

# 市场环境下容量补偿机制对投资的影响分析

秦绪彬, 邹斌

(江南大学通信与控制工程学院自动化系, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对市场环境下的发电机组投资问题, 构建了一个市场环境下发电机组静态投资的智能代理仿真模型, 基于该模型讨论了英国容量费补偿模式和两部制定价方法对发电机组投资的影响。结果表明, 英国容量费方法对发电容量投资的刺激作用非常有限, 而两部制电价方法对投资的激励作用平稳而有效, 但是明显存在过投资的危险。发电容量补偿方法对于发电容量投资的刺激作用不仅仅取决于补偿量的大小, 同时也取决于补偿的对象与途径, 有关容量补偿问题还需要进一步研究。

**关键词:** 电力市场; 发电容量充裕性; 智能代理; 容量补偿; 电价

## Impact of capacity compensating methods on generation investment

QIN Xu-bin, ZOU Bin

(Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China.)

**Abstract:** In this paper, an agent-based simulation model of static investment in the market circumstance is developed according to the problem of generation investment in the market. It discusses the impact of the British capacity compensation model and the two-step pricing method on generation investment. The results show that the British capacity compensation method has limited influence on generation capacity, and the inspiration of the two-step pricing method on investment is smooth and effective, but it will cause over-investment. The influences of capacity compensating methods on the investment will not only depend on capacity compensation, but also depend on how to be compensated and how to compensate, so how to choose suitable capacity compensation needs further study.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60574051).

**Key words:** electricity market; generation capacity abundant; agent-based; capacity compensation; electricity prices

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)14-0022-06

## 0 引言

西方电力工业的改革过程中, 人们普遍认为引入市场竞争、促进电力工业生产效率的主要途径来自长期投资效率的提高<sup>[1]</sup>。上世纪90年代开始的西方电力市场改革实践表明, 交易市场电价的波动极其剧烈, 存在着两个看起来相互矛盾的现象: 一方面当竞争激烈的时候电价偏低, 迫使许多发电机组提前退役; 另一方面当发电容量相对短缺时, 普遍发生了发电机组实施市场力, 电价飞升的状态<sup>[2]</sup>。在能量市场之外, 对发电机组进行容量补偿, 保证发电容量的充裕性, 是稳定电力市场的一个重要措施。

目前有许多国家的电力市场都采取了容量补偿措施, 比较著名的方法有英国早期市场的容量费方法, 美国以 PJM 市场为代表的容量市场方法。我国根据《国务院关于印发电力体制改革方案的通知》

(国发[2002]5号)文件的精神, 将采用两部制电价, 其中包含了对发电机组采用容量补偿的过程。本文的工作就是构造一个基于智能代理仿真的市场环境下的投资模型, 分析英国容量费方法, 两部制方法对长期投资的影响。具体分析包含如下两个方面: 在分散的投资条件下采用边际电价以及不同的容量补偿方法是否可以保证发电容量的充裕性, 另一个问题则为不同的容量补偿对于新投资机型的类型是否有明显的影响。

本文的具体组成: 第一部分对市场环境的投资问题的背景进行了讨论, 介绍了容量补偿方法的具体内容以及目前研究的情况; 第二部分则介绍了基于智能代理仿真的投资模型; 第三部分介绍了基于文献[3]的数据仿真结果。最后给出了相关的结论。

## 1 问题的背景

### 1.1 传统投资模型与市场环境下的投资模型

发电机组的投资在传统的体制下是由电力公司根据未来的负荷需求预测, 根据投资成本与运行成

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574051)

