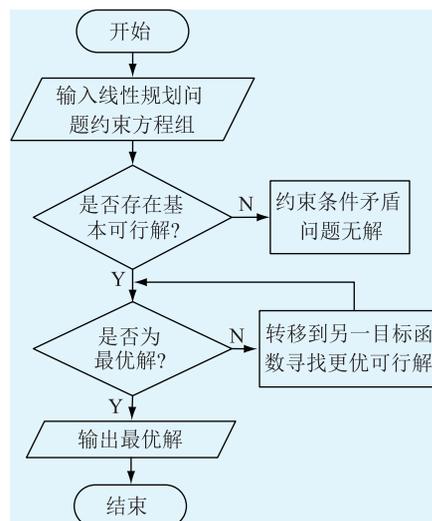


图1 单纯形法求解流程

Fig.1 PAD of simplex algorithm

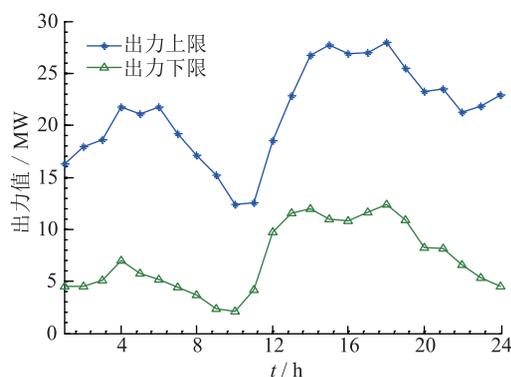


图2 新能源机组出力区间

Fig.2 New energy unit output interval

由于新能源出力具有不确定性,在日前市场中也很难对其最大和最小出力进行准确预测,因此为新能源出力上下限设置波动区间 $[\bar{\lambda} - \hat{\lambda}, \bar{\lambda} + \hat{\lambda}]$ ,其中 $\hat{\lambda}$ 为波动值。

算例针对波动性,一共进行五组场景模拟,五组场景中波动值分别为0,2.5%,5%,10%,15%,如表1所示。

表1 多场景出力波动情况

Table 1 Multi-scene output fluctuations

多组场景	区间限值波动情况
场景1	无波动
场景2	$[\bar{\lambda} - 0.025\hat{\lambda}, \bar{\lambda} + 0.025\hat{\lambda}]$
场景3	$[\bar{\lambda} - 0.05\hat{\lambda}, \bar{\lambda} + 0.05\hat{\lambda}]$
场景4	$[\bar{\lambda} - 0.1\hat{\lambda}, \bar{\lambda} + 0.1\hat{\lambda}]$
场景5	$[\bar{\lambda} - 0.15\hat{\lambda}, \bar{\lambda} + 0.15\hat{\lambda}]$

