

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190804

## 激励性含柔性负荷日前市场出清电价机制的建模

顾慧杰<sup>1</sup>, 彭超逸<sup>1</sup>, 许丹莉<sup>1</sup>, 周华锋<sup>1</sup>, 施雄华<sup>2</sup>, 陈根军<sup>2</sup>, 郭超<sup>3</sup>, 谢俊<sup>3</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;  
3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 对于电力市场而言, 发电竞争只是电力改革的初级阶段, 进一步让柔性负荷参与市场竞价是电力市场化的必经之路。传统上采用节点边际电价的日前市场出清电价机制, 理论与实践均证明, 该机制难以同时实现个体理性、激励相容和社会福利最大化等要求。考虑到电力市场成员之间的信息不对称性, 为克服电力市场中市场成员的策略性报价行为, 实现市场的高效运行及社会福利最大化, 基于 VCG 的机制设计理论, 给出了一种考虑发电机组和柔性负荷参与日前市场出清的电价机制, 该机制同时满足激励相容、个体理性以及社会福利最大化要求。最后, 采用某 2 节点系统和修改的 IEEE14 节点系统为例说明了该日前市场出清电价机制的基本特征。

**关键词:** 电力市场; 柔性负荷; VCG 机制设计理论; 日前市场出清; 电价机制; 激励相容; 个体理性; 社会福利最大化

### Research on modeling the incentive electricity pricing mechanism in day-ahead electricity market clearing containing flexible loads

GU Huijie<sup>1</sup>, PENG Chaoyi<sup>1</sup>, XU Danli<sup>1</sup>, ZHOU Huafeng<sup>1</sup>, SHI Xionghua<sup>2</sup>, CHEN Genjun<sup>2</sup>, GUO Chao<sup>3</sup>, XIE Jun<sup>3</sup>  
(1. China Southern Power Grid Dispatching and Control Center, Guangzhou 510623, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Generation side competition is the preliminary stage of the electricity market. Flexible loads participating in market competition are inevitable for electric power industry deregulation. Traditionally, the pricing mechanism of locational marginal price is adopted for day-ahead market clearing. Both theory and practice have proved that it is difficult for the locational marginal price mechanism to simultaneously achieve the requirements of individual rationality, incentive compatibility and maximization of social welfare. Because of the imbalance in information in the electricity market, and in order to overcome the strategic bidding of market participants and realize the high trade efficiency and social welfare maximization, an electricity pricing mechanism for considering generators and flexible loads participating in the day-ahead market clearing is proposed based on VCG mechanism design theory. It meets incentive compatibility, individual rationality, and social welfare maximization simultaneously. Finally, the basic characteristics of the proposed day-ahead market clearing pricing mechanism are demonstrated by the simulation results of a 2-bus system and the revised IEEE14-bus system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1965104).

**Key words:** electricity market; flexible loads; VCG mechanism design theory; day-ahead market clearing; electricity pricing mechanism; incentive compatibility; individual rationality; social welfare maximization

## 0 引言

根据中共中央、国务院发布的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》<sup>[1]</sup>的文件精神, 我国

电力市场改革正在加快进行。早在上个世纪九十年代, 国外许多电力市场就已经实现了从受监管的垄断体制到市场竞争的转变。其中, 以美国 PJM 电力市场、得克萨斯州、加利福尼亚州、纽约州以及新英格兰地区为代表的电力市场引入了节点边际电价 (Locational Marginal Price, LMP)<sup>[2]</sup>。在节点边际电价

机制下, 每个市场成员申报各自的报价, 系统运营商(Independent System Operator, ISO)依据市场成员的报价作出市场出清决策。1990 到 2001 年间, 英国实行联营电力市场。其中, 发电方竞价产生市场出清价格, 需求方只能被动接受, 也即需求侧没有参与市场定价过程。而这样的市场是不完善的, 没有实现负荷侧对市场的响应<sup>[3]</sup>。北欧电力市场<sup>[4]</sup>在日前市场计算系统电价时, 不考虑电网输送容量和阻塞问题, 即系统电价为无约束电价, 且系统电价即为北欧电力日前市场的唯一价格<sup>[5]</sup>。

对于采用节点边际电价出清的电价机制, 理论与实践均证明, 边际电价机制难以促进市场成员申报真实信息, 市场成员存在策略性报价、扩大自身利益的行为, 从而导致市场运行效率降低<sup>[6-7]</sup>。

在电力市场环境下, 市场成员各自的真实信息为私人信息, 并不会轻易对外公开, 这就导致了市场成员之间的信息不对称性。机制设计理论是在自由选择、信息不完全以及决策分散化的环境下, 研究满足社会福利最大化<sup>[8]</sup>(Social Welfare Maximization, SWM)、激励相容(Incentive Compatibility, IC)和参与者个人理性(Individual Rationality, IR)的机制设计理论<sup>[9]</sup>。文献[9]首次应用机制设计理论设计了一种发电竞价机制, 该机制能够激励理性的发电公司申报真实的发电成本报价, 文献[10]进一步考虑了发电公司发电容量成本的合理回收。文献[11]提出了基于电能费用与信息补偿的激励相容电价机制。上述研究中, ISO 均需要向市场成员支付额外的信息补偿成本, 且市场成员特征参数的上下限需要市场监管机构来制定, 导致了公平性纠纷。

在机制设计理论中, VCG(Vickrey-Clarke-Groves)机制是一种激励市场成员披露真实信息的机制设计方法<sup>[12-14]</sup>。VCG 机制按照一个市场成员对其他市场成员的替代效益进行定价。应用 VCG 机制, 文献[13]提出了基于价值公平分配的发电市场电价机制, 定义一台发电机组的价值为该机组对其他机组的替代效益。基于 VCG 的电价机制不需要市场监管机构确定市场成员特征参数的上下限, 不需要额外支付信息补偿成本, 因此不存在公平性纠纷。

文献[15]研究设计了一种使风能聚合商参与风能聚合的利益最大化的结算机制, 该机制基于 VCG 机制, 能够满足激励相容与个体理性, 并激励风能聚合商申报真实信息从而获得最大盈余。文献[16]通过对比 LMP 机制和 VCG 机制下的系统调度总成本和发电机组的结算电价, 得出 VCG 机制下的发电调度成本低于 LMP 机制下的调度成本。文献

