

# 碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型

孙国强<sup>1</sup>,袁 智<sup>1</sup>,许晓慧<sup>2</sup>,汪 春<sup>2</sup>,卫志农<sup>1</sup>,臧海祥<sup>1</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

**摘要:** 虚拟电厂中的可再生能源发电出力和电力市场的电价具有不确定性特征,在虚拟电厂的竞标中如何处理这些不确定性因素的影响值得深入研究。应用鲁棒优化的方法处理风电出力和电力市场电价的不确定性,同时考虑碳排放约束对虚拟电厂竞标的影响,建立虚拟电厂鲁棒优化竞标模型。算例分析结果验证了所提模型的经济性和鲁棒性,显示了鲁棒优化法处理含有不确定性参数的优化问题的有效性,且碳排放约束会使虚拟电厂竞标策略发生变化。

**关键词:** 虚拟电厂; 不确定性; 鲁棒优化; 碳排放约束; 模型

**中图分类号:** TM 315

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.015

## 0 引言

近年来,在电力需求急剧增长、化石燃料不断减少及 CO<sub>2</sub> 减排任务艰巨的背景下,世界范围内的电力行业面临许多新挑战。电力行业作为 CO<sub>2</sub> 减排的主力军,在实现国家减排目标的过程中起着重要的作用。由于风能、太阳能等分布式能源 DER (Distributed Energy Resources) 具有发电储量大、绿色可持续等优点,利用分布式发电技术实现分布式电源 DG (Distributed Generation) 参与电网运行成为当前研究的热点。然而,尽管 DG 与化石燃料相比具有许多显著的优点,但是 DG 在地理位置上分布不均匀,易受天气等自然因素影响,其出力的间歇性、随机性和波动性会对电网的安全稳定运行产生很大的冲击,严重影响电网的电压稳定、电能质量和频率特性等。将各类 DG 聚合成一个实体,以虚拟电厂<sup>[1-3]</sup>VPP (Virtual Power Plant) 的形式参与电网及电力市场运行,是克服这些冲击的一种有效方式。

VPP 在电力市场中具有双重角色<sup>[4]</sup>,在平衡市场中,按电能传输方向划分,VPP 既可以视为电能的供应者,也可以视为电能的需求者。此外,在电力辅助市场中,VPP 可以提供旋转备用等辅助服务<sup>[5]</sup>。由于 VPP 在电力市场中的双重角色,VPP 的竞标模型与传统发电厂存在显著差别,与传统发电厂相比,VPP 在竞标时需要满足功率平衡约束和潮流约束等安全约束<sup>[6-7]</sup>。在电力市场环境,由于市场电价、DG 出力等不确定性因素的影响,VPP 的竞标存在一定的风险。当 VPP 的实际出力小于计划出力时,需要以高于市场电价的价格从电力市场中购电;当实际出

力大于计划出力时,剩余出力以低于市场电价的价格向电力市场供电,这些都会影响 VPP 的竞标利润。因此,VPP 的竞标模型需要考虑这些不确定性因素的影响。

目前就 VPP 的优化竞标问题,国内外学者已经做了许多开创性的研究工作。文献[6-7]研究了 VPP 在能量市场和旋转备用市场中的竞标模型,模型中考虑了供需平衡和网络安全约束,但未计及相关的确定性因素的影响。文献[8]研究了考虑碳交易并计及碳捕集电厂和换电站的电力系统优化调度模型,模型中兼顾了碳排放量和电源成本。文献[9]研究了含电动汽车和风电机组的 VPP 参与混合市场的竞价策略,模型中将不确定量用随机变量表示,同时引入鲁棒优化方法处理相关不确定量。文献[10-11]在大规模风电接入电力系统背景下,利用鲁棒优化方法处理电力系统的调度问题,提出了一种基于风电预测区间的鲁棒风电调度模式。文献[12]研究了电力市场环境 VPP 的竞标策略问题,利用场景集处理市场电价的不确定性,但文中考虑的市场模式过于单一,且未考虑环境约束对竞标策略的影响。文献[13]研究了 VPP 在混合市场中的竞标问题,分别利用随机规划法和鲁棒优化方法处理市场电价和风电出力的不确定性,建立了鲁棒随机竞标模型,但模型中对风电出力的处理较为保守。文献[14]研究了火电机组的调度问题,利用场景集处理电价的不确定性,同时考虑了机组的碳排放约束。文献[15]研究了多个 VPP 的互动调度问题,模型中考虑了需求响应对竞标策略的影响。文献[16]根据 VPP 内部需求响应类型把 VPP 分为激励需求响应 VPP 和价格需求响应 VPP,建立了考虑需求响应 VPP 的日前调度机组组合模型。上述文献对 VPP 的优化竞标问题研究均取得了一定的研究成果,但在处理相关不确定性时大多采用随机规划法和备用整定法,这

收稿日期:2016-05-27;修回日期:2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277052,51507052);  
中国博士后科学基金资助项目(2015M571653)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277052,51507052) and Chinese Science Support Fund for Post Doctor(2015M571653)

些方法具有计算量大、计算精度难以准确保证等缺点,鲁棒优化方法应用较少。同时研究目的多以 VPP 最大化利润或最小化成本为主,鲜有研究考虑到碳排放约束对竞标的影响。