假设虚拟电厂未来24h新能源机组联合竞标出力期望值如图3所示。

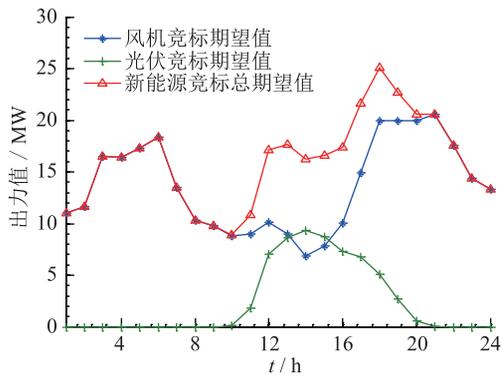


图3 风机、光伏竞标出力情况

Fig.3 Bidding output of wind turbines and photovoltaics

考虑电动汽车参与调节市场竞价时同时提供上调、下调和旋转备用服务,调节市场中的备用容量电价如图4所示。

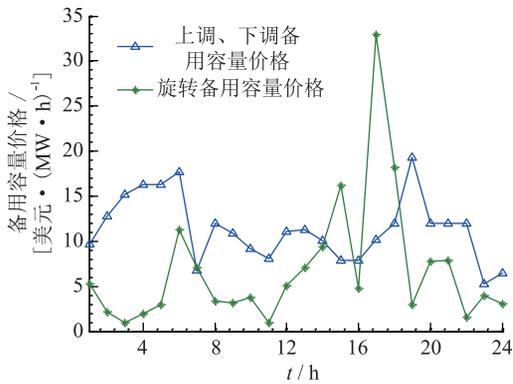


图4 备用容量电价

Fig.4 Reserve capacity price

假定虚拟电厂中单位电池容量的购买成本为400美元/(kW·h);电池最大充放电功率为3kW;电池平均充、放电效率均为0.95;电动汽车充电电价为0.14美元/(kW·h)。输配电价费用为0.07美元/(kW·h);虚拟电厂通过双边合同购电的发电侧电价为0.06美元/(kW·h),假定在优化时段(24h)内合同电量为288MW·h;设定 $\Delta t$ 为1,即每天共24个时段;新能源机组实际出力高于竞标出力和低于竞标出力时的惩罚系数分别为0.95和1.05。

#### 4.2 求解分析

按照设想,虚拟电厂通过调度电动汽车充放电来弥补新能源出力实际值与竞标值的偏差,避免相应的违约惩罚,最终提高电力市场环境中虚拟电厂的总收益。

通过求解算例,可以分别得到五组场景下虚拟电厂最终收益的优化结果,如图5所示。

五组场景下虚拟电厂在电力市场中的实际出力如图6所示。

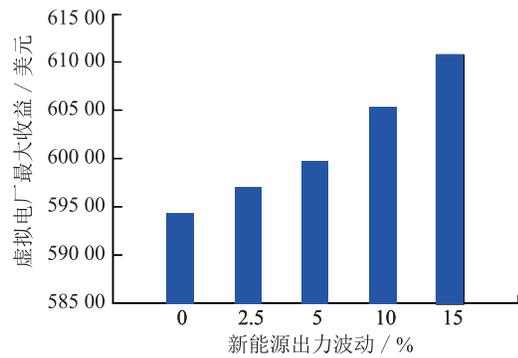


图5 不同波动下多场景竞标收益对比

Fig.5 Comparison of multi-scene bid revenue under different fluctuation

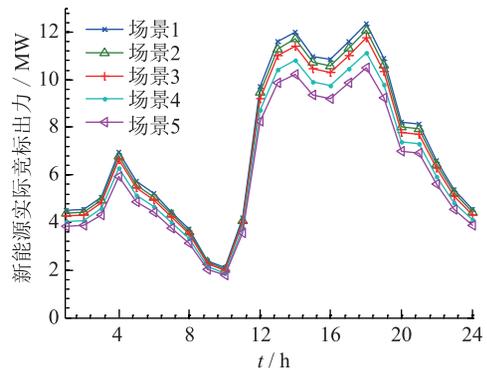


图6 不同波动下多场景实际出力对比

Fig.6 Comparison of actual output of multi-scene under different fluctuation

由图5、图6可以看出,VPP竞标期望值相同时,随着五组场景新能源出力区间波动程度的增加,VPP中风-光-荷-储联合体带来的总收益逐渐增加,而最终优化结果中新能源的实际出力却逐渐减小。针对五组场景对比,分析这种情况出现的原因,可得结论如下:

(1) 随着新能源组出力波动区间的加大,VPP竞价结果违反竞标的风险也变大,VPP起到的调度作用相应加大,收入也随之增加。

(2) VPP通过调度电动汽车调节新能源出力波动,电动汽车为平抑新能源机组出力波动所提供的备用出力也随波动加大而加大。

(3) 电动汽车通过VPP调度,为新能源机组提供备用的同时,还参与到调节市场竞价中,为系统提供备用储能而获得收益。

## 5 结语

本文就VPP环境下,结合新能源机组与电动汽车协同参与电力市场竞价的问题做了探索性的研究工作。文中主要构建了风-光-荷-储的协同竞价优化模型,并结合相关算例进行了多场景的模拟。

算例结果表明,通过构建优化模型,研究风-光-荷-储联合优化的运行策略,能够有效提高 VPP 的盈利能力,一定程度上平抑新能源自身出力的波动性,提高市场竞争力。最后,希望本文所做的工作能在一定程度上为新能源消纳与 VPP 发展提供有益的参考。