[17]改进了原有的标准 AGV 结算机制, 研究设计了一种能够适应市场成员数量变化的结算机制。文献[18]研究设计了一种无需市场储能聚合商提供私人信息的定价机制, 并证明该机制激励聚合商以社会最优决策参与市场结算。然而, 上述文献没有考虑柔性负荷参与日前市场竞价情况。

基于上述考虑, 本文首先建立考虑柔性负荷的日前市场出清模型, 然后, 基于 VCG 机制设计理论, 定义发电机组获得的支付以及柔性负荷应给出的支付为该机组和该柔性负荷参与日前市场出清前后, 系统其他市场成员的发电成本/用电效益的变化量。进一步地, 证明了本文电价机制满足社会福利最大化、激励相容以及个体理性等性质。最后, 以某 2 节点系统和修改的 IEEE14 节点系统为例, 说明了该含柔性负荷日前市场出清电价机制的有效性。

## 1 日前市场出清电价机制

### 1.1 日前市场出清模型

为保证本文结论的一般性, 基于如下假设: ① 忽略网络损耗和无功功率对出清的影响, 本文采用直流潮流模型对日前市场进行出清; ② 考虑单个时段的日前市场出清问题。

考虑一个由  $n$  个节点、 $m$  条线路组成的电力输电网络,  $G$  和  $D$  分别表示参与市场竞标的发电机组集合和柔性负荷集合。因此, 单时段日前市场出清模型如下。

目标函数为

$$W(P_G, P_D) = \max_{P_{G_k}, P_{D_j}} \left( \sum_{j \in D} B(P_{D_j}) - \sum_{k \in G} C(P_{G_k}) \right) \quad (1)$$

式中:  $P_{G_k}$  为节点  $k$  处发电机组  $k$  的有功出力;  $P_{D_j}$  为节点  $j$  处柔性负荷  $j$  的购电功率;  $B(P_{D_j})$  为柔性负荷  $j$  的需求功率为  $P_{D_j}$  时的用电效益;  $C(P_{G_k})$  为发电机组  $k$  出力为  $P_{G_k}$  时的发电成本。

约束条件为

1) 供需平衡约束

$$\sum_{k \in G} P_{G_k} - \sum_{j \in D} P_{D_j} = 0 \quad (2)$$

2) 输电线路容量约束

$$\sum_{i=1}^n F_{li} (P_{G_i} - P_{D_i}) \leq \bar{P}_l^l \quad \forall l \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{li} (P_{G_i} - P_{D_i}) \geq -\bar{P}_l^l \quad \forall l \quad (4)$$

式中:  $F_{li}$  为节点  $i$  对输电线路  $l$  的发电转移分布因

子;  $P_{G_i}$  和  $P_{D_i}$  分别为节点  $i$  处发电机组的发电量和柔性负荷的购电量;  $\bar{P}_l^L$  为线路  $l$  的传输容量。

3) 发电公司出力约束

$$0 \leq P_{G_k} \leq \bar{P}_G \quad \forall k \in G \quad (5)$$

4) 柔性负荷购电约束

$$0 \leq P_{D_j} \leq \bar{P}_D \quad \forall j \in D \quad (6)$$

式中:  $\bar{P}_G$  为发电机组出力的上限;  $\bar{P}_D$  为柔性负荷的购电上限。

根据上述模型, 优化求解即可得到发电机组的出力计划以及柔性负荷的购电计划。

## 1.2 机制设计性质

为分析电价机制的优劣, 机制设计理论基于若干标准化的性质与条件。本文重点关注日前市场出清的社会福利最大化、个体理性以及激励相容。下面分别描述各性质含义。

### 1.2.1 社会福利最大化

社会福利最大化是指通过对日前市场出清优化模型求解, 得到发电机组的出力计划以及柔性负荷的购电计划, 能够达到机组申报真实发电成本以及柔性负荷申报真实用电效益的运行状态。

当所有发电机组申报真实成本, 所有柔性负荷申报真实用电效益时, 日前市场出清模型自动满足社会福利最大化的性质。值得注意的是, 市场成员虚报, 可能导致发电出力计划和柔性负荷购电计划难以实现真实发电成本和用电效益的最优化。

### 1.2.2 个体理性

个体理性, 即为市场成员的参与约束, 是指市场成员参与市场竞标是自愿的。对于满足个体理性的机制, 各发电机组净利润和柔性负荷净效益均不小于零, 否则, 该市场成员(发电机组/柔性负荷)将选择退出市场竞标<sup>[19-20]</sup>。

### 1.2.3 激励相容

激励相容条件要求代理人在委托人设计的机制下得到的期望净效益必须不小于该代理人的机会成本<sup>[20]</sup>。在日前市场出清中, 一种电价机制满足激励相容, 意味着各发电机组申报真实发电成本是其最优选择, 各柔性负荷申报真实用电效益是其最优选择, 而不是策略性申报虚假的发电成本或用电效益, 即市场成员追求个体利益的行为与实现社会福利最大化的市场运行目标相一致<sup>[14,21]</sup>。

## 1.2 节点边际价格机制(LMP)

根据日前市场出清模型, 令  $\lambda_i$  为约束条件式(2)的拉格朗日乘子,  $\mu_i^+$ 、 $\mu_i^-$  为约束条件式(3)、式(4)的拉格朗日乘子, 得到出清模型的拉格朗日函

数<sup>[22-23]</sup>为

$$L = W(P_G, P_D) + \lambda_1 \left( \sum_{k \in G} P_{G_k} - \sum_{j \in D} P_{D_j} \right) + \mu_i^+ \left[ \sum_{i=1}^n F_{li} (P_{G_i} - P_{D_i}) - \bar{P}_l^L \right] - \mu_i^- \left[ \sum_{i=1}^n F_{li} (P_{G_i} - P_{D_i}) + \bar{P}_l^L \right] \quad (7)$$

那么, 节点  $i$  的电价  $\lambda_i^{\text{LMP}}$  为

$$\lambda_i^{\text{LMP}} = -\lambda_1 - \sum_{l=1}^m F_{li} (\mu_l^+ + \mu_l^-) \quad (8)$$