基于上述分析,本文考虑由燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站组成的 VPP 参与电力市场日前市场竞标,竞标模型中采用鲁棒优化方法处理风电出力 and 市场电价的不确定性,同时考虑到碳排放对 VPP 实际出力的约束作用,建立碳排放约束下 VPP 鲁棒优化竞标模型。

## 1 VPP 优化竞标模型

### 1.1 建模思路

本文研究的 VPP 由燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站构成。VPP 参与日前市场竞标,竞标时以最大化利润为目标,采用鲁棒优化方法处理风电出力和市场电价的不确定性。同时考虑到碳排放对 VPP 实际出力的约束作用,建立碳排放约束下 VPP 鲁棒优化竞标模型。

### 1.2 目标函数

$$\max \sum_{t=1}^T \lambda_t (p_t + L_t) - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_{i,t} \quad (1)$$

其中,  $T$  为总时段数;  $I$  为燃气轮机机组数;  $\lambda_t$  为  $t$  时段日前市场电价;  $p_t$  为  $t$  时段的竞标功率;  $L_t$  为  $t$  时段 VPP 内部负荷功率;  $C_{i,t}$  为  $t$  时段燃气轮机的发电成本。

### 1.3 约束条件

#### a. 燃气轮机的约束条件:

$$p_{i,t} = p_i^{\min} u_{i,t} + \sum_{l=1}^L \delta_{i,t}^l \quad (2)$$

$$(T_i^1 - p_i^{\min}) t_{i,t}^1 \leq \delta_{i,t}^1 \quad (3)$$

$$\delta_{i,t}^1 \leq (T_i^1 - p_i^{\min}) u_{i,t} \quad (4)$$

$$(T_i^l - T_i^{l-1}) t_{i,t}^{l-1} \leq \delta_{i,t}^l \quad l=2, 3, \dots, L-1 \quad (5)$$

$$\delta_{i,t}^l \leq (T_i^l - T_i^{l-1}) t_{i,t}^{l-1} \quad l=2, 3, \dots, L-1 \quad (6)$$

$$0 \leq \delta_{i,t}^L \leq (p_i^{\max} - T_i^{L-1}) t_{i,t}^{L-1} \quad (7)$$

$$C_{i,t} = a_{c,i} u_{i,t} + d_{i,t} + b_{s,i} y_{i,t} + c_i z_{i,t} \quad (8)$$

$$d_{i,t} = \sum_{l=1}^L f_i^l \delta_{i,t}^l \quad (9)$$

$$p_i^{\min} u_{i,t} \leq p_{i,t} \leq p_i^{\max} \quad (10)$$

$$p_{i,t}^{\max} \leq p_i^{\max} (u_{i,t} - z_{i,t+1}) + S_{Di} z_{i,t+1} \quad (11)$$

$$p_{i,t}^{\max} \leq p_{i,t-1}^{\max} + R_{Ui} u_{i,t-1} + S_{Ui} y_{i,t} \quad (12)$$

$$p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq R_{Di} u_{i,t} + S_{Di} z_{i,t} \quad (13)$$

$$\sum_{t=k}^{k+D_{Ti}-1} (1 - u_{i,t}) \geq D_{Ti} z_{i,t} \quad k = J_i + 1, \dots, T - D_{Ti} + 1 \quad (14)$$

$$\sum_{t=k}^T (1 - u_{i,t} - z_{i,t}) \geq 0 \quad k = T - D_{Ti} + 2, \dots, T \quad (15)$$

$$\sum_{t=k}^{k+U_{Ti}-1} u_{i,t} \geq U_{Ti} y_{i,t} \quad k = N_i + 1, \dots, T - U_{Ti} + 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t=k}^T (u_{i,t} - z_{i,t}) \geq 0 \quad k = T - U_{Ti} + 2, \dots, T \quad (17)$$

$$y_{i,t} - z_{i,t} = u_{i,t} - u_{i,t-1} \quad (18)$$

$$y_{i,t} + z_{i,t} \leq 1 \quad (19)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, I; t=1, 2, \dots, T; p_{i,t}$  为  $t$  时段燃气轮机  $i$  的出力;  $p_i^{\max}(p_i^{\min})$  为燃气轮机  $i$  的最大(小)出力; 将可变成本分段线性化,  $L$  为分段数;  $f_i^l$  为第  $l$  段斜率;  $\delta_{i,t}^l$  为第  $l$  段出力;  $T_i^l$  为第  $l$  段出力上限;  $a_{c,i}$  为固定成本;  $b_{s,i}$  为启动成本;  $c_i$  为停机成本;  $d_{i,t}$  为  $t$  时段可变成本;  $p_{i,t}^{\max}$  为  $t$  时段最大出力;  $R_{Ui}(R_{Di})$  为机组向上(下)爬坡率;  $S_{Ui}(S_{Di})$  为机组启动(停机)速率;  $U_{Ti}(D_{Ti})$  为最小启动(停机)时间;  $J_i(N_i)$  为机组已工作(不工作)时段数; 布尔变量  $u_{i,t}$  为工作状态变量, 为 1 时表示工作, 反之表示不工作; 布尔变量  $y_{i,t}$  为启动状态变量, 为 1 时启动, 反之不启动; 布尔变量  $z_{i,t}$  为停机状态变量, 为 1 时停机, 反之不停机; 布尔变量  $t_{i,t}^l$  当且仅当机组出力大于第  $l$  段出力上限时为 1, 反之为 0。

