

电力市场发电资产虚拟拆分的建模与应用

王晔, 康小宁, 张少华

(上海大学 自动化系, 上海市 闸北区 200072)

Modeling of Virtual Divestiture of Generation Assets in Electricity Market and Its Application

WANG Xian, KANG Xiaoning, ZHANG Shaohua

(Department of Automation, Shanghai University, Zhabei District, Shanghai 200072, China)

ABSTRACT: The divestiture of generation assets is a manner to mitigate Genco's market power in electricity markets. In view of its advantages such as flexible to operate, easy to implement and low impact on economy of generation scale, at present divestiture of generation capacity assets has been practically utilized in many countries. The authors analyze the approach to implement virtual divestiture of generation assets. Virtual divestiture behavior is similar to the trading of option contract, thus by use of the equilibrium theory of electricity market the competitive equilibrium model for wholesale market and as well as the competitive equilibrium model for financial virtual power plant (VPP) trading market are built. The effectiveness of the proposed virtual divestiture of generation assets is verified by the result of numerical examples. Some practically meaningful conclusions are derived and highlighted.

KEY WORDS: electricity market; virtual divestiture of generation assets; virtual power plant (VPP); market power

摘要: 发电资产拆分是缓解电力市场发电商市场力的一种重要手段, 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, 并已在多个国家得到实际应用。分析了发电容量资产虚拟拆分方法, 虚拟拆分为类似于期权合同交易, 因而采用电力市场均衡建模思想建立了批发市场的竞争均衡模型和金融 VPP 交易市场的竞争均衡模型。算例结果验证了发电资产虚拟拆分模型的有效性。

关键词: 电力市场; 发电资产虚拟拆分; 虚拟发电机组; 市场力

0 引言

世界各国的电力工业市场化改革实践表明, 电力市场具有寡头竞争特性, 需求价格弹性较低易导

致发电商在电力批发市场具有较强的市场力, 严重影响电力市场的经济效率和安全可靠。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普遍关注的重要问题^[1-3]。

在电力批发市场中设置价格上限^[4-6]、引入远期合同交易^[7-9]和需求侧报价^[10-12]可在一定程度上缓解发电商的市场力滥用行为, 但该类措施无法改变发电市场的寡头竞争特性(即真正参与竞争的发电商数目不变)。根据经济学原理, 高效的竞争市场通常需要足够多的市场参与者(包括买方和卖方), 从该角度来说, 增加参与电力市场竞争的具有相当市场份额的发电商数目是提高市场效率的有效途径之一。对现有规模较大的主导发电商进行容量资产拆分, 组建新的独立发电公司参与市场竞争, 可有效缓解发电商市场力问题^[13]。英国在电力市场发展过程中曾 2 次进行发电容量资产的拆分, 明显降低了市场价格, 提高了电力市场的竞争程度^[13-14]。发电容量资产拆分模式涉及发电容量资产所有权的转移, 并称其为发电资产的实物拆分。

实物拆分虽然可以有效提高电力市场效率, 但存在以下主要问题: 1) 实物拆分可能会破坏发电规模经济效益; 2) 实物拆分对于发电资产所有权的转移一般是不可逆转的, 因而其在政策和操作上会遇到阻力; 3) 实物拆分的实际操作成本相对较高。

与实物拆分不同, 近年来出现了虚拟拆分^[13], 其拆分对象为发电容量资产的使用权或经营权, 不涉及容量资产所有权的转移。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, 并已在多个国家特别是欧洲国家得到实际应用。为此, 本文将分析发电容量资产虚拟拆分的建模, 并以金融 VPP 为例分析其应用效

基金项目: 国家自然科学基金项目(70871074)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (70871074).

果,为研究资产虚拟拆分对电力市场效率的影响提供参考。

1 发电容量资产虚拟拆分

虚拟拆分是指发电商“卖出”其部分发电容量资产的使用权或经营权,但不涉及资产所有权的转移,由于被拆分的资产所有权仍属该发电商,对购买者而言这部分发电容量是虚拟的,并假设该部分容量由虚拟发电机组(virtual power plant, VPP)提供。虚拟拆分一般通过 VPP 拍卖来实现,而且 VPP 通常具有有效期,到期后可根据需要决定是否再进行虚拟拆分。