本之和的总成本最小进行投资规划的。其约束条件中最重要的约束就是必须保证面对未来的负荷提供足够的电力供应。根据文献[4]的模型, 在传统体制下, 一个静态的发电机组规划是使用负荷持续曲线表示未来的年负荷需求, 每个机组  $i$  的运行成本为  $b_i$  (\$/MWh), 而如果这个机组是新的机组, 则其单位投资成本 (包含了利率) 表示为  $c_i$  (\$/MW), 这时的投资模型就可表示为:

$$\min TC = \sum_{i=1}^n (c_i x_i + b_i Q_i) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n x_i \geq L^m \quad (2)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$x_i \leq x_i^{\max}, \quad i \in I_1 \quad (4)$$

$$Q_i \leq \bar{Q}_i, \quad i \in I_2 \quad (5)$$

式中:  $x_i$  表示机组  $i$  的发电容量, 单位 MW, 是模型的决策变量;  $Q_i$  是机组  $i$  全年的期望生产电量, 单位 MWh, 其计算方式为  $Q_i = \int_{D_i}^{D_i^{\max}} L(z) dz$ , 其中  $L(z)$  是持续负荷曲线, 而  $D_1 = 0$ ,  $D_i = \sum_{j=1}^{i-1} x_j$  表示机组按照运行成本排出的最优加载序的容量, 如图 1 所示;  $L^m$  表示持续负荷的最大负荷;  $x_i^{\max}$  表示现存机组的最大容量;  $I_1$  表示所有现存机组的集合;  $I_2$  表示所有机组为水电机组的集合;  $\bar{Q}_i$  表示水电机组的最大发电量。

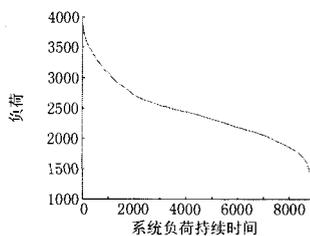


图 1 未来需求负荷持续曲线

Fig.1 Load duration curve

模型 (1) ~ (5) 作为典型的投资规划模型, 式 (1) 是目标函数, 表示总成本 (包含运行成本与投资成本) 最小化; 式 (2) 表示必须满足的未来负荷需求; 式 (3) 是非负约束, 发电机组的容量必须大于等于零; 式 (4) 表示所有现存火电机组的容量不能够大于其最大的容量; 式 (5) 则表示水电机组的发电量受到库容的限制不能够超过最大的发电量。

如果电力公司能够完全按照这个模型进行投资, 应该说的确可以达到长期的最优化运行。但在

传统的体制下, 由于发电机组的投资几乎没有风险地完全转化为消费者的风险 (过投资引起的损失通过电价转嫁给了消费者), 通常会出现过投资情况。这种情况表明实际投资偏离了这个模型的解。本文将不对这个问题展开讨论, 而是将这个模型看成是一个标准的结果。这个模型的结果表示最经济的满足长期需求的投资结果。在理想的条件下, 模型 (1) ~ (5) 的解必然也是电力市场环境下的最优投资结果。下文将此结果与不同容量补偿机制下的机组投资结果做比较, 考察后者是否能达到理想的投资结果。

在市场环境下, 发电机组的投资将由投资人根据自身利益最大化的原则, 根据市场电价等信息决定投资时间与投资量。对于一般的商品市场, 微观经济学理论认为只要交易市场能够保证公平的竞争, 市场会自动达到长期的平衡。但是, 对于电力市场而言, 由于电力系统的运行要求及时的供需平衡, 而且电力需求的短期价格弹性几乎为零, 发电机组的建设需要较长的建设周期, 而且这种投资属于资金密集, 不可逆投资, 使得在分散投资的环境下, 发电机组的投资是否能够满足未来负荷需求的要求成为了人们关注的问题, 即所谓的容量充裕性问题。

文献[3]构造了一个静态的分散投资模型讨论寡头与垄断情况的投资量的关系, 其没有考虑容量补偿的影响而仅仅包含了能量市场。文献[5]对加州电力市场使用系统动力学的方法进行了讨论, 包含了电力交易市场以及投资, 结果表明根据市场信号的发电容量的投资具有周期性的波动, 这种发电容量投资的波动会引起容量充裕性的波动, 结果引发交易市场电价的波动, 这个研究的结果几乎是预言了加州电力市场有可能因为容量短缺形成价格飞升的危机。这个研究是针对有关发电机组建设延迟的影响, 文献[6]也构造了一个动力学模型, 与文献[5]不同的是不仅仅针对加州市场规则。在未来负荷增加很快的情况下, 分散的投资是否保证长期的容量充裕性该文提出了疑问。文献[7]则考虑了电价的不确定性对投资可能产生的延迟。