约束式(2)~(19)分别表示燃气轮机的出力、爬坡、启停等约束, 其中约束式(18)与式(19)为其正常工作时的逻辑约束。

#### b. 抽水蓄能电站的约束条件。

假设抽水蓄能电站初始时刻的储能为 0, 将抽水蓄能电站内部水量的变化等效为电量的变化, 则抽水蓄能电站  $t$  时段的蓄水量可等效为蓄电量<sup>[13,17]</sup>, 有:

$$E_1 = 0 \quad (20)$$

$$E_t = p_t^{\text{ch}} d_t \leq E_{\max} \quad (21)$$

$$p_t^{\text{dch}} d_t \leq E_{t-1} \quad (22)$$

$$p_t^{\text{ch}} d_t \leq E_c \quad (23)$$

$$p_t^{\text{dch}} d_t \leq E_d \quad (24)$$

$$E_t = E_{t-1} + (p_t^{\text{ch}} - p_t^{\text{dch}}) d_t \quad (25)$$

其中,  $E_t(t=2, 3, \dots, T)$  为  $t$  时段抽水蓄能电站蓄水量对应的等效蓄电量;  $E_c$  为最大蓄入电量;  $E_d$  为最大发出电量;  $E_{\max}$  为最大蓄电量;  $p_t^{\text{ch}}(p_t^{\text{dch}})$  为  $t$  时段蓄入(放出)水量对应的等效充电(放电)功率, 为决策变量;  $d_t$  为单时段时长, 本文中取为 1 h。

#### c. 功率平衡约束:

$$W_t + \sum_{i=1}^I g_{i,t} + p_t^{\text{dch}} \eta_{\text{dch}} = L_t + p_t + \frac{p_t^{\text{ch}}}{\eta_{\text{ch}}} \quad (26)$$

其中,  $W_t$  为  $t$  时段风电出力;  $g_{i,t}$  为  $t$  时段燃气轮机出力;  $\eta_{\text{ch}}(\eta_{\text{dch}})$  为抽水蓄能电站的蓄能(发电)效率。

#### d. 碳排放的约束条件。

随着全球环境问题的日益突出, 以低能耗、低排放、低污染为主要特征的低碳经济成为各国积极倡导的发展模式, 碳交易机制的引入促进了 CO<sub>2</sub> 等温室气体的减排, 但与此同时, 在促进 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 减排方面还缺少相应的市场机制<sup>[18]</sup>。VPP 中燃气轮机排放的 CO<sub>2</sub> 等有害气体随着发电量的增加而增加, 为了控

制 CO<sub>2</sub> 等有害气体的排放量,在碳交易机制背景下,本文引入最大允许碳排放量 MTEA (Maximum Total Emission Allowances) 这一指标,VPP 在竞标时需要考虑其最大碳排放量不得超过 MTEA 值。

VPP 中燃气轮机正常工作时 CO<sub>2</sub> 的排放量可以视为燃气轮机工作所消耗的化石燃料的线性函数,因此,CO<sub>2</sub> 的排放模型与燃气轮机成本具有相同的形式<sup>[14]</sup>,即:

$$e_t = c_e + \sum_{r=1}^R f_e^r \phi_t^r \quad (27)$$

其中, $e_t$  为  $t$  时段单台燃气轮机的碳排放量; $c_e$  为固定排放量; $R$  为分段数; $f_e^r$  为第  $r$  段斜率; $\phi_t^r$  为第  $r$  段出力。

当 VPP 考虑碳排放时需要满足碳排放约束,即:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T e_{i,t} \leq \text{MTEA} \quad (28)$$

## 2 鲁棒优化理论

### 2.1 概述

目前,处理含有不确定性参数优化问题的方法主要有随机规划法和鲁棒优化法。随机规划法基于不确定性参数的概率分布,具有计算量大、概率分布难以准确获得等缺点,限制了该方法的广泛应用。与随机规划法不同,鲁棒优化法求解时不需要已知不确定性参数的概率分布,而是通过构建“不确定集合”处理不确定性参数,使得当不确定性参数取值为集合内的任意值时,约束条件都能够满足。由于鲁棒优化的本质在于制定融合恶劣场景下的决策方案,因此优化结果能够考虑到不确定性参数的恶劣场景对决策方案的影响。近年来,鲁棒优化方法在电力系统领域已有了一些应用报道<sup>[19-20]</sup>。