根据该节点电价, 系统运营商支付给节点  $k$  处发电机组  $k$  的费用  $Q_k^{\text{LMP}}$  为

$$Q_k^{\text{LMP}} = \lambda_k^{\text{LMP}} P_{G_k} \quad (9)$$

同时, 节点  $j$  处柔性负荷  $j$  支付给系统运营商的费用  $Q_j^{\text{LMP}}$  为

$$Q_j^{\text{LMP}} = \lambda_j^{\text{LMP}} P_{D_j} \quad (10)$$

在完全竞争的电力市场中, 发电机和柔性负荷作为价格接受者(Price Taker)<sup>[24]</sup>, 其自身申报的电价及电量不会影响系统的边际电价。因此, 在完全竞争市场条件下, 以节点边际电价进行市场出清能够实现社会福利最大化。但是, 电力市场是不完全自由竞争市场, 发电机组和柔性负荷可以策略性竞标, 从而实现改变系统的节点边际电价, 最大化自身利益的目的。

因此, 按照节点边际价格进行市场交易和结算的电力市场难以抑制市场成员的策略性竞标, 不满足激励相容条件, 且无法达到社会福利最大化, 降低了电力市场运行的整体经济效率<sup>[25]</sup>。

## 2 基于 VCG 的电价机制

为激励发电机组申报真实发电成本, 柔性负荷申报真实用电效益, 实现电力市场运行的社会福利最大化, 本文应用VCG机制, 提出日前电力市场出清的激励性电价机制。

### 2.1 VCG机制概述

在机制设计理论中, VCG机制是一种激励市场成员申报真实信息的机制设计方法。应用VCG机制理论, 按照任意一个发电机组对其他发电机组替代效益、任意一个柔性负荷对其他柔性负荷替代效益的贡献进行市场结算。VCG机制消除了各个市场成员的市场力(Market Power), 无论其他市场成员采取何种竞标策略, 每个市场成员自身都能通过申报其

真实发电成本或用电效益,实现各自利益的最大化。

## 2.2 电价机制

一个市场成员的价值为该成员对其他市场成员的替代效益以及对系统整体效益的贡献。在日前市场出清问题中,某一台发电机的价值为该发电机组参与市场出清前后,市场总社会福利的变化量。某一柔性负荷的价值为该柔性负荷参与市场出清前后,市场总社会福利的变化量。

所有发电机组以及柔性负荷按照其价值获得支付。假设 $(P_{G_k}^*, P_{D_j}^*)$ 为出清模型的最优解。

令 $\tilde{W}(P_G, P_D)$ 为所有成员参与系统市场时的社会福利,  $-\tilde{W}_{-k}(P_{G_{-k}}, P_D)$ 为不包含发电机组 $k$ 的新系统市场的社会福利。在本文提出的VCG支付机制下,发电机组 $k$ 的价值,也即发电机组 $k$ 获得的支付为

$$v_k^{\text{VCG}}(P_{G_k}) = -\tilde{W}_{-k}(P_{G_{-k}}, P_D) - \left[ -\tilde{W}(P_G, P_D) - C(P_{G_k}^*) \right] \quad (11)$$

令 $\tilde{W}_{-j}(P_G, P_{D_{-j}})$ 为不包含柔性负荷 $j$ 的新系统市场的社会福利。则在本文提出的VCG机制下,柔性负荷 $j$ 的价值,也即柔性负荷 $j$ 给出的支付为

$$\tilde{v}_j^{\text{VCG}}(P_{D_j}) = \tilde{W}_{-j}(P_G, P_{D_{-j}}) - \left[ \tilde{W}(P_G, P_D) - B(P_{D_j}^*) \right] \quad (12)$$

本文基于VCG机制的电价机制的经济学意义在于,利用市场成员的替代效益进行结算,从而实现市场成员个体利益与市场总体社会福利最大化的一致性。

## 2.3 电价机制性质证明

本节将证明本文电价机制满足激励相容、个体理性以及社会福利最大化等性质。

### 2.3.1 激励相容

#### 1) 发电机组

对于发电机组 $k$ 而言,假设所有负荷均申报真实用电效益,当其他发电机组申报发电成本 $\hat{c}_{-k}$ 时,发电机组 $k$ 可以选择是否申报真实发电成本。若其申报虚假发电成本 $\hat{c}_k$ ,则获得的支付为

$$v_k^{\text{VCG}}(\hat{P}_{G_k}^*, \hat{c}_k) = -\tilde{W}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(\hat{P}_{G_k}^*, \hat{c}_k) \right] \quad (13)$$

式中: $\hat{P}_{G_{-k}}$ 为系统其他发电机组申报 $\hat{c}_{-k}$ 发电成本时,其他发电机组的市场出清电量; $\hat{P}_G$ 为系统所有发电机组的总出清电量; $\hat{P}_{G_k}^*$ 为发电机组 $k$ 申报虚假

发电成本 $\hat{c}_k$ 时的市场出清电量。

若发电机组 $k$ 申报真实发电成本 $c_k$ ,则获得的支付为

$$v_k^{\text{VCG}}(P_{G_k}^*, c_k) = -\tilde{W}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(P_{G_k}^*, c_k) \right] \quad (14)$$

式中, $P_{G_k}^*$ 表示发电机组 $k$ 申报真实发电成本 $c_k$ 时的市场出清电量。

对于任意发电机组,其目标为最大化自身净利润,即该发电机组获得的支付减去该机组自身的发电成本。因此,发电机组 $k$ 虚报发电成本 $\hat{c}_k$ 时,净利润为

$$\begin{aligned} v_k^{\text{VCG}}(\hat{P}_{G_k}^*, \hat{c}_k) - C(\hat{P}_{G_k}^*, c_k) = & \\ & -\tilde{W}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(\hat{P}_{G_k}^*, \hat{c}_k) \right] - \\ & C(\hat{P}_{G_k}^*, c_k) = \tilde{C}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ \sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*) + C(\hat{P}_{G_k}^*, c_k) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\tilde{C}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D)$ 为不包含发电机组 $k$ 的新系统市场的发电机组总成本; $\sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*)$ 为系统包含发电机组 $k$ 时,发电机组 $k$ 虚报发电成本 $\hat{c}_k$ ,市场其他发电机组(即除 $k$ 之外的发电机组)的市场出清总成本。

