

# 电力市场发电资产虚拟拆分的模式比较

王 晔, 康小宁, 张少华, 李渝曾

(上海大学自动化系电站自动化技术重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 发电资产虚拟拆分一般通过拍卖虚拟发电机组 (Virtual Power Plant, VPP) 来实现, 按 VPP 机组的实际发电调度权来区分, 发电资产虚拟拆分存在金融 VPP 和物理 VPP 两种模式。为了比较研究两种虚拟拆分模式对发电商市场力的影响, 分别建立了考虑金融 VPP 和物理 VPP 的电力市场古诺竞争均衡模型, 并采用非线性互补方法来求解。从理论上证明了在相同拆分数量的情况下, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分比金融 VPP 模式更能降低市场价格。算例仿真进一步表明, 当需求弹性越小时, 物理 VPP 模式的虚拟拆分在降低市场价格方面优于金融 VPP 模式的效果更明显。这意味着对于需求弹性相对较低的电力市场, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分更有利于缓解发电商市场力和提高社会福利。

**关键词:** 电力市场; 市场力; 发电资产虚拟拆分; 物理 VPP; 金融 VPP; 均衡分析

## Comparison of generation assets virtual divestiture modes in electricity markets

WANG Xian, KANG Xiao-ning, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng

(Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Virtual divestiture of generation capacity assets is generally implemented through virtual power plant (VPP) auction. According to the actual dispatch right of the VPPs, virtual divestiture can be categorized into two modes, i.e. financial VPP mode and physical VPP mode. In order to compare the impacts of the two modes of virtual divestiture on generators' market power, the Cournot equilibrium models are established, respectively, for electricity markets with financial VPP and electricity markets with physical VPP. The nonlinear complementarity method is employed to solve these equilibrium models. It is shown theoretically that, given a same volume of virtual divestiture for the two modes, a wholesale market with lower prices can be achieved using the physical VPP mode rather than the financial VPP mode. Furthermore, numerical simulation shows that with decreasing demand elasticity, the effect that the physical VPP mode is superior to the financial VPP mode in lowering the market price will be more remarkable. This means that for electricity markets with relatively low demand elasticity, the virtual divestiture using the physical VPP mode will be more helpful to mitigate generators' market power and improve social welfare than the financial VPP mode.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.70871074).

**Key words:** electricity markets; market power; generation assets virtual divestiture; physical VPP; financial VPP; equilibrium analysis

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0006-06

## 0 引言

20 世纪 90 年代以来, 许多国家为建立高效、竞争的电力市场对电力工业进行了改革。由于电力市场的寡头竞争特性, 以及电力市场上较低的需求价格弹性, 导致发电商具有较强的市场力, 这严重影响电力市场的整体效率和安全可靠性。因此, 如何缓解发电商的市场力滥用行为是电力市场设计和

运行中得到普遍关注的重要问题之一<sup>[1-3]</sup>。理论研究和实践表明, 设置价格上限<sup>[4-6]</sup>、引入远期合同交易<sup>[7-9]</sup>和需求侧报价<sup>[10-12]</sup>, 可以在一定程度上缓解发电商的市场力滥用行为, 但这些措施无法改变电力市场的寡头竞争特性。英国电力市场化改革的实践表明<sup>[13]</sup>, 对现有主导发电商 (Dominant Generator) 进行容量资产实物拆分 (Real Divestiture), 组建新的独立发电公司, 增加参与电力市场竞争的发电商数目, 可以有效缓解发电商市场力滥用行为。但实物拆分存在以下主要问题: ①可能会破坏发电规模

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (70871074); 上海大学“十一五”211 建设项目