为了缓解长期容量充裕性问题, 人们提出了一些措施, 例如容量补偿方法, 在能量交易市场之外对发电容量进行补偿, 以便吸引足够多的投资。另外就是采用可靠性合同或者期权等金融手段平缓容量投资的波动性<sup>[8]</sup>。本文主要关注容量补偿的影响。

## 1.2 容量补偿机制

人们普遍认可维持发电容量的充裕性对于能量市场的稳定具有重要意义, 对发电容量进行补偿有

必要。但是在如何进行补偿以及补偿量的大小上不同的地区则采用了不同的方法。目前已经提出的容量补偿方法有英国容量费方法, PJM 的容量责任制方法, 两部制方法<sup>[9]</sup>。

上述三种容量补偿的主要特点描述在表 1 中。其中英国容量费方法的补偿是计算出来的, 具体的计算公式为:

$$R_{\text{capacity}}^{\text{UK}} = (R_{\text{VOLL}} - R_{\text{SMP}}) P_{\text{LOLP}} \quad (6)$$

式中:  $R_{\text{capacity}}^{\text{UK}}$  表示英国的半小时容量补偿费, 其他符号同前。 $P_{\text{LOLP}}$  小时的系统失负荷概率;  $R_{\text{VOLL}}$  失负荷价值。

容量责任制是由系统运行人员根据负荷大小指定了容量市场总的需求量, 然后由市场竞争决定容量的价格。两部制定价的容量补偿费是政府制定的, 并以年为单位对所有机组进行补偿, 记为  $R_{\text{capacity}}^{\text{low}}$ ,

单位为\$/MW 年。

人们对容量补偿机制的研究主要关注其短期的影响。文献[10]对英国容量费方法对交易市场的研究表明, 容量费方法有可能刺激发电厂采用容量滞留策略谋利, 文献[11]则给出了英国容量费方法在基于成本的条件下具有合理性的严格证明, 并采用智能代理仿真的方法得到了与文献[10]相同的结论。容量市场方法与能量市场独立运行, 但是这个方法的基础至今没有得到令人信服的说明, 通常人们认为它在带来了交易市场稳定的同时, 也使得长期的投资结果会与传统的情况一样, 存在过投资风险<sup>[12]</sup>。而两部制方法对容量的补偿本质上是一种行政方法。从目前的文献看, 容量补偿机制对投资的影响还很少, 本文将采用智能代理仿真方法对容量补偿的长期影响进行分析。

表 1 容量补偿方法总结

Tab. 1 Capacity compensation methods

容量补偿的方法	规则描述	使用地区
容量费方法	所有的机组, 只要其参加竞价, 无论其是否中标, 都可以获得容量补偿费; 容量补偿费与能量市场联系在一起, 按照小时的系统失负荷概率以及失负荷价值确定, 具体计算见公式 (6)	英国, 1990 年~2001 年
容量责任制	所有负荷在容量市场购买指定量的发电容量。一般负荷要购买的量是负荷最大负荷的 15%; 购买的价格则通过容量市场来决定。如果负荷实体没有购买到其容量责任要求的容量, 则面临按照惩罚价格购买不足的容量	PJM 市场
两部制	能量市场采用统一出清定价方法, 并且能量的销售采用市场竞争的模式; 对所有的机组按照容量进行容量补偿, 补偿的量由政府确定。	中国电力改革文件指定的定价方法

## 2 基于智能代理仿真的投资模型

### 2.1 基本的投资模型

设市场中有  $n$  个不同类型的机组进行投资竞争。机组  $i$  现存的数量为  $N_i$  个, 在目标年的最大的投资机组数为  $M_i$  个。每类机组的投资目标是在目标年其总收入最大化, 即在目标年的销售收入减去运行成本与投资成本最大化。表示为公式就是:

$$\max_{0 \leq U_i \leq M_i} \pi_i = \sum_{j=1}^{8760} (\rho_j \times Q_{ij}) - \sum_{j=1}^{8760} (b_i \times Q_{ij}) - c_i \times U_i \times x_i + B_i \quad (7)$$