当发电机组 $k$ 申报真实发电成本 $c_k$ 时,净利润为

$$\begin{aligned} v_k^{\text{VCG}}(P_{G_k}^*, c_k) - C(P_{G_k}^*, c_k) = & \\ & -\tilde{W}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(P_{G_k}^*, c_k) \right] - \\ & C(P_{G_k}^*, c_k) = \tilde{C}_{-k}(\hat{P}_{G_{-k}}, P_D) - \left[ \sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*) + C(P_{G_k}^*, c_k) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*)$ 为系统包含发电机组 $k$ 时,发电机组 $k$ 申报真实发电成本 $c_k$ ,市场其他发电机组(即除 $k$ 之外的发电机组)的市场出清总成本。对于式(15)、式(16),等式右端第一项与发电机组 $k$ 申报的发电成本无关;而 $P_{G_k}^*$ 和 $\hat{P}_{G_f}^*$ ( $f \neq k$ )分别为发电机组 $k$ 申报真实发电成本 $c_k$ ,其他发电机组申报发电成本 $\hat{c}_{-k}$ 时的系统最优出清计划,所以有

$$\sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*) + C(P_{G_k}^*, c_k) \leq \sum_{f \neq k} C(\hat{P}_{G_f}^*) + C(\hat{P}_{G_k}^*, c_k) \quad (17)$$

所以, 发电机组  $k$  申报真实发电成本  $c_k$  获得的净利润不小于虚报时的净利润, 也即

$$v_k^{\text{VCG}}(P_{G_k}^*, c_k) - C(P_{G_k}^*, c_k) \geq v_k^{\text{VCG}}(\hat{P}_{G_k}^*, \hat{c}_k) - C(\hat{P}_{G_k}^*, c_k) \quad (18)$$

## 2) 柔性负荷

对于柔性负荷  $j$  而言, 当其他柔性负荷申报用电效益  $\hat{b}_j$  时, 柔性负荷  $j$  可以选择是否申报真实用电效益。若其虚报用电效益  $\hat{b}_j$ , 则需要给出的支付记为

$$\begin{aligned} \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(\hat{P}_{D_j}^*, \hat{b}_j) &= \tilde{W}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j}) - \\ &\quad \left[ \tilde{W}(P_G, \hat{P}_D) - B(\hat{P}_{D_j}^*, \hat{b}_j) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $\hat{P}_{D_j}$  为系统其他柔性负荷申报用电效益  $\hat{b}_j$  时, 其他柔性负荷的市场出清电量;  $\hat{P}_D$  为系统所有柔性负荷的总出清电量;  $\hat{P}_{D_j}^*$  为柔性负荷  $j$  虚报用电效益  $\hat{b}_j$  时的市场出清电量。

若柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$ , 则需要给出的支付为

$$\tilde{v}_j^{\text{VCG}}(P_{D_j}^*, b_j) = \tilde{W}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j}) - \left[ \tilde{W}(P_G, \hat{P}_D) - B(P_{D_j}^*, b_j) \right] \quad (20)$$

式中,  $P_{D_j}^*$  表示柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$  时的市场出清电量。

对于任意柔性负荷, 其目标为最大化自身净效益, 即该柔性负荷自身的用电效益减去该柔性负荷需要给出的支付量。因此, 柔性负荷  $j$  虚报用电效益  $\hat{b}_j$  时, 净效益为

$$\begin{aligned} B(\hat{P}_{D_j}^*, b_j) - \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(\hat{P}_{D_j}^*, \hat{b}_j) &= \\ \sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*) + B(P_{D_j}^*, b_j) - \tilde{B}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中:  $\sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*)$  为系统包含柔性负荷  $j$  时, 柔性负荷  $j$  虚报用电效益  $\hat{b}_j$ , 市场其他柔性负荷(即除  $j$  之外的柔性负荷)的总用电效益;  $\tilde{B}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j})$  为不包含柔性负荷  $j$  的新系统市场的柔性负荷总用电效益。

当柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$  时, 净效益为

$$\begin{aligned} B(P_{D_j}^*, b_j) - \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(P_{D_j}^*, b_j) &= \\ \sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*) + B(P_{D_j}^*, b_j) - \tilde{B}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中:  $\sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*)$  为系统包含柔性负荷  $j$  时, 柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$ , 市场其他柔性负荷(即除  $j$  之外的柔性负荷)的总用电效益。对于式(21)、式(22), 等式右端最后一项与柔性负荷  $j$  申报的用电效益无关; 而  $P_{D_j}^*$  和  $\hat{P}_{D_h}^*$  ( $h \neq j$ ) 分别为柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$ , 其他柔性负荷申报用电效益  $\hat{b}_j$  时的系统最优出清计划, 所以有

$$\sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*) + B(P_{D_j}^*, b_j) \geq \sum_{h \neq j} B(\hat{P}_{D_h}^*) + B(\hat{P}_{D_j}^*, b_j) \quad (23)$$

所以, 柔性负荷  $j$  申报真实用电效益  $b_j$  时获得的净效益不小于虚报时的净效益, 也即

$$B(P_{D_j}^*, b_j) - \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(P_{D_j}^*, b_j) \geq B(\hat{P}_{D_j}^*, b_j) - \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(\hat{P}_{D_j}^*, \hat{b}_j) \quad (24)$$

由上述证明可知, 无论系统内其他发电机组和柔性负荷申报信息真实与否, 发电机组  $k$  以及柔性负荷  $j$  申报真实的发电成本和真实的用电效益是该机组和该柔性负荷的最优策略。因此, 本文提出的基于VCG的电价机制满足激励相容, 其意义在于: 系统内任一发电机组和柔性负荷的最优策略是申报真实发电成本和用电效益, 虚报将使得该机组和该柔性负荷对其他发电机组和其他柔性负荷的替代效益降低, 从而降低自身发电利润和用电效益。

### 2.3.2 个体理性

2.3.1节证明了在本文基于VCG的电价机制下, 发电机组  $k$  以及柔性负荷  $j$  将申报真实的发电成本和真实的用电效益。以发电机组  $k$  为例, 根据式(16),  $\tilde{C}_{-k}(\hat{P}_{G_k}, P_D)$  等效于在所有发电机组参与的出清模型中, 将发电机组  $k$  的发电值置为0, 即在第1.1节的出清模型中增加  $P_{G_k} = 0$  约束条件。因此, 出清模型优化可行域缩小, 目标函数值不小于所有发电机组参与日前市场出清的目标函数值。即

$$v_k^{\text{VCG}}(P_{G_k}^*, c_k) - C(P_{G_k}^*, c_k) \geq 0 \quad (25)$$

同理, 对于柔性负荷  $j$ , 根据式(22),  $\tilde{B}_{-j}(P_G, \hat{P}_{D_j})$  等效于在所有柔性负荷参与的出清模型中, 将柔性负荷  $j$  的购电量值置为0, 即在第1.1节的出清模型中增加  $P_{D_j} = 0$  约束。因此, 出清模型