鲁棒优化中“不确定集合”的选取是处理问题的关键。目前,“不确定集合”多选取为盒式、椭圆、多面体等形式,当选取盒式集合时,鲁棒优化称为盒式集合鲁棒优化,以最小化线性规划问题为例:

$$\begin{cases} \min \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  为决策变量,其上、下限分别为  $\mathbf{u}, \mathbf{l}; \mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$  为目标函数系数向量; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}, \mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$  分别为不等式约束的系数矩阵和向量。为了不失一般性,假设有且仅有系数矩阵  $\mathbf{A}$  中的元素含随机变量,由鲁棒理论可知,系数向量  $\mathbf{c}$  和  $\mathbf{b}$  中的随机变量均可以转化为系数矩阵  $\mathbf{A}$  中的随机变量。假设  $a_{ij}$  为系数矩阵  $\mathbf{A}$  中的随机变量,均值为  $\bar{a}_{ij}, a_{ij} \in [a_{ij}^L, a_{ij}^U], a_{ij}^U(a_{ij}^L)$  为随机变量取值范围的上(下)限。引入  $t_{ij}^B \in [0, \bar{a}_{ij} - a_{ij}^L], t_{ij}^F \in [0, a_{ij}^U - \bar{a}_{ij}]$ 。假设问题式(29)中任意 2 个不等式约束之间的随机

变量线性无关,记  $J_i$  为系数矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $i$  行中随机变量的集合,  $|J_i|$  为集合中元素个数。由鲁棒理论可知,对约束  $i$  引入鲁棒系数  $\Gamma_i$ ,满足  $\Gamma_i \leq |J_i|$ ,改变  $\Gamma_i$  的取值可以调整解违背含有不确定参数约束的概率水平,约束  $i$  中随机变量的取值范围与鲁棒系数  $\Gamma_i$  存在集合关系:

$$S_i(\Gamma_i) = \left\{ a_{ik} \in [\bar{a}_{ik} - \beta_{ik} t_{ik}^B, \bar{a}_{ik} + \beta_{ik} t_{ik}^F], \right. \\ \left. 0 \leq \beta_{ik} \leq 1, \sum_{k \in a_i} \beta_{ik} \leq \Gamma_i \right\} \quad (30)$$

其中, $a_i$  为系数矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $i$  行随机变量集合, $a_{ik}$  为集合中第  $k$  个元素;变量  $\beta_{ik}$  由鲁棒系数  $\Gamma_i$  决定。系数矩阵  $\mathbf{A}$  中含随机变量的最小化线性规划问题式(29)可以等价转化为对应的鲁棒对等模型<sup>[21-22]</sup>,即:

$$\begin{cases} \min \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j + \Gamma_i z_i + \sum_{k \in J_i} p_{ik} \leq b_i \\ z_i + p_{ik} \geq t_{ik}^F x_k \\ z_i + p_{ik} \geq -t_{ik}^B x_k \\ z_i \geq 0, p_{ik} \geq 0 \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (31)$$

其中, $i=1,2,\dots,m; k \in J_i$ ; 变量  $z_i, p_{ik}$  为等价转化过程中引入的新决策变量,无具体物理意义。由式(31)可知,鲁棒对等模型为确定性线性规划模型,可以采用线性规划的相关方法进行求解。通过调节鲁棒系数  $\Gamma_i$ ,可以协调目标函数最优解与解的鲁棒程度的关系。

为了使违反约束  $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$  的概率不超过  $\varepsilon_i$ ,鲁棒系数  $\Gamma_i$  需要满足约束:

$$\Gamma_i \geq 1 + \Phi^{-1}(1 - \varepsilon_i) \sqrt{n_i} \quad (32)$$

其中, $\Phi^{-1}$  为标准正态分布的累积分布函数的逆函数; $n_i$  为约束  $i$  中所含不确定参数的个数。

### 2.2 风电出力和电价不确定集

受天气等自然因素影响,风电出力具有间歇性、随机性和波动性,风电出力波动范围如式(33)所示。

$$\mathbf{W}^L \leq \mathbf{W} \leq \mathbf{W}^U \quad (33)$$

其中, $\mathbf{W}^L$  和  $\mathbf{W}^U$  分别为风电场风电出力的最小可能出力和最大可能出力。

考虑到 VPP 竞标问题的工程实际,可以将随机变量风电出力描述为确定性出力均值与出力波动的总和,即:

$$\mathbf{W} = \boldsymbol{\mu}_w + \Delta \mathbf{P}_w \quad (34)$$

其中,风电出力均值  $\boldsymbol{\mu}_w$  可由风电场所在地区的历史数据分析得到;随机变量  $\Delta \mathbf{P}_w$  反映了风电出力偏离出力均值的程度,满足  $-\mathbf{w}^B \leq \Delta \mathbf{P}_w \leq \mathbf{w}^F, \mathbf{w}^F = \mathbf{W}^U - \boldsymbol{\mu}_w, \mathbf{w}^B = \boldsymbol{\mu}_w - \mathbf{W}^L, \mathbf{w}^F$  和  $\mathbf{w}^B$  分别为风电出力的最大上波动向量和最大下波动向量。