经济效益; ②对于发电资产所有权的转移一般是不可逆转的, 因而在政策和操作上会遇到阻力; ③实际操作成本也相对较高。

近年来, 发电资产虚拟拆分(Virtual Divestiture)作为一种灵活、有效的拆分手段在多个欧洲国家中得到了实施<sup>[14]</sup>。虚拟拆分是指发电商出售部分发电容量资产的使用权或经营权, 而不涉及容量资产所有权的转移。由于被拆分的资产所有权仍属该发电商, 因而对购买者而言, 这部分发电容量是虚拟的, 称为虚拟发电机组(Virtual Power Plant, VPP)。虚拟拆分一般通过 VPP 拍卖来实现, 而且 VPP 通常具有一个有效期, 到期后可根据需要, 决定是否再进行虚拟拆分。与实物拆分相比, 虚拟拆分具有操作灵活、易于实现且对发电规模经济性影响较小等优点。按 VPP 发电容量的实际调度权来区分, 发电资产虚拟拆分存在金融 VPP 和物理 VPP 两种模式, 其主要区别在于金融 VPP 的购买者对其购买的 VPP 发电容量没有调度权, 而物理 VPP 的购买者对其购买的 VPP 发电容量具有调度权。

本文首先介绍金融 VPP 模式和物理 VPP 模式的发电资产虚拟拆分。为了比较研究两种虚拟拆分模式对发电商市场力的影响, 分别建立了考虑金融 VPP 和物理 VPP 的电力市场古诺竞争均衡模型, 并从理论上证明了在相同拆分数量的情况下, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分比金融 VPP 模式更能降低市场价格。算例仿真表明了理论模型分析的合理性和有效性。

## 1 发电资产虚拟拆分的两种模式

按 VPP 发电容量的实际调度权来区分, 发电资产虚拟拆分存在金融 VPP 和物理 VPP 两种模式。首先, 这两种虚拟拆分模式存在如下共性: 为了获得 VPP 容量的使用权或经营权, 购买者需要支付给发电商一定的费用, 即 VPP 容量费用(通常由 VPP 拍卖市场确定); 同时, 在 VPP 交易时, 发电商需要对 VPP 确定一个虚拟发电单位成本  $S$  (或称敲定价格), 一旦 VPP 的购买者使用 VPP 发电容量, 需要按敲定价格支付给发电商。一般只有当批发市场价格  $p$  大于敲定价格  $S$  时, VPP 的购买者才会行使 VPP 容量的使用权, 其单位发电量的获利为  $(p-S)$ 。而当  $S$  大于 VPP 的真实发电成本时, 发电商的 VPP 发电量也会获利。当批发市场价格  $p$  小于  $S$  时, VPP 的购买者不会行使 VPP 容量的使用权, 其损失是预先支付的 VPP 容量费用。

其次, 两种虚拟拆分模式存在如下区别: 对于物理 VPP 模式, 其购买者对于 VPP 发电容量的调

度具有决定权, 因此发电商必须预留对应的物理发电容量, 并按 VPP 购买者的要求来调度这部分容量。显然物理 VPP 模式涉及拆分容量的调度权转移, 这与实物拆分类似, 但物理 VPP 模式不涉及拆分容量的所有权转移, 而且由于 VPP 的购买者对于实际调度使用的 VPP 容量, 需要按敲定价格  $S$  给予发电商支付, 因而发电商有可能分享到拆分容量的部分发电收益, 这与实物拆分是不同的。

对于金融 VPP 模式, 其发电调度仍由发电商负责, VPP 的购买者只要求当某时段(1 h)批发市场价格  $p$  大于敲定价格  $S$  时, 收取来自发电商的支付  $k(p-S)$ , 其中  $k$  为 VPP 容量。显然金融 VPP 的购买者不涉及 VPP 容量的调度, 其权利是批发价格较高时可获取 VPP 容量的部分发电收益。与物理 VPP 模式相比, 金融 VPP 拆分模式中发电商可调度的发电容量相对较大。

虚拟拆分的实际操作一般采用管理者组织的定期拍卖的形式, 被拍卖的 VPP 可分为不同种类, 如基荷容量 VPP 和峰荷容量 VPP, 并具有不同的敲定价格。各投标者竞拍某一类 VPP 时, 须提交需要的 VPP 容量数目和容量价格。经过多轮拍卖, 最终确定被拍卖的 VPP 容量价格和赢得拍卖的各投标者的 VPP 容量分配。一般, VPP 的有效期有 3 个月、6 个月、12 个月、24 个月至 36 个月不等, 到期后可根据需要重新拍卖。文献[15]详细介绍了比利时电力公司(Electrabel) VPP 容量拍卖的规则。