优化可行域缩小, 目标函数值不小于所有柔性负荷参与日前市场出清的目标函数值。即

$$B(P_{D_j}^*, b_j) - \tilde{v}_j^{\text{VCG}}(P_{D_j}^*, b_j) \geq 0 \quad (26)$$

所以, 本文提出的基于VCG的日前市场出清电价机制满足个体理性条件。

### 2.3.3 社会福利最大化

由上述证明的激励相容和个体理性可知, 在基于VCG的日前市场出清电价机制下, 发电机组及柔性负荷自愿参与系统日前市场, 并申报真实发电成本及用电效益。因此, 社会福利最大化由第1.1节的日前市场出清模型自动满足。

## 2.4 电价机制实施流程

基于上述对两种电价机制特性的阐述及证明, 本节对两种电价机制的实施流程进行概括, 如图 1。

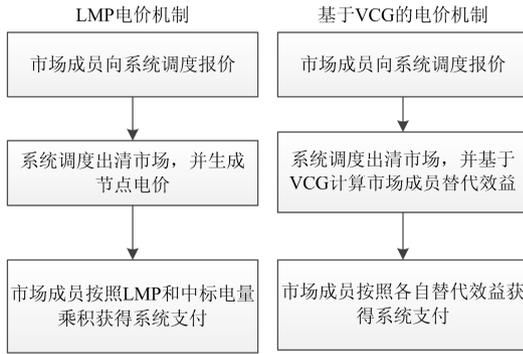


图 1 节点边际电价机制和本文机制的实施流程

Fig. 1 Implementation process of the locational marginal pricing mechanism and the proposed mechanism

由图 1 可知, 本文提出的基于 VCG 的电价机制并未改变传统市场基于报价的交易模式, 只是通过改变结算方式, 满足激励相容原理。因此, 本文的电价机制有效地延续了现有市场交易模式, 具有可操作性和实用性。

## 3 算例分析

本节以某2节点以及修改的IEEE14节点系统为例, 说明本文基于VCG电价机制的特点和有效性, 并对比节点边际电价机制与基于VCG电价机制的差异。

### 3.1 某 2 节点系统

某 2 节点系统如图 2 所示。发电机组 1、2 和 3 的真实边际发电成本函数分别为  $c_1(P_{G,1}) = 1.05P_{G,1} + 17$ 、 $c_2(P_{G,2}) = 2.1P_{G,2} + 25$  以及  $c_3(P_{G,3}) = 1.55P_{G,3} + 20$ ；机组出力约束范围均为  $0 \leq P_{G,k} \leq$

$40 \text{ MW} (k=1,2,3)$ 。节点 1 有 1 个柔性负荷, 节点 2 有 2 个柔性负荷, 各真实边际用电效益分别为  $b_1(P_{D,1}) = -0.4P_{D,1} + 135$ 、 $b_2(P_{D,2}) = -0.8P_{D,2} + 120$  以及  $b_3(P_{D,3}) = -0.5P_{D,3} + 128$ ；需求功率约束均为： $0 < P_{D,j} \leq 50 \text{ MW} (j=1,2,3)$ 。电价单位为美元/MWh, 节点 1 和节点 2 之间线路的输电容量为 10 MW。

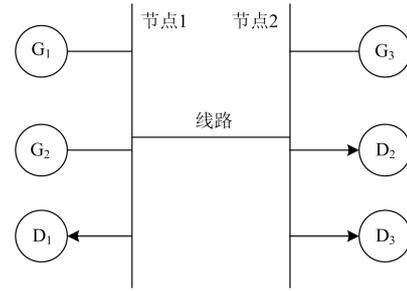


图 2 某 2 节点系统

Fig. 2 A 2-bus power system

#### 3.1.1 节点边际电价

根据式(9)、式(10), 节点1和节点2的LMP分别为  $\lambda_1^{\text{LMP}}$  和  $\lambda_2^{\text{LMP}}$ , 根据该LMP, 系统运营商支付给节点1处发电机组的费用  $Q_{P_{G,1}}^{\text{LMP}}$  为

$$Q_{P_{G,1}}^{\text{LMP}} = \lambda_1^{\text{LMP}} P_{G,1} \quad (27)$$

节点1处柔性负荷1支付给系统运营商的费用  $Q_{P_{D,1}}^{\text{LMP}}$  为

$$Q_{P_{D,1}}^{\text{LMP}} = \lambda_1^{\text{LMP}} P_{D,1} \quad (28)$$

节点 2 处同理。在 LMP 机制下, 若柔性负荷 1、2 和 3 分别申报各自真实用电效益; 且 3 台发电机组均申报真实发电成本, 系统优化调度发电机组 1、2 和 3 出清功率分别为 38.64 MW、17.42 MW 和 26.58 MW; 柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 46.06 MW、10.99 MW 和 25.59 MW; 节点 1 和节点 2 处的电价分别为 98.15 美元/MWh、102.41 美元/MWh; 发电机组 1、2 和 3 的净利润分别为 1 567.9 美元、637.014 6 美元和 1 095.4 美元; 柔性负荷 1、2 和 3 的净用电效益分别为 848.7 美元、96.69 美元和 327.42 美元; 系统总社会福利为 4 615.8 美元。

假设柔性负荷 1、2 和 3 分别申报各自真实边际用电效益  $b_1$ 、 $b_2$  和  $b_3$ ；发电机组 2 申报其真实边际发电成本  $c_2$ ，发电机组 1 和 3 为增加自身获利, 选择保持原边际发电成本  $c_1$  和  $c_3$  的常数项不变, 一次项系数虚报为原来的 1.2 倍, 系统优化调度发电机组 1、2 和 3 出清功率分别为 33.56 MW、18.23 MW 和 22.78 MW; 柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为