式中:  $U_i$  表示机组  $i$  投资的台数,  $c_i$  表示机组  $i$  的投资成本年金;  $\rho_j$  表示时段  $j$  的边际电价;  $Q_{ij}$  表示机组  $i$  在时段  $j$  的生产电量;  $B_i$  表示发电容量的补偿。

模型 (7) 中, 补偿费用  $B_i$  根据不同的补偿方法得到: 如果采用容量费方法, 则计算每个小时的 LOLP, 指定 VOLL 然后按照公式 (6) 计算补偿费,

如果是按照两部制方法则在确定了单位容量的年补偿额  $R_{\text{capacity}}^{\text{low}}$  后, 将其与容量相乘得到补偿。如果没有容量补偿, 则为零。

模型 (7) 中时段  $j$  的边际电价  $\rho_j$ , 以及每个机组的生产电量  $Q_{ij}$  并不完全由自己确定, 而是在所有机组确定以后, 按照边际电价的方法确定。

假设机组按照其成本申报运行成本  $b_i$ , 及其最大的可用容量, 这个容量在本模型中采用机组类型的总容量, 记为  $y_i$ 。按照边际定价方法, 其上网的电量按照运行成本最小化得到。也即对时段  $j$ , 负荷水平为  $L_j$ , 按照如下模型确定机组的生产电量:

$$\min_{x_i} \sum_{i=1}^n b_i \times Q_{ij} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n x_i \geq L_j \quad (9)$$

$$x_i \geq 0 \quad (10)$$

$$x_i \leq y_i \quad (11)$$

而这个时段的边际电价为这个模型的 K-T 条件决定。为：

$$\rho_j = b_i + \lambda_{ij} \quad (12)$$

式中： $\lambda_{ij}$  是约束 (11) 对应的 K-T 乘子。

容易看出每类机组各自的投资模型 (7)，以及运行模型 (8) ~ (11) 构成了一个博弈模型，每个成员的实际收益不仅仅与自身的决策有关还同其他人的决策有关。该博弈模型没有考虑在能量市场中发电厂商的策略行为，所有的运行状态都以成本为基础。该模型主要是考虑了在采用边际电价以及容量补偿的情况下，分散的按照自身利益最大化进行的投资情况，其核心问题是这样的分散投资是否可以保证长期的容量充裕性，以及最后的机组有机构成的差异。

### 2.2 智能代理仿真模型

上述博弈模型的解析求解非常困难，本文构造了一个智能代理仿真模型进行讨论。智能代理仿真使用具有有限理性的和自适应的 Agent 表示各个市场成员，并通过个体的 Agent 在计算机上进行交互作用（即仿真）获得市场运行的特征描述，而不是使用解析的数学模型求解的方法。

智能代理仿真中的每个 Agent 具有自己的策略集合，并且策略集合中的每个策略都有一个选择概率，其选择具体策略的方法是按照轮盘赌的方式根据选择概率从策略集合中进行选择。然后根据市场规则计算其收益，并根据收益修改策略的选择概率（也称为学习），再进行策略选择如此重复，直到最后的选择概率收敛到 1。显然，使用智能代理算法的关键是学习算法。综合文献[13,14]的理论结果，文献[15]提出了一种修改的 Roth-Erev 学习算法，本文采用这个学习算法。

本文构造的发电机组投资的智能代理仿真系统中，用 Agent 代表一个机组类型  $i$ ，其策略空间是投资机组  $i$  的台数，这是一个整数变量。策略集合表示为

$$A_i = \{0, 1, \dots, M_i\} \quad (13)$$

这个策略集合中的元素 0，表示不投资，元素 1 表示投资 1 台机组，最多投资  $M_i$  台。

智能代理仿真总的来说是三个步骤：第一步：初始化：给发电机组类型  $i$  的策略集合中的每个策略赋予相同的选择概率。例如，机组类型  $i$  的策略集合有  $S+1$  个策略，则每个策略的选择概率为  $1/(S+1)$ 。第二步：当所与的机组都确定了投资机组的台数以后，按照模型 (8) ~ (11) 确定机组的