## 2 考虑发电资产虚拟拆分的市场均衡模型

### 2.1 模型假设

考虑由  $n$  个发电商按古诺竞争方式参与的批发市场, 各发电商事先在 VPP 拍卖市场中出售一定数量发电容量资产的经营权。发电商  $i$  的成本函数为:

$$C_i(Q_i) = a_i Q_i + 0.5b_i Q_i^2 \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  为发电商  $i$  的发电出力;  $a_i$ ,  $b_i$  为大于零的成本系数。

在 VPP 有效期内的某一时段  $T$  (1 h), 批发市场的逆需求函数为:

$$p = c - \xi \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

式中:  $p$  为市场价格;  $c$  和  $\xi$  均为大于零的常数。

假设在 VPP 拍卖市场中, 各个发电商均以混合 VPP 容量的形式出售, 即每一份 VPP 中包含具有不同敲定价格的 VPP 容量(基荷容量和峰荷容量)。各个发电商出售的 VPP 数量(份数)给定为  $k_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。在每一份 VPP 中, 假设敲定价格  $S$  连续变化, 每一份 VPP 随敲定价格  $S$  变化的累积容

量值  $\phi(S)$  表示为:

$$\phi(S) = \lambda S \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为大于零的常数。

### 2.2 考虑金融 VPP 的市场均衡模型

在金融 VPP 模式的虚拟拆分假设条件下, 发电商  $i$  需要支付给 VPP 购买者的补偿费用为:

$$v(k_i) = \int_0^\infty \max\{p - S, 0\} \cdot k_i d\phi(S) = 0.5k_i\lambda p^2 \quad (4)$$

假设每份金融 VPP 的容量价格为  $f$ , 则发电商  $i$  出售  $k_i$  份金融 VPP 所获得的收益为:

$$k_i f - v(k_i) = k_i(f - 0.5\lambda p^2) \quad (5)$$

各个发电商在批发市场上的决策问题可以描述为:

$$\forall i, \text{Maximize}_{Q_i} \pi_i = pQ_i - C_i(Q_i) + k_i(f - 0.5\lambda p^2) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}$$

式中:  $\pi_i$  表示发电商  $i$  的利润;  $Q_i^{\max}$  和  $Q_i^{\min}$  分别表示发电商  $i$  的最大和最小发电出力。

利用式 (1)、式 (2), 可得到发电商  $i$  决策问题的一阶最优 (KKT) 条件为:

$$c - a_i + k_i \xi \lambda c - (\xi + b_i) Q_i - (\xi + \lambda k_i \xi^2) \sum_{j=1}^n Q_j + \mu_{1i} - \mu_{2i} = 0 \quad (7)$$

$$\mu_{1i} \geq 0, Q_i - Q_i^{\min} \geq 0, \mu_{1i}(Q_i - Q_i^{\min}) = 0 \quad (8)$$

$$\mu_{2i} \geq 0, Q_i^{\max} - Q_i \geq 0, \mu_{2i}(Q_i^{\max} - Q_i) = 0 \quad (9)$$

式中,  $\mu_{1i}$ 、 $\mu_{2i}$  为对应于发电商出力约束的拉格朗日乘子。采用非线性互补方法<sup>[16]</sup>, 引入非线性互补函数  $\psi(\alpha, \beta) = \alpha + \beta - \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ , 可将互补条件式 (8)、式 (9) 转化为如下等式条件:

$$\psi(\mu_{1i}, Q_i - Q_i^{\min}) = 0 \quad (10)$$

$$\psi(\mu_{2i}, Q_i^{\max} - Q_i) = 0 \quad (11)$$

通过联立各发电商决策问题的一阶最优条件, 形成一个非线性方程组并求解, 可以得到考虑金融 VPP 时批发市场竞争的发电商均衡发电出力  $Q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和均衡价格  $p$ 。