41.79 MW、9.53 MW 和 23.25 MW；节点 1 和节点 2 处的电价分别为 101.57 美元/MWh、104.75 美元/MWh；此时，发电机组 1、2 和 3 获得的净利润分别为 1 655.58 美元、697.97 美元和 1 126.27 美元；系统总社会福利为 4 155.7 美元。

假设发电机组 1、2 和 3 均申报真实边际发电成本；柔性负荷 2 申报真实边际用电效益  $b_2$ ，柔性负荷 1 和 3 为增加自身净效益，选择保持原边际用电效益  $b_1$  和  $b_3$  的常数项不变，一次项系数虚报为原来的 1.2 倍，系统优化调度发电机组 1、2 和 3 出清功率分别为 36.56.12 MW、16.38 MW 和 25.81 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 42.94 MW、12.49 MW 和 23.32 MW；节点 1 和节点 2 处的电价分别为 93.76 美元/MWh、100 美元/MWh；此时，柔性负荷 1、2 和 3 获得的净用电效益分别为 1 033.31 美元、125 美元和 381.05 美元；系统总社会福利为 4 397.9 美元。

由此可见，发电机组 1 和 3 通过虚报发电成本，抬高了节点 1 和节点 2 的电价，从而使自身获得了比申报真实边际发电成本时更大的净利润；柔性负荷 1 和 3 通过虚报用电效益，降低了节点 1 和节点 2 的电价，从而使自身获得了比申报真实边际用电效益时更大的净效益。然而，成员虚报发电成本/用电效益下的市场出清偏离了最优市场出清计划，此时系统总社会福利低于市场成员申报真实信息时的系统总社会福利，因此，节点边际电价机制无法实现社会福利最大化。

### 3.1.2 基于 VCG 的电价机制

采用本文提出基于 VCG 的电价机制，下面对发电机组和柔性负荷在该机制下申报真实发电成本和真实用电效益以及虚报时的净收益进行分析。

假设柔性负荷 1、2 和 3 均申报真实用电效益，以发电机组 1 为例。如果发电机组 1 和 3 保持常数项不变，一次项系数虚报为原来的 1.2 倍，发电机组 2 申报真实发电成本，系统优化调度发电机组 1、2 和 3 的出清功率分别为 33.56 MW、18.23 MW 和 22.78 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 41.79 MW、9.53 MW 和 23.25 MW；去掉发电机组 1 后，发电机组 2 和 3 参与日前市场出清，系统优化调度机组 2 和 3 出清功率分别为 21.02 MW 和 25.07 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 27.16 MW、4.2 MW 和 14.73 MW；社会福利值为 2 514.6 美元。根据式(15)，在 VCG 机制下，发电机组 1 的净利润为

$$v_1^{\text{VCG}}(\hat{P}_{G_1}^*, \hat{c}_1) - C(\hat{P}_{G_1}^*, c_1) = -\tilde{W}_{-1}(\hat{P}_{G_1}) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(\hat{P}_{G_1}^*, \hat{c}_1) \right] - C(\hat{P}_{G_1}^*, c_1) = 1877.62 \text{ 美元} \quad (29)$$

相应地，如果发电机组 1 申报真实发电成本，且其余市场成员报价情况同上，系统优化调度机组 1、2 和 3 出清功率分别为 38.64 MW、17.42 MW 和 22.78 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 46.06 MW、9.53 MW 和 23.25 MW；社会福利值为 4 428 美元。根据式(16)，发电机组 1 的净利润为

$$v_1^{\text{VCG}}(P_{G_1}^*, c_1) - C(P_{G_1}^*, c_1) = -\tilde{W}_{-1}(\hat{P}_{G_1}) - \left[ -\tilde{W}(\hat{P}_G, P_D) - C(P_{G_1}^*, c_1) \right] - C(P_{G_1}^*, c_1) = 1913.4 \text{ 美元} > 1877.62 \text{ 美元} \quad (30)$$

所以，发电机组 1 申报真实发电成本时的净利润将大于虚报时的净利润，表明该机制能够激励发电机组申报真实的发电成本。

下面分析柔性负荷在该机制下申报真实用电效益以及虚报时，对其自身净效益的影响。

假设发电机组 1、2 和 3 均申报真实发电成本，柔性负荷 2 申报真实用电效益，柔性负荷 1 和 3 为了提高自身用电净效益，选择保持原边际用电效益  $b_1$  和  $b_3$  的常数项不变，一次项系数虚报为原来的 1.2 倍，系统优化调度发电机组 1、2 和 3 出清功率分别为 36.56 MW、16.38 MW 和 25.81 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 42.94 MW、12.49 MW 和 23.32 MW；去掉柔性负荷 3 后，柔性负荷 1 和 2 参与日前市场出清，系统优化调度发电机组 1、2 和 3 出清功率分别为 33.49 MW、14.84 MW 和 21.72 MW；柔性负荷 1 和 2 出清功率分别为 49.65 MW 和 20.41 MW；社会福利值为 3 888.5 美元。根据式(21)，得到柔性负荷 3 的净效益为

$$B(\hat{P}_{D_1}^*, b_1) - \tilde{v}_1^{\text{VCG}}(\hat{P}_{D_1}^*, \hat{b}_1) = 563.78 \text{ 美元} \quad (31)$$

相应地，如果柔性负荷 3 申报真实用电效益，且其余市场成员报价情况同上，系统优化调度机组 1、2 和 3 出清功率分别为 36.56 MW、16.38 MW 和 26.58 MW；柔性负荷 1、2 和 3 出清功率分别为 42.94 MW、10.99 MW 和 25.59 MW；社会福利值为 4 457.5 美元。依据式(22)，计算得到此时柔性负荷 3 的净效益为

$$B(P_{D_1}^*, b_1) - \tilde{v}_1^{\text{VCG}}(P_{D_1}^*, b_1) = 569 > 563.78 \text{ 美元} \quad (32)$$

由上述分析可见，在本文机制下，市场成员申报真实发电成本和用电效益时，柔性负荷的用电净

效益大于虚报时的用电净效益。

因此，本算例验证了基于 VCG 的电价机制能够激励发电机组申报真实的发电成本，以及激励柔性负荷申报真实的用电效益，因而能够使得系统整体社会福利最大化。

### 3.2 修改的IEEE14节点系统

采用修改的 IEEE14 节点系统，其中，系统中有：5 台发电机组，分别位于 1、2、3、6 和 8 节点；3 个柔性负荷，分别位于 9、13 和 14 节点，修改后的 IEEE14 节点系统如图 3 所示。发电机数据和负荷数据被市场竞标数据替代，不计输电线路电阻，不考虑无功功率。