产电量，以及式 (12) 确定边际电价；第三步：按照式 (7) 确定机组的总利润，然后根据这个利润修改机组的策略的选择概率。也即进行学习。本文的学习算法采用修改的 Roth-Erev 学习算法。

学习依据机组利润与平均利润之差，首先根据利润计算学习效用，即

$$R_i = \pi_i - \bar{\pi}_i \quad (14)$$

$$\bar{\pi}_i = \frac{\sum_{n=1}^{iter} \pi_i(n)}{iter} \quad (15)$$

式中： $R_i$  为机组类型  $i$  的学习效用； $\bar{\pi}_i$  为机组类型  $i$  的平均利润； $iter$  表示迭代的次数； $\pi_i(n)$  表示机组类型  $i$  在第  $n$  轮的利润，由式 (7) 计算。

根据学习效用在保证选择概率不变的前提下，确定每轮的初始倾向。即

$$S_i'(n) = K_{step} \cdot |R_{i,s}| \quad (16)$$

$$q_{i,j}(n) = P_{i,j}(n-1) \cdot S_i'(n), j=1, 2, \dots, S \quad (17)$$

式中： $q_{i,j}(n)$  表示机组类型  $i$  进行第  $n$  次学习前对行为  $j$  经过规范化处理后的倾向； $S_i'(n)$  表示机组类型  $i$  第  $n$  次迭代前规范化处理后的总倾向； $P_{i,j}(n-1)$  表示机组类型  $i$  第  $n-1$  次迭代以后采用行为  $j$  的选择概率； $K_{step}$  表示规范系数，一般取 20~100。

表 2 机组数据

Tab.2 Data of generator unit

机组类型	最大容量 /MW	现存台数	最大新增台数	单位运行成本 /\$ · (MWh) <sup>-1</sup>	容量成本年金 /\$ · (MW) <sup>-1</sup>
Nuclear	650	1	0	4	
coil	650	1	2	10	17839.4
oil1	350	1	4	20	12642.3
oil2	300	2	0	30	
gas turtine1	200	0	6	40	10189.6
gas turtine2	200	1	0	50	

表 3 最经济投资的结果

Tab.3 Result of the market

机组类型	最优容量/MW	新增容量/MW
Nuclear	650	0
Coil	1000	350
oil1	1750	1400
oil2	600	600
gas turtine1	0	0
gas turtine2	0	0

设机组类型  $i$  采用行为  $s$ ，得到学习效用  $R_{i,s}$ ，则

其新的行为选择概率可如下计算:

$$E_n(i, j, R_i(s)) = \begin{cases} R_{i,s} & \text{if } j = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$q_{i,j}(n+1) = q_{i,j}(n) + E_n(i, m, j, R_i(s)) \quad (19)$$

$$P_{i,j}(n+1) = q_{i,j}(n+1) / \sum_{l=1}^S q_{i,l}(n+1) \quad (20)$$

式中:  $E_n(i, j, R_i(s))$  表示机组类型  $i$  的倾向修改量;  $q_{i,j}(n)$ : 机组类型  $i$  采取行为  $j$  的规范化倾向;  $q_{i,j}(n+1)$ : 学习修改后的倾向;  $P_{i,j}(n+1)$ : 更新后的行为选择概率。

有关这个学习算法的理论讨论本文不进行更加详细的说明, 有兴趣的读者见文献[15]。

### 3 仿真结果及其分析

以文献[3]的数据为基础, 使用本文给出的智能

代理仿真模型对不同的容量补偿机制下的机组的投资进行了讨论。其中机组投资的类型, 机组的运行成本以及容量成本如表 2 所示。其中现存台数已经是安装的机组的台数, 最大新增台数是可以增加的最大的该类型的机组台数。目标年的持续负荷曲线如图 1 所示, 最大的负荷为 4 000 MW, 年负荷总电量为 2 140 964 MWh。