在电力市场中,当没有发生输电阻塞时,市场结清价格是整个系统的唯一价格。独立系统运行机构在收到报价之后,将所有发电报价综合成供应曲线,将所有电能需求综合成需求曲线,2 条曲线的交点就是市场结清价格。VPP 作为单一的价格接受者,假设其竞标行为不会影响市场结清价格的形成,则其参与的多市场交易统一按照该价格结算。市场电价波动范围如式(35)所示。

$$\lambda^L \leq \lambda \leq \lambda^U \tag{35}$$

其中,  $\lambda^L$  和  $\lambda^U$  分别为市场电价最小可能值和最大可能值。

与风电出力不确定性处理方法相似,可以将随机变量市场电价描述为确定性电价均值与电价波动的总和,即:

$$\lambda = \mu_{\lambda} + \Delta \lambda \tag{36}$$

其中,电价均值  $\mu_{\lambda}$  可由所在地区电力市场的历史数据分析得到;随机变量  $\Delta \lambda$  反映了电价偏离电价均值的程度,满足  $-\lambda^B \leq \Delta \lambda \leq \lambda^F, \lambda^F = \lambda^U - \mu_{\lambda}, \lambda^B = \mu_{\lambda} - \lambda^L$ ,  $\lambda^F$  和  $\lambda^B$  分别为市场电价的最大的上波动向量和最大的下波动向量。

由上述分析可知,随机变量  $\Delta P_w$  和  $\Delta \lambda$  是本文提出的 VPP 竞标模型中的随机变量。根据鲁棒优化理论,随机变量  $\Delta P_w$  和  $\Delta \lambda$  描述为鲁棒区间集合,即:

$$S_1(\Gamma_1) = \left\{ \Delta P_w \mid \Delta P_w \in [-\beta_j w_j^B, \beta_j w_j^F], \right. \\ \left. 0 \leq \beta_j \leq 1, \sum_{j \in B_0} \beta_j \leq \Gamma_1 \right\} \tag{37}$$

$$S_0(\Gamma_0) = \left\{ \Delta \lambda \mid \Delta \lambda_j \in [-\alpha_j \lambda_j^B, \alpha_j \lambda_j^F], \right. \\ \left. 0 \leq \alpha_j \leq 1, \sum_{j \in A_0} \alpha_j \leq \Gamma_0 \right\} \tag{38}$$

其中,  $A_0$  为电价随机变量集合,  $B_0$  为风电出力随机变量的集合,  $|A_0|$ 、 $|B_0|$  为集合中元素个数;鲁棒系数  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_0$  小于等于总时段数;  $\beta_j(\alpha_j)$  由鲁棒系数  $\Gamma_1(\Gamma_0)$  决定。基于鲁棒理论,含随机变量的等式约束式(26)和目标函数式(1)可转化为形如式(31)所示的鲁棒对等确定性模型。

3 算法分析

3.1 系统参数

本文 VPP 由燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站组成,VPP 中各设备的参数采用文献[13]中的数据。选取某小型风电场和欧洲电力市场的历史数据,通过人工神经网络算法<sup>[23]</sup>预测得到风电出力和市场电价的预测均值,利用第 2 节介绍的处理不确定参数的方法,假设风电出力和市场电价的波动范围为预测均值的  $\pm 10\%$ ,形成鲁棒优化的盒式集合不确定集。市场电价的预测均值如表 1 所示,风电出力的预测均

值如表 2 所示,VPP 内负荷需求如表 3 所示,抽水蓄能电站的参数如表 4 所示。

表 1 电价的预测均值  
Table 1 Forecasted mean electricity prices

| 时段 | 电价/<br>[€·(MW·h) <sup>-1</sup> ] | 时段 | 电价/<br>[€·(MW·h) <sup>-1</sup> ] | 时段 | 电价/<br>[€·(MW·h) <sup>-1</sup> ] |
|----|----------------------------------|----|----------------------------------|----|----------------------------------|
| 1  | 35.87                            | 9  | 56.37                            | 17 | 45.74                            |
| 2  | 37.22                            | 10 | 57.43                            | 18 | 45.51                            |
| 3  | 31.96                            | 11 | 54.61                            | 19 | 47.57                            |
| 4  | 33.40                            | 12 | 53.28                            | 20 | 50.59                            |
| 5  | 32.12                            | 13 | 52.48                            | 21 | 52.00                            |
| 6  | 35.38                            | 14 | 47.96                            | 22 | 47.98                            |
| 7  | 39.22                            | 15 | 49.07                            | 23 | 46.56                            |
| 8  | 49.91                            | 16 | 46.63                            | 24 | 48.46                            |

表 2 风电出力的预测均值  
Table 2 Forecasted mean wind power outputs

| 时段 | 功率/MW | 时段 | 功率/MW | 时段 | 功率/MW |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 1  | 6.14  | 9  | 4.87  | 17 | 1.84  |
| 2  | 6.22  | 10 | 4.80  | 18 | 2.00  |
| 3  | 6.24  | 11 | 5.05  | 19 | 2.31  |
| 4  | 6.40  | 12 | 5.38  | 20 | 3.00  |
| 5  | 6.02  | 13 | 5.51  | 21 | 3.48  |
| 6  | 5.77  | 14 | 5.28  | 22 | 3.37  |
| 7  | 5.60  | 15 | 4.90  | 23 | 3.19  |
| 8  | 5.25  | 16 | 1.33  | 24 | 3.32  |