本算例测试环境为DELL Inspiron 15-7560笔记本电脑，编程软件平台为Matlab R2015b，潮流计算求解器采用Matpower 7.0b1。

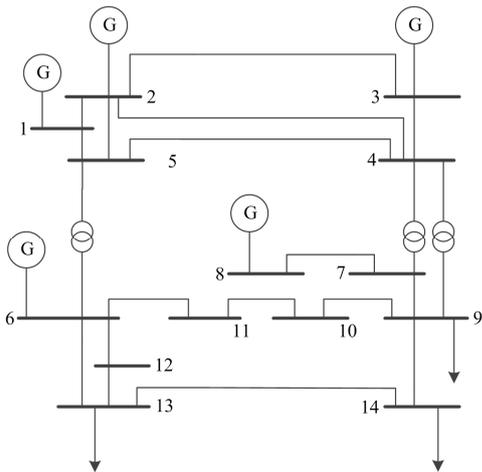


图 3 修改的 IEEE14 节点系统

Fig. 3 Revised IEEE 14-bus power system

根据本文的电价机制，一台发电机组获得的支付定义为该发电机组参与日前市场前后，其他市场成员总发电成本/用电效益的变化；同理，一个柔性负荷给出的支付为该柔性负荷参与日前市场前后，其他场成员总发电成本/用电效益的变化。下面重点分析在修改的 IEEE14 节点系统中，节点 1、2、3、6、8 处的发电机组以及节点 9、13、14 处的柔性负荷最优策略为申报真实的发电成本和用电效益。系统中 5 个发电机组的参数如表 1 所示。

在本文电价机制下，当系统中的发电机组申报真实发电成本，柔性负荷申报真实用电效益时，各个发电机组的发电量、获得的系统支付以及净利润计算结果如表 2 所示。

对于节点 9、13、14 上的柔性负荷，真实用电效益相关参数如表 3 所示。

表 1 修改的 IEEE14 节点系统发电机组参数

Table 1 Parameter of generators in the revised

IEEE 14-bus power system

序号	发电机组 所在节点	发电成本二 次项系数/ (美元/MW <sup>2</sup> )	发电成本一 次项系数/ (美元/MW)	发电出力 上限/MW
①	1	0.022 01	2.2	120
②	2	0.019 25	1.925	115
③	3	0.068 75	1.1	90
④	6	0.009 13	3.575	95
⑤	8	0.027 50	3.3	70

表 2 本文机制下发发电机组申报真实发电成本时的  
发电量、系统支付和净利润

Table 2 Generating capacity, system payment and net profit when  
generators telling the truth in the proposed mechanism

序号	发电机组 所在节点	发电量/ MW	系统支付/ 美元	净利润/ 美元
①	1	120	1 413.80	833
②	2	115	1 334.96	859
③	3	52.571 3	566.84	319
④	6	95	1 042.02	620
⑤	8	70	718.75	353

表 3 修改的 IEEE14 节点系统中柔性负荷参数

Table 3 Parameter of flexible loads in revised

IEEE 14-bus power system

序号	柔性负荷 所在节点	用电效益二 次项系数/ (美元/MW <sup>2</sup> )	用电效益一 次项系数/ (美元/MW)	购电上限/ MW
①	9	-0.125	44	150
②	13	-0.175	58	160
③	14	-0.13	52	170

在本文电价机制下，当系统中的发电机组申报真实发电成本，柔性负荷申报真实用电效益时，各个柔性负荷的购电量、向系统支付的费用以及净用电效益计算结果如表 4 所示。

表 4 本文机制下柔性负荷申报真实用电效益时的  
购电量、向系统的支付和净用电效益

Table 4 Purchasing capacity, payment to the system and  
net benefit when flexible loads telling the truth  
in the proposed mechanism

序号	柔性负荷 所在节点	购电量/ MW	向系统支付 的费用/美元	净用电 效益/MW
①	9	142.685 8	907.97	2 825.3
②	13	141.918 4	906.22	3 800.4
③	14	167.967 1	1 050.41	4 016.2