### 2.3 考虑物理 VPP 的市场均衡模型

在物理 VPP 模式的虚拟拆分中, 发电商  $i$  在批发市场上的发电出力包括发电商自身调度的中标量  $q_i$  和由 VPP 购买者实际调度使用的 VPP 容量  $q_{vi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。由式 (3) 可得:

$$q_{vi} = k_i \int_0^p d\phi(S) = k_i \lambda p \quad (12)$$

因此, 发电商  $i$  在批发市场上的发电出力为:

$$Q_i = q_i + q_{vi} = q_i + k_i \lambda p \quad (13)$$

VPP 的购买者对于实际调度使用的 VPP 容量,

需要按敲定价格  $S$  给予发电商  $i$  的支付为:

$$u(k_i) = k_i \int_0^p S d\phi(S) = 0.5k_i \lambda p^2 \quad (14)$$

各发电商在批发市场的决策问题可描述为:

$$\forall i, \text{Maximize}_{q_i} \pi_i = p q_i + u(k_i) - C_i(Q_i) + k_i f \quad (15)$$

$$\text{s.t. } q_i \geq 0,$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}$$

利用式 (1)、(2)、(12)、(13)、(14), 可以获得发电商  $i$  决策问题的一阶最优 (KKT) 条件:

$$\frac{\partial p}{\partial q_i} q_i + [p - a_i - b_i(q_i + k_i \lambda p) + \mu_{1i} - \mu_{2i}] \cdot (1 + k_i \lambda \frac{\partial p}{\partial q_i}) + \mu_{3i} = 0 \quad (16)$$

$$\mu_{1i} \geq 0, q_i + k_i \lambda p - Q_i^{\min} \geq 0, \mu_{1i} \cdot (q_i + k_i \lambda p - Q_i^{\min}) = 0 \quad (17)$$

$$\mu_{2i} \geq 0, Q_i^{\max} - q_i - k_i \lambda p \geq 0, \mu_{2i} \cdot (Q_i^{\max} - q_i - k_i \lambda p) = 0 \quad (18)$$

$$\mu_{3i} \geq 0, q_i \geq 0, \mu_{3i} \cdot q_i = 0 \quad (19)$$

式中:  $\mu_{1i}$ 、 $\mu_{2i}$  为对应于发电商发电出力约束的拉格朗日乘子;  $\mu_{3i}$  为对应于发电商自身投标量约束的拉格朗日乘子。

与上节类似, 采用非线性互补方法求解该均衡问题, 可获得考虑物理 VPP 时批发市场竞争的发电商均衡投标量  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和均衡价格  $p$ , 进而可以得到批发市场的发电商均衡发电出力  $Q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。

## 3 两种虚拟拆分模式对批发市场价格的影响比较

本节将从理论上证明, 当不考虑发电商的出力约束时, 在相同拆分数量的情况下, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分比金融 VPP 模式更能降低批发市场价格。

### 3.1 金融 VPP 模式拆分下的批发市场价格

若不考虑发电商的出力约束, 由式 (7) 可得考虑金融 VPP 时发电商  $i$  决策问题的一阶 KKT 条件为:

$$c - a_i + k_i \xi \lambda c - (\xi + b_i) Q_i - (\xi + \lambda k_i \xi^2) \sum_{j=1}^n Q_j = 0 \quad (20)$$

由式 (2) 和式 (20), 可以得到发电商  $i$  的批发市场均衡发电出力的表达式为:

$$Q_i = \frac{(1 + k_i \xi \lambda) p - a_i}{\xi + b_i} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (2) 并化简, 可以获得金融

VPP 拆分模式下的批发市场均衡价格为:

$$p = \frac{c + \sum_{i=1}^n \xi a_i / (\xi + b_i)}{1 + \xi \lambda \sum_{i=1}^n k_i + \sum_{i=1}^n \xi (1 - k_i b_i \lambda) / (\xi + b_i)} \quad (22)$$

由式(22)易于看出, 引入金融 VPP 会降低批发市场价格。

### 3.2 物理 VPP 模式拆分下的批发市场价格

将式(13)代入式(2), 可以得到考虑物理 VPP 时批发市场价格  $p$  的表达式为:

$$p = (c - \xi \sum_{i=1}^n q_i) / (1 + \xi \lambda \sum_{i=1}^n k_i) \quad (23)$$

若不考虑发电商的出力约束, 将式(23)对  $q_i$  求导后代入式(16)可得:

$$\frac{-\xi q_i}{1 + \xi \lambda \sum_{j=1}^n k_j} + (p - \gamma_i) \left(1 - \frac{k_i \lambda \xi}{1 + \xi \lambda \sum_{j=1}^n k_j}\right) + \mu_{3i} = 0 \quad (24)$$