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, VPP 交易时发电商需要确定虚拟发电单位成本 S (或称敲定价格),一旦 VPP 的购买者使用 VPP 发电容量,则需要按敲定价格支付给发电商相关费用。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 真实发电成本时,发电商的 VPP 发电量也会获利。当 p 小于 S 时, VPP 的购买者不会行使 VPP 容量的使用权,其损失为预先支付的 VPP 容量费用。

发电容量资产虚拟拆分存在 2 种方式:

1) 物理 VPP。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该部分容量。显然物理 VPP 涉及拆分容量的调度权转移,这与实物拆分类似。但物理 VPP 不涉及拆分容量的所有权转移,且发电商有可能分享拆分容量的部分发电收益,这与实物拆分是不同的。

2) 金融 VPP。其发电调度仍由发电商负责, VPP 购买者只要求当某时段批发市场价格 p 大于 S 时,收取来自发电商的支付费用 $k(p-S)$, 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 相比,金融 VPP 对于发电商的发电规模经济性影响相对较小,但由于发电商可调度的发电容量相对较大,因而在缓解发电商市场力方面的效果可能相对减弱。

虚拟拆分已在多个欧洲国家得到实际应用^[13]。规模较大的虚拟拆分实践始于法国电力公司,至

2002 年该公司共拆分了 5 GW 发电容量。比利时也是开展虚拟拆分较早的国家,至 2003 年共拆分了 1.2 GW 发电容量,而且采用了类似金融 VPP 的拆分方式。荷兰采用类似物理 VPP 的虚拟拆分方式,至 2005 年已达到 0.2 GW 的拆分规模。2006 年西班牙政府要求 2 家主导发电商从 2007 年夏天开始通过拍卖方式向西班牙电力市场参与者提供 VPP 容量。另外丹麦和捷克等国家都实施了规模不等的发电容量虚拟拆分。

虚拟拆分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。VPP 的有效期由 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 VPP 容量拍卖的规则。

以上分析表明,发电资产虚拟拆分是电力市场环境下具有良好可操作性、灵活性和应用前景的拆分模式,但还需通过模型化方法研究虚拟拆分对电力市场效率的影响以及发电商能否自愿选择对其发电容量资产进行虚拟拆分等重要问题。

2 虚拟拆分建模

2.1 金融 VPP 虚拟拆分

VPP 交易类似于看涨期权交易,其中 VPP 容量价格相当于该期权的权利金(或期权价格),VPP 敲定价格(或 VPP 虚拟生产成本)相当于该期权的敲定价格。因而可采用结合期权交易的电力市场均衡建模思想^[16-18]来对发电资产虚拟拆分进行模型化研究。本节将分析金融 VPP 方式的虚拟拆分理论模型。

假设发电商可参与 2 个市场竞争,即金融 VPP 拍卖市场和 VPP 有效期内的批发市场。考虑有 n 个发电商,则发电商 $i(i=1,2,\dots,n)$ 的发电成本为

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

式中: q_i 为发电商 i 的发电出力; a_i 和 b_i 为大于 0 的成本系数。

在 VPP 有效期内 T 时段的批发市场逆需求函数为

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

式中： p 为 T 时段的批发市场价格； c 和 ζ 为大于 0 的常数。

在 VPP 拍卖市场中，各发电商均出售混合 VPP 容量，即每份 VPP 容量包含具有不同敲定价格的 VPP 容量(如基荷容量和峰荷容量)。为方便处理，假设敲定价格 S 连续变化，每份 VPP 随敲定价格 S 变化的累积容量值 $\phi(S)$ 为

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

式中 λ 为大于 0 的常数。式(3)意味着每份 VPP 中不同敲定价格对应的 VPP 容量是均匀变化的。

假设发电商 i 在 VPP 拍卖市场中出售了 k_i 份金融 VPP 容量，则 T 时段发电商 i 支付给 VPP 购买者的费用为

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

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

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

2.2 批发市场的竞争均衡模型

假设 T 时段发电商按古诺模式进行批发市场竞争，在给定各发电商的 VPP 交易量的情况下，确定各发电商的发电出力。各发电商在批发市场的决策问题可描述为

$$\max \pi_i = p q_i - C_i(q_i) + k_i (f - 0.5 \lambda p^2) \quad (6)$$

约束条件为

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

式中： π_i 为发电商 i 的利润； q_i^{\max} 和 q_i^{\min} 分别为发电商 i 的最大和最小发电出力。利用式(1)(2)可获得发电商 i 决策问题的一阶最优条件：