#### 参考文献:

- [1] [中发(2015)9号]中共中央国务院.关于进一步深化电力体制改革的若干意见[Z].2015.  
[China Development (2015) No. 9] The CPC Central Committee and State Council. Several opinions on further deepening the electric power system reform[Z]. 2015.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 2015.  
Energy Research Institute National Development and Reform Commission. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. 2015.
- [3] 张宁,周天睿,段长刚,等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.  
ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [4] 高明杰,惠东,高宗和,等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.  
GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind photovoltaic energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(1): 59-64.
- [5] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 1-8.  
JIN Chu, LI Jiaming, XU Shenzi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 1-8.
- [6] 卫鹏,刘建坤,周前,等. 基于半不变量和 Gya-Charlier 级数展开法的随机潮流算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 34-38.  
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. A probabilistic power flow algorithm based on semi-variable and Gram-Charlier series expansion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 34-38.
- [7] 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.
- [8] 季阳. 基于多代理系统的虚拟发电厂技术及其在智能电网中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.  
JI Yang. Multi agent system based control of virtual power plant and its application in smart grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [9] 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]. Power System Technology, 2013, 37(13): 1-9.
- [10] BELHOMME R, TRANCHITA C, VU A, et al. Overview and goals of the clusters of smart grid demonstration projects in France[C]// 2011 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Detroit, USA; 2011: 1-8.
- [11] HOUWING M, PAPAETHYMIU G, HEIJNEN P, et al. Balancing wind power with virtual power plants of micro-CHPs[C]// 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania; 2009: 1-7.
- [12] SMITH C. Key issues for development of China's power market considering large-scale renewables integration[J]. Electric Power, 2012, 45(12): 1-3.
- [13] 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. An electricity market clearing model for day-ahead pool market considering wind power[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(13): 45-50.
- [14] 李丹,刘俊勇,刘友波,等. 考虑风储参与的电力市场联动博弈分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1001-1007.  
LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Analysis on electricity market linkage game considering participation of wind power and energy storage[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1001-1007.
- [15] MIADREZA S K. A stochastic multi-layer agent-based model to study electricity market participants behavior[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 867-881.
- [16] 王博学,张成刚,王秀丽,等. 电力市场混合竞价模式及其出清算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 28-33.  
WANG Jianxue, ZHANG Chenggang, WANG Xiuli, et al. A mixed bidding mode and its clearing algorithm for electricity market applications[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(7): 28-33.
- [17] MORALES J M, CONEJO A J, KAI L, et al. Pricing electricity in pools with wind producers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1366-1376.
- [18] PANAYIOTIS M. Decision trees-aided active power reduction of a virtual power plant for power system over-frequency mitigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 251-261.
- [19] 魏向向,杨德昌,叶斌,等. 能源互联网中虚拟电厂的运行模式及启示[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 1-9.  
WEI Xiangxiang, YANG Dechang, YE Bin. Operation mode of virtual power plant in energy internet and its enlightenment[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 1-9.

- [20] 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.  
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.
- [21] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):92-102.  
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. Automation of Electric Power System, 2014,38(13):92-102.

- [22] RICHARD E. GAMS-a user's guide [M]. Washington, DC, USA:GAMS Development Corporation,2014.

作者简介:



刘佳楠

刘佳楠(1995—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,从事区域能源系统最优容量配置和经济优化调度研究(E-mail: 595224526@qq.com);

李 鹏(1981—),男,天津人,副教授,硕导,从事电力系统仿真和智能配电网研究(E-mail:lip@tju.edu.cn);

杨德昌(1983—),男,山东淄博人,副教授,硕导,从事主动配电网无功优化和状态估计(E-mail:yangdechang@cau.edu.cn)。

## Bidding Strategy Analysis of Virtual Power Plant Based on Joint Operation of Wind-solar-load-storage System

LIU Jianan<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, YANG Dechang<sup>2</sup>

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

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the bidding mechanism in electricity market and operating principles, a profit-maximization optimized decision model is constructed under the environment of electric power market with the joint wind, solar units, loads and energy storage systems. Various technical constraints of new energy units and storages are fully considered in this model, the participation of new energy and electric vehicle in the market bidding through power generation strategy and the output arrangement of the coordinated operation of the virtual power plant are realized. Numerical examples are implemented to validate the correctness and validity of the optimal decision-making model of joint wind, solar units, loads and energy storage systems. The influences of the renewable energies output fluctuations on the joint system bidding strategies are compared under multi-operating scenarios.

**Key words:** virtual power plant; new energy; output fluctuation; joint optimization

(编辑 陈 娜)