表 3 VPP 内负荷数据  
Table 3 Loads of VPP

| 时段 | 负荷/MW | 时段 | 负荷/MW | 时段 | 负荷/MW |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 1  | 2.5   | 9  | 4.9   | 17 | 4.6   |
| 2  | 2.5   | 10 | 5.4   | 18 | 4.1   |
| 3  | 2.9   | 11 | 6.4   | 19 | 3.7   |
| 4  | 3.2   | 12 | 7.6   | 20 | 3.3   |
| 5  | 3.5   | 13 | 7.0   | 21 | 3.1   |
| 6  | 3.9   | 14 | 5.9   | 22 | 2.7   |
| 7  | 4.3   | 15 | 5.5   | 23 | 2.5   |
| 8  | 4.5   | 16 | 5.1   | 24 | 2.5   |

表 4 抽水蓄能电站参数  
Table 4 Parameters of pumped storage power plant

| $E_{\max}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ | $E_c/(\text{MW} \cdot \text{h})$ | $E_d/(\text{MW} \cdot \text{h})$ | $\eta_{\text{ch}}/\%$ | $\eta_{\text{dis}}/\%$ |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 40                                    | 8                                | 6                                | 87                    | 87                     |

3.2 优化结果及分析

采用 IBM 公司的优化软件 CPLEX12.5<sup>[24]</sup>在 4 G 内存、四核 3.20 GHz CPU 的个人计算机上求解上述鲁棒优化竞标问题。

VPP 在竞标过程中会受到市场电价、风电出力等不确定性因素的影响,当不考虑这些不确定性因素的影响时,VPP 竞标模型即为确定性的优化问题;当考虑这些因素的影响时,可以采用随机规划法和鲁棒优化法处理市场电价、风电出力的不确定性。为了比较各种处理方法的计算结果,针对 3 种处理方法分别模拟 VPP 5 次的竞标运行情况,求解确定性竞标模型(方法 1)、采用随机规划法处理不确定性(方法

2)、采用鲁棒优化法处理不确定性(方法 3),得到 VPP 竞标利润如表 5 所示。

| 表 5 3 种方法的利润比较<br>Table 5 Comparison of profits<br>among three methods |         |         |         |
|------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| 竞标次数                                                                   | 竞标利润/€  |         |         |
|                                                                        | 方法 1    | 方法 2    | 方法 3    |
| 1                                                                      | 4437.87 | 4261.49 | 4020.27 |
| 2                                                                      | 4318.30 | 4093.62 | 3870.36 |
| 3                                                                      | 4711.96 | 4495.37 | 4309.91 |
| 4                                                                      | 4614.22 | 4111.34 | 4030.65 |
| 5                                                                      | 4581.83 | 4354.79 | 4061.44 |

从表 5 可以看出,当不考虑不确定性因素影响时获得的竞标利润(方法 1)大于计及不确定性因素影响时获得的竞标利润(方法 2、方法 3),这是因为当考虑风电出力和市场电价的不确定性时,VPP 竞标时为了避免由于不确定性因素而导致的低利润及亏损的风险,竞标策略变得较为保守,竞标利润值减小。另一方面,方法 3 对应的利润值小于方法 2,这表明与随机规划法相比,在提高 VPP 竞标利润方面,鲁棒优化法的最优解劣于随机规划法。然而,与方法 2 相比,方法 3 的最优解的波动性小,解的鲁棒性强,通过鲁棒优化法得到的最优竞标策略对工程实际中 VPP 的竞标行为具有指导意义。

表 6 给出了 VPP 在不同约束违反概率值下对应的竞标利润值和相关参数值。约束违反概率值越小,VPP 竞标决策方案的经济风险越小,从表中可以看出,随着约束违反概率值的减小,竞标利润值相应地减小。这是因为,当鲁棒系数增大时,即认为风电出力和市场电价的实际值与预测值偏差增大,为了满足 VPP 内功率需求的平衡,竞标方案越保守,相应的竞标利润越低。

表 6 不同约束违反概率下的利润值及相关参数  
Table 6 Profit and corresponding parameters for  
different constraint violation probabilities

| 场景 | $\Gamma$ | 约束违反<br>概率/% | $\varepsilon$ | 分位数               |                     | 利润值/€  |
|----|----------|--------------|---------------|-------------------|---------------------|--------|
|    |          |              |               | $z_{\varepsilon}$ | $z_{1-\varepsilon}$ |        |
| 1  | 1        | 50.00        | 50.00         | 0                 | 0                   | 4438.9 |
| 2  | 5        | 20.61        | 79.39         | -0.8200           | 0.8200              | 4498.4 |
| 3  | 9        | 5.16         | 94.84         | -1.6295           | 1.6295              | 4356.2 |
| 4  | 13       | 0.71         | 99.29         | -2.4522           | 2.4522              | 4318.7 |
| 5  | 17       | 0.05         | 99.95         | -3.2905           | 3.2905              | 4281.9 |
| 6  | 21       | 0.01         | 99.99         | -3.7190           | 3.7190              | 4240.5 |
| 7  | 24       | 0            | 100.00        | —                 | —                   | 4217.3 |

图 1 给出了 VPP 竞标利润与 MTEA 值之间的关系。从图中可以看出,VPP 竞标利润随着 MTEA 值的增大而增大,这是因为当 MTEA 值增大时,碳排放约束变得越不严格,VPP 倾向于获得更高的竞标利润而忽略了碳排放约束对其竞标的影响。同时,当 MTEA 值超过某个临界值时,碳排放约束会失去对