式中,  $\gamma_i = a_i + b_i(q_i + k_i \lambda p) = a_i + b_i Q_i$ , 表示发电商  $i$  的边际发电成本。

由式(24)、(19)可知:

①若  $\gamma_i < p$ , 则有  $q_i > 0$ ,  $\mu_{3i} = 0$ , 从而有

$$\frac{-\xi q_i}{1 + \xi \lambda \sum_{j=1}^n k_j} + (p - \gamma_i) \left(1 - \frac{k_i \lambda \xi}{1 + \xi \lambda \sum_{j=1}^n k_j}\right) = 0 \quad (25)$$

②若  $\gamma_i > p$ , 则  $\mu_{3i} > 0$ ,  $q_i = 0$ 。

③若  $\gamma_i = p$ , 则  $\mu_{3i} = 0$ ,  $q_i = 0$ 。

由于在寡头竞争市场中, 市场价格一般大于发电商的边际成本。以下仅考虑  $\gamma_i < p$  的情况(对于其他情况, 也可用同样的思路证明)。由式(25)可以得到发电商  $i$  在批发市场上的均衡投标量为:

$$q_i = \frac{[(1 - k_i b_i \lambda)p - a_i] \left(1 + \xi \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^n k_j\right)}{\xi + b_i \left(1 + \xi \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^n k_j\right)} \quad (26)$$

将式(26)代入式(23), 可得物理 VPP 拆分模式下的批发市场均衡价格为:

$$p = \frac{c + \sum_{i=1}^n \frac{\xi a_i x_i}{\xi + b_i x_i}}{1 + \xi \lambda \sum_{i=1}^n k_i + \sum_{i=1}^n \frac{\xi (1 - k_i b_i \lambda) x_i}{\xi + b_i x_i}} \quad (27)$$

式中,  $x_i = 1 + \xi \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^n k_j$ 。

### 3.3 两种拆分模式下的批发市场价格比较

比较式(22)和式(27), 可以发现, 当取  $x_i = 1$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 时, 物理 VPP 拆分模式下的批发市场均衡价格表达式(27)与金融 VPP 拆分模式下的批发市场均衡价格表达式(22)相同。因此, 两种拆分模式下的批发市场均衡价格可统一用式(27)表示, 其中, 当  $x_i = 1$  时, 表示金融 VPP 拆分模式;

当  $x_i = 1 + \xi \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^n k_j$  时, 表示物理 VPP 拆分模式。

将式(27)表示的均衡价格  $p$  视为  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的一个多元函数, 考虑到物理 VPP 拆分模式下的  $x_i$  大于金融 VPP 拆分模式下的  $x_i$ , 若有  $\partial p / \partial x_i < 0$ , 则根据多元函数的有限增量公式<sup>[17]</sup>可知, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分比金融 VPP 模式更能降低批发市场价格。

令  $X = 1 + \xi \lambda \sum_{i=1}^n k_i$ , 将式(27)对  $x_i$  求偏导数得:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\xi^2 / (\xi + b_i x_i)^2}{\left[X + \sum_{j=1}^n \frac{\xi (1 - k_j b_j \lambda) x_j}{\xi + b_j x_j}\right]^2} \left[ a_i X + a_i \sum_{j=1}^n \frac{\xi (1 - k_j b_j \lambda) x_j}{\xi + b_j x_j} - c(1 - k_i b_i \lambda) - (1 - k_i b_i \lambda) \sum_{j=1}^n \frac{\xi a_j x_j}{\xi + b_j x_j} \right] \quad (28)$$

考虑到  $\gamma_i = a_i + b_i(q_i + k_i \lambda p) < p$ , 即有

$$(1 - b_i k_i \lambda) p > a_i \quad (29)$$

将式(27)代入式(29)得:

$$a_i X + a_i \sum_{j=1}^n \frac{\xi (1 - k_j b_j \lambda) x_j}{\xi + b_j x_j} < c(1 - k_i b_i \lambda) + (1 - k_i b_i \lambda) \sum_{j=1}^n \frac{\xi a_j x_j}{\xi + b_j x_j} \quad (30)$$