表 3 给出了模型 (1) ~ (5) 给出的投资结果, 这个结果表示最经济情况下的投资情况, 此时可以满足电力需求, 同时也使得总成本最小化。此时原来的老机组 gas turbine2 机组由于运行成本过高退役, 而新投入的机组类型从表 3 可以看出为化石燃料与燃油机组。

表 4 给出了不进行补偿、按照英国容量费方法进行补偿以及两部制补偿的结果:

表 4 仿真结果

Tab.4 The result of the simulation according

英国容量费方法的结果							两部制方法的结果						
失负荷价值	运行费用	投资费用	补偿费用	总费用	新装机容量	备用率	单位容量年补偿费	运行费用	投资费用	补偿费用	总费用	新装机容量	备用率
/\$ \cdot (MWh)^{-1}	/\$	/\$	/\$	/\$	/MW	/(%)	/\$ \cdot (MW)^{-1}	/\$	/\$	/\$	/\$	/MW	/(%)
50	236250000	17426220	19469000	273145220	3650	-8.75%	0	235100000	15388300	0	250488300	3450	-13.75%
120	236250000	17426220	27730666	281406886	3650	-8.75%	1	236250000	17426220	8760000	262436220	3650	-8.75%
150	236250000	17426220	41596000	295272220	3650	-8.75%	1.5	235360000	27615820	28908000	291883820	4650	16.25%
250	236250000	17426220	58407000	312083220	3650	-8.75%	2	229010000	30408510	44676000	304094510	5000	25%
3000	236250000	17426220	97345000	351021220	3650	-8.75%	5	177860000	50589500	102930000	331379500	6350	58.75%

表 5 新投资的机组构成

Tab.5 Type of new generator

英国容量费方法的结果					两部制方法的结果				
失负荷价值	机组类型及台数				失负荷价值	机组类型及台数			
\$/MWh	coil	oil1	gas	turtine1	\$/MW	coil	oil1	gas	turtine1
50	1	1		1	0	1	1		0
120	1	1		1	1	1	1		1
150	1	1		1	1.5	1	1		6
250	1	1		1	2	1	2		6
3000	1	1		1	5	2	4		6

(1) 如果不进行补偿, 即便在运行时没有策略行为, 分散的投资也不充分, 其最后的容量只有 3450 MW, 容量充裕性不能够保证。再考察表 5 给出的新的投资情况, 此时没有机组退役, 投入的机组类型是化石与燃油机组, 只是量不够。分析其中的原因是保持高运行成本的天然气机组对于维持高电价具有明显的好处, 当这些高价格机组退役, 将使得电价变小, 为了维持高电价, 新的机组投入不足。

(2) 英国容量费方法中, 控制补偿力度的量是

失负荷价值。计算结果表明 (表 4) 在很大的失负荷价值取值范围内, 最后的投资容量几乎不变, 虽然总的容量补偿价值的确随着失负荷价值增加了。这是一个意外的结果, 容量补偿费用增加, 却没有引起容量投资的增加。其原因是容量补偿费与市场运行密切相关, 从公式 (6) 可以看出, 只有保持了足够的失负荷概率才有可能使得容量费增加, 失负荷概率会随着容量投入的增加减少, 所以即便增加容量费并不能够期待投资的增加。这个看起来很精

巧的容量补偿费用公式,在市场分散投资的条件下,也可能并不能够保证容量充裕性。进一步比较投资机组的类型(表5),可以发现容量费的支付,相对于完全没有容量补偿而言,多投资了一个天然气的机组。而如果按照传统的投资计划,天然气机组将不被投入。其原因是天然气机组的投资成本比较小,在给出了一定的容量补偿后,即便其总是在边际机组位置也可以得到容量价值,故而其自愿投资了一台机组。但从系统总的运行费用看,其投资与运行成本偏离了最经济的情况。