竞标的约束作用,由于 VPP 受到内部自身实际出力的限制,竞标利润趋于定值。从图中还可以看出,当 MTEA 值较小时,曲线斜率较大,随着 MTEA 值的增大,曲线斜率逐渐减小,这是因为 MTEA 值越小,碳排放约束越严格,竞标利润对 MTEA 值越敏感。从图 2 可以看出,当 MTEA 值较大时,VPP 的竞标量较大,且竞标量与市场电价的变化趋势大致相同,当 MTEA 值减小时,VPP 选择在高电价时向能量市场输送电能,以达到提高竞标利润的目的。不同 MTEA 值下燃气轮机和抽水蓄能电站的优化运行方案如图 3 所示。

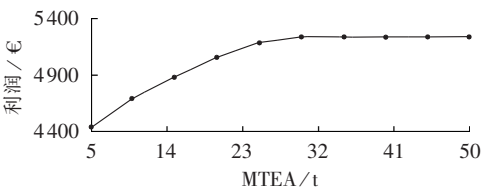


图 1 不同 MTEA 值下的利润值  
Fig.1 Curve of profits vs. MTEA

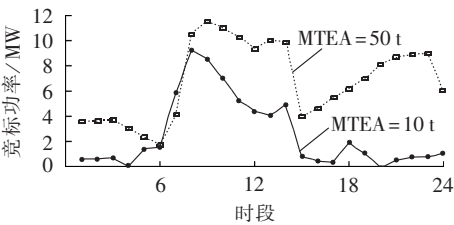
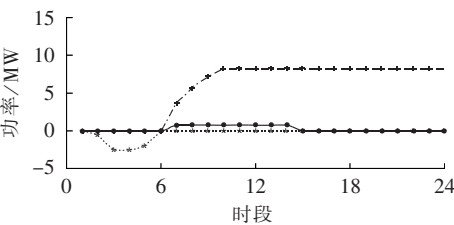
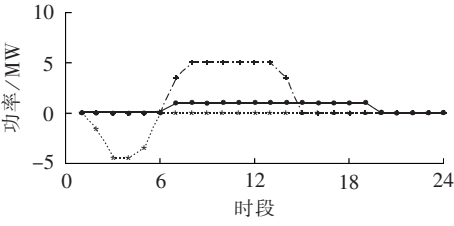


图 2 不同 MTEA 值下的最优竞标曲线  
Fig.2 Optimal bidding curve for  
different MTEAs



(a) MTEA=50 t



(b) MTEA=10 t

--- 燃气轮机发电, ..... 抽水蓄能电站蓄电, — 抽水蓄能电站发电

图 3 不同 MTEA 值下虚拟电厂的优化运行方案  
Fig.3 Optimal operation scheme of VPP for  
different MTEAs

不同 MTEA 值下 VPP 中燃气轮机的机组组合情况如表 7 所示。从表 7 可以看出,燃气轮机的工作状况随着 MTEA 值的变化发生相应的改变。受到

燃气轮机的启停约束、爬坡约束和启停成本的约束,燃气轮机不能进行频繁的启停操作。同时,VPP 中燃气轮机的出力还与负荷需求、市场电价有关。因此,VPP 选择在负荷需求和电价较大的情况下启动燃气轮机,这样可以在满足负荷需求的同时参与市场竞标以提高竞标利润。由 24 时段的前后两部分可以看出,当 MTEA 值较大时,燃气轮机可以正常工作更长的时间,VPP 选择在电价较高的后一部分使其正常工作,当 MTEA 值较小时,受碳排放约束的影响,VPP 则需要关闭正常工作的燃气轮机。

表 7 不同 MTEA 值下的燃气轮机机组组合  
Table 7 Unit commitment scheme of gas turbine for different MTEAs

| MTEA/t | 24 时段燃气轮机机组组合情况                                 |
|--------|-------------------------------------------------|
| 50     | 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 |
| 10     | 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 |

4 结论

市场电价、风电出力的不确定性是 VPP 参与电力市场竞标时必须考虑的一个重要问题。本文在电力市场环境下,采用鲁棒优化法处理电价和风电出力的不确定性,建立了考虑电价、风电出力不确定性和碳排放约束的 VPP 鲁棒优化竞标模型,给出了模型的求解方法,并以燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站组成的 VPP 为例,可以得到以下结论。

- a. 处理电价和风电出力的不确定性时,采用鲁棒优化法处理不确定性参数,可以保证竞标策略具有强鲁棒性,避免由于不确定性参数的波动使得 VPP 承担低利润及亏损的风险。
- b. 鲁棒优化的结果与鲁棒系数的选取有关,当鲁棒系数较小时,优化结果不能充分考虑不确定性参数的影响;当鲁棒系数较大时,优化结果过于保守,有失经济性。
- c. 碳排放约束会使 VPP 竞标策略发生变化。当约束较为严格时,VPP 会选择在高电价、高负荷需求时竞标以获得高利润,同时约束作用会随 MTEA 值的增大逐渐减弱。

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] 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):96-101.  
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):96-101.