由于式(28)中第1项大于0, 由式(30)可知, 式(28)第2项小于0, 从而得到  $\partial p / \partial x_i < 0$ 。

## 4 算例分析

考虑有3个发电商(G1~G3)的电力批发市场, 发电商的成本系数如表1所示, 批发市场逆需求函数中的参数取值为  $c = \$80.0/\text{MWh}$ ,  $\xi = \$1.0/(\text{MW})^2 \text{h}$ 。各个发电商事先出售的 VPP 数量(份数)  $k_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 如表1所列。每份 VPP 容量累积分布函数中的系数  $\lambda = 0.5$ 。假设3个发电商的最大发电出力限制均为40 MW; 最小发电出力限制均为0 MW。

表2给出了金融 VPP 和物理 VPP 拆分模式下的批发市场均衡结果。与金融 VPP 模式相比, 采用物理 VPP 模式的虚拟拆分可获得较低的市场价格和较大的社会福利, 即物理 VPP 模式的虚拟拆分,

其缓解发电商市场力的效果优于金融 VPP 模式。

表 1 发电商数据

Tab.1 Data of generators

发电商	$a_i / (\$/MWh)$	$b_i / (\$/ (MW)^2 h)$	$k_i$
G1	12.0	1.0	0.630
G2	10.0	1.5	0.461
G3	8.0	2.0	0.3765

表 2 不同拆分模式下批发市场均衡结果

Tab.2 Equilibrium results for different modes of virtual divestiture

		金融 VPP	物理 VPP
市场价格/	(\$/MWh)	36.400	35.417
社会福利/	(\$/h)	1 645.032	1 649.998
发电商	G1	17.933	18.348
发电出力/	G2	13.916	14.247
MW	G3	11.751	11.987
发电商	G1	276.770	261.337
利润/	G2	222.143	209.888
(\$/h)	G3	195.642	184.965

为了研究电力需求弹性对结果的影响，取市场需求函数为  $D(p)=80-ep$ ，其中参数  $e$  越大，表示需求弹性越大。

图 1 给出了金融 VPP 和物理 VPP 拆分模式下，批发市场均衡价格随弹性参数  $e$  变化的曲线。可以看出，当需求弹性相对较小时，物理 VPP 模式的虚拟拆分，在降低市场价格、提高社会福利方面优于金融 VPP 的效果更明显。这意味着在低需求弹性的电力市场中，与金融 VPP 模式相比，在缓解发电商市场力的效果方面，采用物理 VPP 模式的虚拟拆分具有较明显优势。

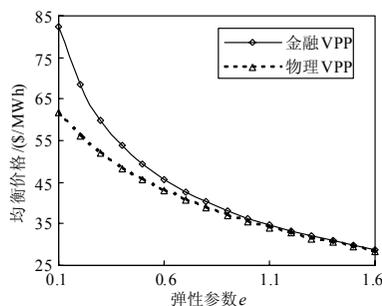


图 1 不同拆分模式下市场价格随需求弹性的变化曲线

Fig.1 Market price vs. demand elasticity for different modes of virtual divestiture

## 5 结论

发电资产的虚拟拆分是电力市场环境下一一种具

有良好可操作性、灵活性和应用前景的拆分方式。本文针对两种虚拟拆分模式，即金融 VPP 模式和物理 VPP 模式，比较研究了发电资产虚拟拆分的不同模式对发电商市场力的影响，分别建立了考虑金融 VPP 和物理 VPP 的电力市场古诺竞争均衡模型，并从理论上证明了在相同拆分数量的情况下，采用物理 VPP 模式的虚拟拆分比金融 VPP 模式更能降低批发市场价格。算例仿真验证了理论模型的合理性和有效性，并表明当需求弹性相对较小时，物理 VPP 模式的虚拟拆分，在降低市场价格、提高社会福利方面优于金融 VPP 的效果更明显。这意味着对于当前需求弹性相对较低的电力市场，与金融 VPP 模式相比，采用物理 VPP 模式的虚拟拆分在缓解发电商市场力、增加社会福利的效果方面，将具有较明显优势。