(3)两部制方法按照装机容量进行补偿。不管机组是否中标,只要安装投入运行,就按照其装机容量进行补偿。从表4的结果可以看出,随着容量补偿的力度增加容量投资具有稳定的增加,也就是说采用两部制方法保证容量充裕性具有稳定可靠的效果。但是,两部制电价中的补偿量多少的确定目前并没有好的方法,如果补偿力度比较大,也就很自然的引起过投资。比较表5中两部制电价中容量补偿费的大小可以看出增加的投资都是低容量成本、高运行费用的机组,这些机组在高的容量补偿情况下,即便利用小时很少,也可以通过容量补偿费用得到足够的回报。

#### 4 结论

本文利用智能代理仿真模型,以未来年为目标构建了分散投资模型,讨论了不同容量补偿情况下的投资情况。从结果的分析可以得到两个与容量有关的特征:(1)容量补偿的方法不仅仅在容量补偿量上对投资有直接的影响,而且其补偿的对象以及途径对投资结果也将产生明显的影响,例如英国容量补偿费方法,由于与失负荷概率有密切的关系,即便增加失负荷价值也不能够有效刺激投资的增加;(2)在分散投资情况下,容量补偿费的增加有可能刺激低投资成本、高运行费用的机组更加多地投入。这个结果与实践情况是吻合的。

本文下一步的工作将引入两阶段的博弈,使得运行阶段也考虑机组的策略行为,更加全面地考察投资问题。

#### 参考文献

- [1] Chao Hung-po, Huntington H G. Designing Competitive Electricity Market[M]. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计:(一)管制阶段的两大电力市场与当量电价理论[J]. 电力系统自动化, 2003,27(7):1-6.  
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent (EVE) Pricing System and Relevant Systems Design: Part One Two Electricity Market and Electricity Value[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7):1-6.
- [3] Chuang A S, Wu Felix. A Game-Theoretic Model for Generation Expansion Planning: Problem Formulation and Numerical Comparisons[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001,16(4): 885-891.
- [4] 言茂松. 电能价值当量分析与分时电价预测—电力市场的定价理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent & Time-of-Electricity Price Forecast—Pricing Theory & Method in Power Market[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [5] Ford A. Waiting for the Boom: a Simulation Study of Ppower Plant Construction in California[J]. Energy Policy 2001,29: 847-869.
- [6] Olsina F, Garces F, Haubrich H J. Modeling Long-term Dynamics of Electricity Markets[D]. Energy Policy 2006,34: 1411-1433
- [7] Botterud A, Korpas M. A Stochastic Dynamic Model for Optimal Timing of Investments in New Generation Capacity in Restructured Power Systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007,29:163-174.
- [8] Repetto R. Protecting Investors and the Environment Through Financial Disclosure[J]. Utilities Policy, 2005, 13:51-68.
- [9] 文福栓, 吴复立, 倪以信. 电力市场环境下的发电容量充裕性问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19):16-22.  
WEN Fu-shuan, WU Fu-li, NI Yi-xin. Generation Capacity Adequacy In The Deregulated Electricity Market Environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19):16-22.
- [10] Green R. Draining the Pool: the Reform of Electricity Trading in England and Wales[J]. Energy Policy, 1999,27: 515-525.
- [11] 邹斌, 言茂松, 张影. 基于古诺博弈的容量补偿机制比较研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 23-28.  
ZOU Bin, YAN Mao-song, ZHANG Yin. Capacity Payment and Capacity Withholding: a Comparison Research Based on the Cournot Game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 23-28.
- [12] Papalexopoulos A D. Supplying the Generation to Meet the Demand[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2004:66-73.
- [13] Erev IDO, Roth Alvin. Predicting How People Play Games: Reinforcement Learning in Experimental Games With Unique, Mixed Strategy Equilibria[J]. The American Review, 1998, 88(4):848-881.