[3] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J].

电网技术,2013,37(8):2258-2263.

CHEN Chunwu,LI Na,ZHONG Pengyuan,et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology,2013,37(8):2258-2263.

[4] PANDZIC H,MORALES J M,CONEJO A J,et al. Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming[J]. Applied Energy,2013,105:282-292.

[5] ETHERDEN N,BOLLEN M H J,LUNDKVIST J. Quantification of ancillary services from a virtual power plant in an existing subtransmission network[C]//Innovative Smart Grid Technologies Europe,4th IEEE/PES. Copenhagen,Denmark:[s.n.],2013:1-5.

[6] MASHHOUR E,MOGHADDAS M S. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets:part I problem formulation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(2):949-956.

[7] MASHHOUR E,MOGHADDAS M S. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets:part II numerical analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(2):957-964.

[8] 高亚静,李瑞环,梁海峰. 碳市场环境下计及碳捕集电厂和换电站的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):150-156.  
GAO Yajing,LI Ruihuan,LIANG Haifeng. Power system optimal dispatch incorporating carbon capture power plant and battery swap station under market environment[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(17):150-156.

[9] 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 Systems,2014,38(13):92-102.

[10] 李志刚,吴文传,张伯明,等. 消纳大规模风电的鲁棒区间经济调度(一)调度模式与数学模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):33-39.  
LI Zhigang,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. A robust interval economic dispatch method accommodating large-scale wind power generation part one dispatch scheme and mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20):33-39.

[11] 李志刚,吴文传,张伯明,等. 消纳大规模风电的鲁棒区间经济调度(二)不确定集合构建与保守度调节[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):32-38.  
LI Zhigang,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. A robust interval economic dispatch method accommodating large-scale wind power generation part two uncertainty set modeling and conservativeness adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(21):32-38.

[12] HEREDIA F J,RIDER M J,CORCHERO C. Optimal bidding strategies for thermal and generic programming units in the day-ahead electricity market[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(3):1504-1518.

[13] 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(9):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(9):43-49.
- [14] LAIA R,POUSINHO H M I. Self-scheduling and bidding strategies of thermal units with stochastic emission constraints[J]. Energy Conversion and Management,2015,89:975-984.
- [15] WANG Yao,AI Xin,TAN Zhongfu,et al. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and theory[J]. IEEE Trans on Smart Grid,2015,23(3):1-10.
- [16] 牛文娟,李扬,王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟发电厂建模[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.  
NIU Wenjuan,LI Yang,WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3630-3637.
- [17] PANDZIC H,KUZLE I,CAPUDER T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy,2013,101:134-141.
- [18] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术,2009,33(2):1-7.  
KANG Chongqing,CHEN Qixin,XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology,2009,33(2):1-7.
- [19] 魏犇,刘峰,梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度:(一)理论基础[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):37-43.  
WEI Wei,LIU Feng,MEI Shengwei. Robust and economic scheduling methodology for power system:part one theoretical foundation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):37-43.
- [20] 刘斌,刘锋,王程,等. 考虑风电场灵活性及出力不确定性的机组组合[J]. 电网技术,2015,39(3):730-736.  
LIU Bin,LIU Feng,WANG Cheng,et al. Unit commitment considering flexibility and uncertainty of wind power generation[J]. Power System Technology,2015,39(3):730-736.
- [21] KANG S C. Robust linear optimization using distributional information[D]. Boston,USA:Boston University,2008.
- [22] BARINGO L,CONEJO A J. Offering strategy via robust optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(3):1418-1425.
- [23] 范高峰,王伟胜,刘纯. 基于人工神经网络的风电功率短期预测系统[J]. 电网技术,2008,32(22):72-76.  
FAN Gaofeng,WANG Weisheng,LIU Chun. Artificial neural network based wind power short term prediction system[J]. Power System Technology,2008,32(22):72-76.
- [24] IBM ILOG CPLEX Optimizer[EB/OL]. [2015-03-10]. <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>.

#### 作者简介:



孙国强

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析与运行控制(E-mail: hhusunguoqiang@163.com);

袁智(1991—),男,江苏金湖人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与运行控制(E-mail: yuanzhihu@163.com)。

## Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint

SUN Guoqiang<sup>1</sup>,YUAN Zhi<sup>1</sup>,XU Xiaohui<sup>2</sup>,WANG Chun<sup>2</sup>,WEI Zhinong<sup>1</sup>,ZANG Haixiang<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

**Abstract:** Since both the renewable energy power output of virtual power plant and the electricity price of electric power market have uncertainty factors,their impacts on the bidding affairs of virtual power plant should be deeply researched. The robust optimization approach is used to deal with the uncertainties of wind power output and electricity price and a bidding model based on the robust optimization is built for the virtual power plant,which considers the impact of carbon emission constraint at the same time. The result of case analysis verifies the economics and robustness of the proposed model,demonstrates the effectiveness of robust optimization approach in dealing with the uncertainty parameters and shows the influence of carbon emission constraint on the bidding strategy of virtual power plant.

**Key words:** virtual power plant; uncertainty; robust optimization; carbon emission constraint; models