## 参考文献

- [1] David A K, Wen F. Market power in electricity supply[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(4): 352-360.
- [2] 张宇波, 罗先觉, 邹晓松, 等. 发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23.  
ZHANG Yu-bo, LUO Xian-jue, ZOU Xiao-song, et al. Generation market power and the influence of bilateral trade on it[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 18-23.
- [3] 王建辉, 刘伟, 王良友. 电力市场中市场力与管制问题研究[J]. 继电器, 2004, 32(5): 1-6.  
WANG Jian-hui, LIU Wei, WANG Liang-you. Study on market power and surveillance in power market[J]. Relay, 2004, 32(5): 1-6.
- [4] 康建伟, 周浩. 电力市场合理价格上限之确定[J]. 继电器, 2005, 33(9): 6-8, 49.  
KANG Jian-wei, ZHOU Hao. Setting reasonable price cap in electricity market[J]. Relay, 2005, 33(9): 6-8, 49.
- [5] 周浩, 熊祥鸿, 张富强. 电力市场下的电价上限设定模型[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 24-30.  
ZHOU Hao, XIONG Xiang-hong, ZHANG Fu-qiang. A study on price cap setting model in electricity market[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 24-30.
- [6] Anderson E J, Hu X. Supply function equilibrium in electricity spot markets with contracts and price caps[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2005, 124(2): 257-283.
- [7] 王 晔, 张少华, 李渝曾. 计及输电约束的电力远期与

- 现货市场联合均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (22) : 54-59.
- WANG Xian, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng. Joint equilibrium analysis for electricity forward and spot markets with transmission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (22) : 54-59.
- [8] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑远期合同及环路潮流约束的电力市场均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17) : 8-12, 23.
- WANG Rui-qing, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. On equilibrium in electricity markets considering forward contracts and loop flow constraints[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17) : 8-12, 23.
- [9] Anderson E J, Hu X. Forward contracts and market power in an electricity market[J]. International Journal of Industrial Organization, 2008, 26 (3) : 679-694.
- [10] 谭亲跃, 王少荣, 程时杰. 电力需求侧管理 (PDSM) 综述[J]. 继电器, 2005, 33 (17) : 79-84.
- TAN Qin-yue, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Survey on power demand side management[J]. Relay, 2005, 33 (17) : 79-84.
- [11] 王 晔, 李渝曾, 张少华. 考虑跨时段负荷响应的电力市场多时段均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (20) : 33-38.
- WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Multi-period equilibrium analysis of electricity markets with cross-time response of load demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (20) : 33-38.
- [12] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求侧响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3) : 97-106.
- ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3) : 97-106.
- [13] Baldick R, Grant R, Kahn E. Theory and application of linear supply function equilibrium in electricity markets[J]. Journal of Regulatory Economics, 2004, 25 (2) : 143-167.
- [14] Weigt H, Neumann A, von Hirschhausen C. Divestitures in the electricity sector: conceptual issues and lessons from international experiences[J]. The Electricity Journal, 2009, 22 (3) : 57-69.
- [15] Belpex. Electrabel virtual power plant capacity auctions: general context for the VPP auctions[EB/OL]. <http://www.belpexvpp.be>. 2006.
- [16] WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [17] 菲赫金哥尔茨. 数学分析原理[M]. 第一卷, 第一、二分册. 吴亲仁, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1959: 262-263.

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-05-20

作者简介:

王 晔 (1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力市场均衡分析研究; E-mail: xianwang@shu.edu.cn

康小宁 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力市场风险管理研究;

张少华 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场风险管理、博弈分析等研究。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- Northeast Electric Power Design Institute. Electrical engineering high voltage transmission line design handbook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [10] 程慕尧. 架空输电线路导线换位及绝缘地线运行方式的优化方案[J]. 中国电力, 2000, 33 (1): 57-58.
- CHENG Mu-yao. Optimization of conductor transposition and configuration of insulated ground wire on overhead transmission line[J]. Electric Power, 2000, 33 (1): 57-58.

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-05-25

作者简介:

徐习东 (1966-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xxd@zju.edu.cn

黄旭聪 (1987-), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: cshxc2006@126.com

王 全 (1987-), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护。