(下转第 32 页 continued on page 32)

- Network Reliability Using Routing Models[J]. IEEE Trans on Reliability. 1991,40(1):29-38.
- [11] Kubat P. Assessing Throughput and Reliability in Communication and Computer Networks[J]. IEEE Trans on Reliability,1988, 37(3):308-311.
- [12] Zafropulo P. Reliability Optimization in Multiloop Communication Networks[J].IEEE Trans on Communication, 1973,21(8):898-907.
- [13] Niver E, Mouskos K, Dwyer P,et al.Evaluation of Transmits Communication System[A]. In:10th Mediterranean Electro-technical Conference[C].2000:664- 667.
- [14] Jan Rong-hong,Hwang Fung-Jen,Cheng Sheng-Tzong. Topological Optimization of a Communication Network Subject to a Reliability Constraint[J]. IEEE Trans on Reliability,1993,42(1):63-70.
- [15] R 别林登, R. N. 阿伦,周家启,等译. 工程系统可靠性评估—原理与方法[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1988.
- [16] 金星, 洪延基, 等. 工程系统可靠性数值分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [17] 周家启, 任震, 译. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986.
- [18] 夏江珍, 谢同林. 大跨距无中继光纤通信系统—西部电力通信系统的一种技术选择[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (151): 32-35.  
XIA Jiang-zhen, Xie Tong-lin. Long Span Unrepeated Fiber Communication System Technical Option Suitable for the West Electric Power Communication[J]. Telecommunications for Electric Power System,2005, 26(151):32-35.
- [19] 韩际晖. 电力通信系统 1+1 交换方案. 电力系统通信, 2005, 26 (148): 19-21, 24.  
HAN Ji-Hui. Switching Scheme of Electric Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005,26(148):19-21,24.
- [20] 江黛如, 金生明. 电力通信系统中的 SDH 自愈环网及其应用探讨[J]. 电力系统通信, 2006, 27: 32-35, 39.  
JIANG Dai-ru, JIN Sheng-ming. Discussion About The Construction and Application of SDH Self-healing Ring in Electric Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric power System, 2006, 27:32-35.
- [21] 李伟英, 高强. 基于 SEE—CMM 的电力通信系统安全性评估[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (155): 34-39.  
LI Wei-ying, GAO Qiang. Research on Security Evaluation of Telecommunication Network for Electric Power System Based on The Methods of SSE-CMM[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005,26 (155):34-39.
- [22] 罗雪军, 高强, 张鑫林. 一种 SEE-CMM 的电力通信系统风险度算法分析[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (158): 11-13, 24  
LUO Xue-jun, GAO Qiang, ZHANG Xin-lin. Research on SSE-CMM Based Security Evaluation Algorithmic of Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric power System, 2005,26(158):11-13,24.
- [23] 李良沫. 电力通信系统安全可靠性的技术保护措施[J]. 电力安全技术, 2000, 4 (2): 38-39.  
LI Liang-mo. The Technical Measures of Electric Power Communications System Reliability[J]. Electric Safety Technology, 2000, 4(2):38-39.
- [24] 王小渭, 汪立新, 武自芳. 分布式电力远东通信系统及其可靠性研究[J]. 微电子学与计算机, 1999, 3: 29-31.  
WANG Xiao-wei, WANG LI-xin, WU Zhi-fang. The Distributed Power System Telemechanics Communications System and Its Reliability Research[J]. Micro-electronics and Computer, 1999, 3:29-31.

收稿日期: 2007-01-09

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统保护与监控的科研、教学工作;

田娟娟 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断及可靠性; E-mail:juanjuansweet@tom.com

周家启 (1938-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划与可靠性、电力系统风险分析等方向的教学和科研工作。

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [14] Ianni A. Reinforcement Learning and the Power Law of Practice: Some Analytical Results[J]. Proceeding of the North American Winter Meetings of the Econometric Society,2001.
- [15] 邹斌, 言茂松, 谢光前. 不同定价方式下电力拍卖市场运行特征的比较研究(一): 模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 7-14.  
ZOU Bin, YAN Mao-song, XIE Guang-qian. Comparison Among Pricing Methods in Pool-Based Electricity

Market by Agent-Based Simulation, Part One: Model and Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 7-14.

收稿日期: 2007-02-07; 修回日期: 2007-03-29

作者简介:

秦绪彬 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: qxbvsqxb@163.com

邹斌 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向电力市场和自动化。