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

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

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

式中 μ_{1i} 、 μ_{2i} 为对应于发电出力约束的拉格朗日乘子。采用非线性互补方法^[19]引入非线性互补函数 $\psi(\alpha, \beta) = \alpha + \beta - \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ ，可将式(8)(9)的互补条件转化为如下等式条件：

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

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

在给定各发电商的 VPP 交易量 $k_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的情况下，可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，进而可获得 T 时段批发市场的发电商均衡发电出力 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和均衡价格 p 。显然批发市场的均衡结果均与 k_i 有关，其隐函数关系包含在批发市场均衡模型的一阶最优条件(即式(7)(10)(11))中。

2.3 金融 VPP 交易市场的竞争均衡模型

假设在金融 VPP 交易市场中发电商也按古诺模式进行竞争，各发电商决定其出售金融 VPP 的份数 k_i 。假设 VPP 的容量价格满足无套利条件，即每份金融 VPP 的容量价格 f 等于其购买者在批发市场上获得的期望支付，由式(4)可得 $f=0.5 \lambda p^2$ 。考虑到批发市场的均衡解 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 p 与 k_i 的隐函数关系包含在批发市场均衡模型的一阶最优条件中，因此发电商在 VPP 交易市场中的竞争均衡问题可以表述为

$$\max \pi_i = p q_i - C_i(q_i) \quad (12)$$

约束条件为

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

式中 k_i^{\max} 和 k_i^{\min} 分别为发电商 i 在金融 VPP 交易市场中出售的最大和最小 VPP 份数限制。一阶最优条件同式(7)(10)(11)。

对于均衡问题(12)的求解，可先获得各发电商决策问题的一阶最优条件，然后采用非线性互补方法^[19]将其互补条件转化为等式条件，再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，即可获得批发市场中各发电商的均衡发电出力 q_i 、均衡价格 p 以及 VPP 交易市场中各发电商出售的均衡 VPP 份数 k_i 。

3 算例分析

本文算例中电力市场有 3 个发电商($G_1 \sim G_3$)，假设每个发电商最大出力限制均为 20 MW，最小出力限制均为 0，每份金融 VPP 的容量累积分布函数中 $\lambda=0.5$ ，对 3 个发电商在金融 VPP 交易市场中的交易量暂不作限制。假设 T 时段的批发市场逆需求函数中的参数为 $c=80$ USD/MW·h， $\xi=2$ USD/(MW)²h。各发电商的成本系数如表 1 所示。表 2 给出了考虑金融 VPP 交易的市场均衡结果，并与无 VPP 交易

表 1 发电商的成本参数

Tab. 1 Cost parameters of generators

发电商	a_i /(USD/MW·h)	b_i /(USD/(MW) ² h)
G_1	21.0	0.8
G_2	19.0	1.0
G_3	17.0	1.2

表2 均衡结果比较

Tab. 2 Comparison of the equilibrium results

交易类型	发电出力/MW			总发电 出力/MW	VPP交易量/份			利润/(USD/h)			批发价格/ (USD/MW·h)	社会福利/ (USD/h)
	G ₁	G ₂	G ₃		G ₁	G ₂	G ₃	G ₁	G ₂	G ₃		
无 VPP 交易	6.554	6.784	6.985	20.324	—	—	—	—	—	—	39.352	758.083
考虑金融 VPP 交易	7.572	7.913	8.180	23.665	0.292	0.308	0.322	103.106	115.062	126.860	32.670	790.359

时的均衡结果进行了比较。由表 1—2 可知,发电商的金融 VPP 交易可以降低批发市场价格,增加社会福利,可明显提高电力市场效率;在发电商之间不存在默契勾结的情况下,即使与各发电商都不参与 VPP 交易时相比其利润受损,市场竞争也会使发电商自愿参与金融 VPP 形式的虚拟拆分。以上分析可对采用金融 VPP 形式的虚拟拆分来缓解发电商的市场力具有理论指导意义。

为了研究电力需求弹性对金融 VPP 交易量的影响,取市场需求函数为 $D(p)=40-ep$, 其中系数 e 越大表示需求弹性越大。各发电商的成本系数相同, $a_i=20$ USD/MW·h, $b_i=1$ USD/(MW)²h。图 1 给出了发电商的金融 VPP 交易量随需求弹性系数 e 变化的曲线,由图 1 可知,金融 VPP 交易量随需求弹性的减小而增大,表明对于当前需求弹性相对较低的电力市场,金融 VPP 形式的虚拟拆分具有较为现实的可行性。