为验证本文机制满足激励相容，下面分别假设发电机组和柔性负荷在一定比例范围内虚报各自的

发电成本系数及用电效益系数, 结果如图 4 和图 5 所示。

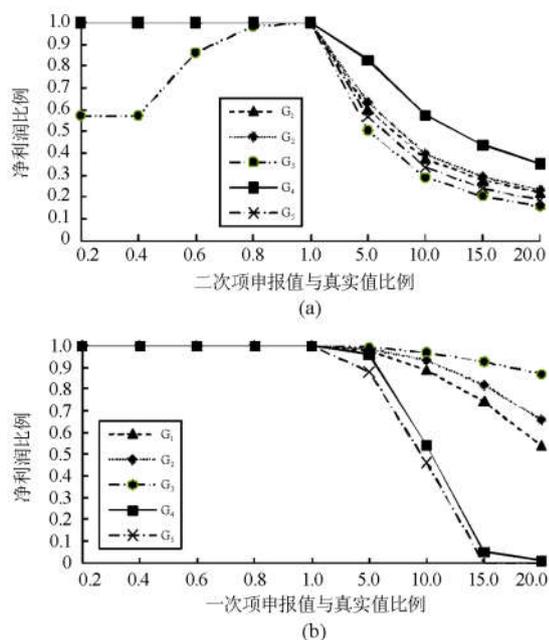


图 4 发电机组申报不同系数下的净利润水平

Fig. 4 Generators' net profit level when telling various coefficients

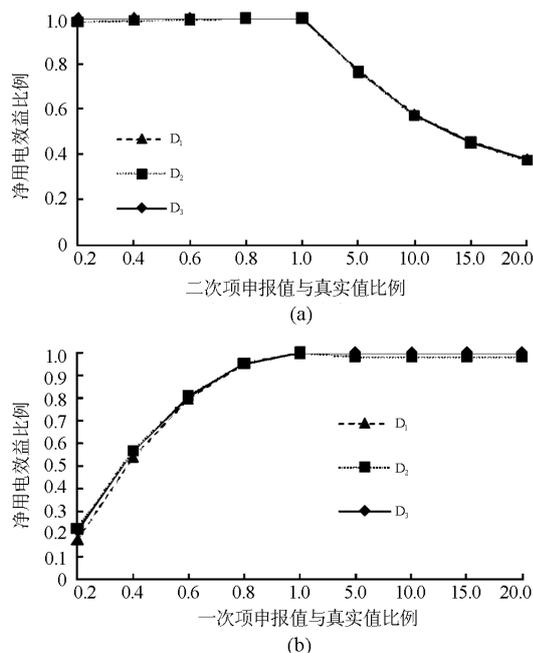


图 5 柔性负荷申报不同系数下的净用电效益水平

Fig. 5 Flexible loads' net benefit level when telling various coefficients

由图 4 可见, 在本文电价机制下, 当发电机组虚报发电成本时, 无论虚报高于还是低于真实报价, 都会使自身净利润减少, 因此申报真实发电成本即

为发电机组的最优策略。

由图 5 可见, 在本文电价机制下, 当柔性负荷虚报用电效益时, 无论低于还是高于真实用电效益, 都会使自身净用电效益减少, 因此, 申报真实用电效益为柔性负荷的最优策略。

## 4 结语

本文提出基于 VCG 的含柔性负荷日前市场出清电价机制, 该电价机制满足激励相容、个体理性以及日前市场出清社会福利最大化的激励性要求。基于某 2 节点和修改的 IEEE14 节点的算例分析表明: 在本文电价机制下, 发电机组和柔性负荷申报真实发电成本和用电效益为最优策略, 即该机制满足激励相容; 参与日前市场的所有发电机组和柔性负荷的净利润及净效益均不小于 0, 即该机制满足个体理性; 该机制满足社会福利最大化的日前市场出清要求。

## 参考文献

- [1] 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 [EB/OL]. [http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129\\_773852.html](http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html).
- [2] WU F, VARAIVA P, SPILLER P, et al. Folk Theorems on transmission access: proofs and counterexamples[J]. *Journal of Regulatory Economics*, 1996, 10(1): 5-23.
- [3] 王兴, 宋永华, 徐贵光. 英国新电力市场模式中的平衡调度机制[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(12): 4-8. WANG Xing, SONG Yonghua, XU Guiguang. The balancing mechanism of the new electricity trading arrangement in UK[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(12): 4-8.
- [4] 孙建平, 戴铁潮. 北欧电力市场发展概况[J]. *华东电力*, 2006, 34(12): 60-65. SUN Jianping, DAI Tiechao. Development analysis of electricity markets in north Europe[J]. *East China Electric Power*, 2006, 34(12): 60-65.
- [5] LATAB N, GRANDE O S, RANDEN H, et al. Experience with the Nord Pool design and implementation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 541-546.
- [6] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [7] ZHAO Jinye, BRERETON B, MONTALVO M. Gaming-based reserve constraint penalty factor analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 616-626.
- [8] 赵晋泉, 胡佳, 王珂, 等. 一种日前发电调度与日前分

- 时电价联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 56-63.
- ZHAO Jinquan, HU Jia, WANG Ke, et al. A joint optimization model of day-ahead generation scheduling and day-ahead time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 56-63.
- [9] SILVA C, WOLLENBERG B F, ZHENG C Z. Application of mechanism design to electric power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 862-869.
- [10] 方勇, 李渝曾. 合理回收容量成本的激励性电力竞价机制的建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 18-23.
- FANG Yong, LI Yuzeng. A research on modeling the incentive electricity bidding mechanism of reasonable capacity cost recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 18-23.
- [11] 谢俊, 陈星莺, 廖迎晨, 等. 激励性输配分开电力市场竞争机制的建模[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 25-31.
- XIE Jun, CHEN Xingying, LIAO Yingchen, et al. Research on modeling the incentive bidding mechanism for transmission and distribution separated electricity markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 25-31.
- [12] CHANG T, NEDIC A, SCAGLIONE A. Distributed constrained optimization by consensus-based primal-dual perturbation method[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(6): 1524-1538.
- [13] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 7-17.
- WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Competitive mechanism design in electricity market based on fair benefit allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7-17.
- [14] 张少华, 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 52-56.
- ZHANG Shaohua, FANG Yong, LI Yuzeng. Incentive mechanism design in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 52-56.
- [15] TANG Wenyuan, RAHUL J. Aggregating correlated wind power with full surplus extraction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6030-6038.
- [16] XU Yunjian, LOW S H. An efficient and incentive compatible mechanism for wholesale electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 128-138.
- [17] WANG Tao, XU Yunjian, AHIPASAOGLU S D, et al. Ex-post max-min fairness of generalized AGV mechanisms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(10): 5275-5281.
- [18] CONTRERAS-OCANA J E, ORTEGA-VAZQUEZ M A, ZHANG Baosen. Participation of an energy storage aggregator in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1171-1183.
- [19] WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, YU Yang, et al. Incentive mechanism for cooperative energy sharing[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 5-10.
- [20] TANG Wenyuan, RAHUL J. Market mechanisms for buying random wind[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1615-1623.
- [21] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
- WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [22] MADRIGAL M. and QUINTANA V. H. Existence and determination of competitive equilibrium in unit commitment power pool auctions: price setting and scheduling alternatives[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 380-388.
- [23] O'NEILL R P, SOTKIEWICZ P M, HOBBS B F, et al. Efficient market-clearing prices in markets with non-convexities[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(1): 269-285.
- [24] CONEJO A J, NOGALES F J, ARROYO J M. Price-taker bidding strategy under price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1081-1088.
- [25] 王正, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑分布式电源节能减排和市场博弈行为的配电网节点电价定价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 124-134.
- WANG Zheng, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Study on LMP pricing method in distribution networks based on energy conservation and emission reduction of DG using market game behavior[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 124-134.

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-10-31

作者简介:

顾慧杰(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力市场; E-mail: guhj@csg.cn

彭超逸(1990—), 男, 博士, 研究方向为电力系统优化, 电力市场; E-mail: pengcy@csg.cn

许丹莉(1987—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为调度自动化。E-mail: xudl@csg.cn

(编辑 许威)