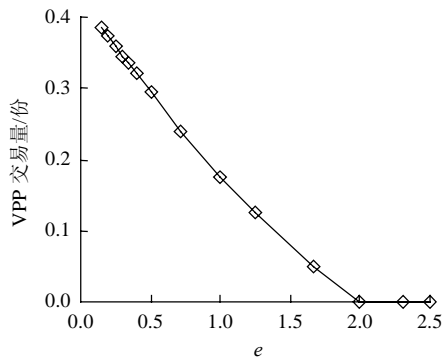


图1 需求弹性对金融 VPP 交易量的影响
Fig. 1 Impacts of demand elasticity on financial VPP volume

4 结论

1) 发电容量资产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模式。发电容量资产虚拟拆分可以降低批发市场价格,增加社会福利,具有明显的缓解发电商市场力、提高电力市场效率的效果。

2) 在发电商之间不存在默契勾结的情况下,市场竞争会使发电商自愿参与虚拟拆分,而且对于当前需求弹性相对较低的电力市场,发电资产虚拟

拆分具有较为现实的可行性。

3) 目前,考虑输电网络约束的发电资产虚拟拆分建模还有待进一步深入研究。

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[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23.
Zhang Yubo, Luo Xianjue, Zou Xiaosong, et al. Generation market power and the influence of bilateral trade on it[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 18-23(in Chinese).
- [3] 甘德强, 王建全, 胡朝阳. 联营电力市场的博弈分析: 单时段情形[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 71-76.
Gan Deqiang, Wang Jianquan, Hu Zhaoyang. Auction games in pool-based electricity markets: single-period case[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 71-76(in Chinese).
- [4] 杨争林, 曹荣章, 朱为民, 等. 基于市场供需关系和经济滞留评估的市场限价方法[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 152-159.
Yang Zhenglin, Cao Rongzhang, Zhu Weimin, et al. Study on price cap based on economic withholding and supply-demand relationship [J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 152-159 (in Chinese).
- [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 Xianghong, Zhang Fuqiang. A study on price cap setting model in electricity market[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 24-30(in Chinese).
- [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] 袁智强, 刘东, 蒋传文, 等. 考虑远期合约基于古诺模型的市场参与者策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 72-76.
Yuan Zhiqiang, Liu Dong, Jiang Chuanwen, et al. Study on cournot model based market participants' strategies considering forward contracts[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 72-76(in Chinese).
- [8] 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 Shaohua, Li Yuzeng. Joint equilibrium analysis for electricity forward and spot markets with transmission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 54-59(in Chinese).
- [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] 李辉, 康重庆, 夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模

- 型[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 1-6.
- Li Hui, Kang Chongqing, Xia Qing. Price based decision making for demand side management considering customer satisfaction index[J]. Power System Technology. 2004, 28(23): 1-6(in Chinese).
- [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 Yuzeng, Zhang Shaohua. Multi-period equilibrium analysis of electricity markets with cross-time response of load demand [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 33-38 (in Chinese).
- [12] 张钦, 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 Qin, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106(in Chinese).
- [13] Weigt H, Neumann A, Von H C. Divestitures in the electricity sector: conceptual issues and lessons from international experiences[J]. The Electricity Journal, 2009, 22(3): 57-69.
- [14] 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.
- [15] Belpex. Electrabel virtual power plant capacity auctions: general context for the VPP auctions[EB/OL]. [2006-01-01] . <http://www.belpexvpp.be>.
- [16] Willems B. Cournot competition, financial option markets and efficiency[R]. California: University of California, 2004.
- [17] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑期权合约的电力市场古诺-纳什均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 83-88.
- Wang Ruiqing, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. Analysis of Cournot-Nash equilibrium for electricity markets considering options contracts[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 83-88(in Chinese).
- [18] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑期权合约的发电厂商竞标策略[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 80-84.
- Wang Ruiqing, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. Bidding strategies of power producers with option contracts[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 80-84(in Chinese).
- [19] Wang Xian, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.



王晔

收稿日期: 2010-03-12。

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。

(编辑 徐梅)