

# 考虑旋转备用的发电商运行资产价值的实物期权模型 及短期风险评估研究(一)

马歆<sup>1,2</sup>, 刘涌<sup>1</sup>, 侯志俭<sup>1</sup>, 蒋传文<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 国家开发银行广东省分行, 广东 广州 510620)

**摘要:** 电力市场作为一个特殊的经济系统, 与普通商品市场的运行存在着很大的不同, 整个系统有着复杂的市场规程、多变的供求关系、严格的技术约束和系统状况, 很难完整明确地从数学上对电力市场的运行过程给以解析和描述, 整个市场的运行存在着很大的不确定性。该文在第1部分中引入了一种用于不确定环境下非金融资产管理实物期权思想, 在电量价格、备用价格和燃料价格等市场运行条件不确定的情况下建立起了考虑旋转备用的发电商运行资产价值的实物期权模型。

**关键词:** 运行资产; 实物期权; 风险评估

**中图分类号:** TM73; F123.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2004)23-0001-04

## 0 引言

一般认为, 电力工业是一种规模经济, 具有天然的垄断性。所以, 电力工业普遍采用发、输、配、售垂直一体的垄断运营模式已经有上百年的历史, 电力工业在垄断模式下发展、壮大和成熟, 同时这种垄断也为用户提供了廉价而又可靠的电力。但是到了20世纪末期, 随着材料科学和制造技术的进步, 电力工业的规模经济性开始逐步枯竭, 发电机组的效率已经提高到了某种极限, 无法通过建造容量更大的发电机组来降低发电成本。同时, 电力工业长期垄断运营也产生了电力行业机构臃肿, 劳动力的生产效率低下, 发电成本居高不下等一系列问题。为了刺激电力工业的有效运行, 在20世纪70年代末期, 最早由美国开始对电力工业市场化改革进行了探索, 随后, 从20世纪80年代开始, 世界上不少国家开始重建其电力工业, 通过打破垄断、引入公平竞争以提高经济效率, 实现社会资源的合理分配和社会总体效益的最大化。但是应该注意到的是, 电力市场作为一个特殊的经济系统, 与普通商品市场的运行存在着很大的不同, 整个系统有着复杂的市场规程, 多变的供求关系, 严格的技术约束和系统状况, 很难完整明确地从数学上对电力市场的运行过程给以解析的描述, 整个市场的运行存在着很大的不确定性。对于发电商来说要面临比传统管制条件下更多的市场风险, 原来的基于成本的最优调度方法已不再适用于目前的电力市场。因此, 如何在电

量价格、备用价格和燃料价格等市场运行条件不确定的情况下建立有效的运行资产价值模型, 并合理地定量评估资产在未来特定时间段内的风险价值, 对于发电商管理和控制风险是至关重要的, 这一课题已经受到众多学者的密切关注, 结合了金融期权思想并且考虑了价格随机性的模型正在逐步被引入到这一研究领域<sup>[1~3]</sup>。Hsu Michael 首先提出了“火花组合”的概念, 构建了天然气价格和电价之间的联系<sup>[4]</sup>。在此基础上, Deng 等人利用欧式期权的相关理论, 研究了一段时间内发电商运行资产的价值问题<sup>[5]</sup>。但是该文没有考虑机组的技术约束, 仅仅简单地认为当天然气的价格与电价的比值高于隐含热效率的时候, 发电商就停机, 如果电价与天然气价格的比值低于隐含热效率的时候, 发电商就开机, 这样可能产生的后果是高估了运行资产的价值。Tseng 等人在考虑了发电机组约束的情况下利用实物期权的概念初步建立了发电商运行资产的价值模型, 但是该文没有考虑备用问题, 也没有对风险进行评估<sup>[6,7]</sup>。Julia Frayer 等人则利用实物期权的思想, 通过一个简单的例子比较了利用实物期权概念评估机组价值与用传统的现金流方法(cash flow analysis, DCF)评估的差异<sup>[8]</sup>。本文通过引入用于不确定环境下非金融资产管理实物期权思想, 考虑了电量价格、备用价格和燃料价格等市场运行条件不确定性情况, 建立起了有效的发电商运行资产价值的实物期权模型。目前研究备用的文献很多, 对备用的定义和分类有所不同, 本文此处不具体划分, 只研究旋转备用的情况, 有关备用方面资料可参见文献<sup>[11~13]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50079006)

## 1 实物期权理论与发电商运行资产价值

哈佛大学的罗伯特·默顿(Robert C. Merton)和斯坦福大学的迈伦·斯柯尔斯(Myron S. Scholes)获得了1997年度的诺贝尔经济学奖,这不仅是因为他们成功地解决了期权定价问题,促进了金融衍生产品的迅速发展,更为重要的是,他们的发现推动了期权理论在其它经济领域中的广泛应用,使得经济领域中最棘手的不确定性(Uncertainty)问题,能够用期权理念加以诠释并进行一定程度的量化。其中最引人瞩目并为人们所逐渐付诸实践的是,期权理论在企业资源分配和投资决策领域中的应用。它在某种程度上带来了投资决策方法的革命。这种新的决策方法是“实物期权法”(Real Option)。实物期权是金融期权理论在实物(非金融)资产期权上的扩展,其本质是一种思维方式,即在不确定环境中的管理者对项目投资中的潜在收益和价值的评估与决策制定<sup>[9]</sup>。期权有两种基本类型,看涨期权(Call Option)与看跌期权(Put Option)。购买看涨期权者有权在某一特定时间内以某一确定的价格购买约定的资产,约定的价格称为执行价格,合约中规定的资产称为标的资产(或者称为基础资产)。当标的资产的价值高于执行价格时,执行期权并以市场价格出售,便可获利。当价格相反时,放弃期权,并无损失。因此,期权具有价值,其价值随着标的资产价格的波动而波动。如果分析一下项目投资特征,就会发现它与期权十分近似。其中项目的净现值便相当于期权中标的资产的价值,项目投资成本相当于期权执行价格。项目本身便是一种期权。为了与一般的期权相区别,我们将这类标的资产不能随意流动的期权称为实物期权,是以期权概念定义的现实选择权,而普通的期权称为金融期权,两者最本质的区别是实物期权的非交易性。既然是期权,便可以用期权理论对其定价,以评估出项目的内在价值,用期权理念来进行项目评估的方法就称为实物期权法。具体地说,一个公司对一个项目进行评估,拥有对该项目的投资机会,这就如一个购买期权,该期权赋予公司在一定时间内有权力按执行价格(投资成本)购买标的资产(取得该项目)。同金融期权一样,该约定资产(项目)的市场价值(项目的净现值)是随市场变化而波动的,当市场价格(净现值)大于执行价格(投资成本)时,有利可图,公司便执行该期权(即选择投资),该期权也因标的资产价格的未来不确定性而具有一定的价值。实物期权可分为以下几种类型:

### 1) 单一期权与复合期权

Mickinsey 公司把单一期权分为 3 种类型,即增长期权(Growth Options)、学习期权(Learning Options)和放弃期权(Abandonment Options)。增长期权是指企业通过预先投资作为先决条件或一系列相互关联项目的联结,获得未来成长的机会,而拥有在未来一段时间进行某项经济活动的权利。根据增长期权的特点可以具体分为 3 种情况:扩大规模增长期权(Scalingup)、转换增长期权(Switchingup)、范围拓展增长期权(Scopingupaproject)。学习期权是指延迟投资以获取更多的信息或技能的选择权。当产品的价格波动幅度较大或投资权的持续时间较长时,延迟期权的价值较大,若较早投资则意味着失去了等待的权利。放弃期权是指在市场环境变差时提前结束项目的权利,这种实物期权相当于美式看跌期权。放弃期权可以分为 3 小类:缩小规模期权(Scaledown),如果新信息改变了期望的效益,则部分收缩或关闭项目;转向期权(Switchdown),当获得新的信息时,放弃原来的项目而转向效益更好的投资领域;范围收缩期权(Scopedown),当一个项目没有进一步发展的潜力时,缩小运作范围或放弃项目运作。上述实物期权基本上相互独立,它们可以组合形成多种不同的期权,即复合期权<sup>[10]</sup>。

### 2) 独享期权和共享期权

独享期权是企业拥有全部所有权的期权,在确定其价值的时候不用考虑竞争对手的策略因素。而对于共享期权来说,在进行价值评估的时候就必须从对策论的角度研究竞争性对实物期权的影响,也就是说,期权的价值不仅取决于外部环境的不确定性,而且与竞争对手采取的策略有关系。

对于发电商来说,它所拥有的是发电机组,即它的运行资产。在电力市场环境下,它所面对的是电量市场中现货电价的变化、备用市场中备用价格的变化和燃料市场中的价格变化,这些在未来都是不确定的,它从机组中的收益取决于这些因素的变化。假设某个发电商是一个价格接受者的话,它可以根据这些因素的变化来决定自己是否在某一个时间段开机或者停机,如果在开机的状态下决定自己在某一个时间段中在电量市场上发多少电,在备用市场上发多少电。具体地说,就相当于发电商拥有一份期权合约,该期权赋予发电商在一定时间内有权力按执行价格(投资成本,此处即发电成本)即确定是否开机运行还是停机,或者确定是在电量现货市场上出售标的资产(电量),还是在备用市场上出售标的资产(电量)。同金融期权一样,该约定资产的市

场价值是随市场变化而波动的,当市场价格(净现值)大于执行价格(投资成本)时,有利可图,公司便执行该期权(即选择投资,对于发电商来说就是发电)。

## 2 考虑旋转备用的发电商运行资产实物期权模型

建立考虑旋转备用的发电商运行资产实物期权模型的目的就是为了使发电商能够在某段时间内,在考虑电量价格、旋转备用价格和燃料价格不确定的情况下,使收益最大化。但是应该注意到的是,由于机组有开停机时间限制、起停成本限制等技术约束,因此,发电商并不能简单地如文献[5]一样在电量价格高于成本的时候开机,价格低于成本的时候关机,比如,如果在某一时刻机组是处于开机的状态,即使此时的电量价格远低于成本,但是机组仍要保持一段时间的运行状态才能停机,所以,发电商运行资产实物期权模型就是在考虑技术约束的情况下,合理确定开停机时间以及分配自己在电量市场和旋转备用市场上的发电量。本文认为机组为燃煤机组,燃料价格为煤的价格。

### 2.1 标记符号说明

$t$  为待评估的时间段,  $t = 0, 1, \dots, T$ ;  $\phi$  为机组的启动时间;  $u_t$  为机组的停机时间;  $on$  为机组开机后的最小运行时间限制;  $off$  为机组停机后的最小停运时间限制;  $q^{max}$  为机组的最大可用容量限制;  $q^{min}$  为机组的最小可用容量限制;  $q_t^S$  为在时间  $t$  的时候,机组在电量市场中的发电量;  $q_t^R$  为在时间  $t$  的时候,在备用市场中可用的中标容量;  $q_t^{DR}$  为在时间  $t$  的时候,实际调用的备用容量,  $q_t^{DR} = q_t^R \cdot \alpha_t$ ,  $\alpha_t$  为实际调用比率,  $0 \leq \alpha_t \leq 1$ ;  $q_t$  为在时间  $t$  的时候,机组在电量市场和备用市场中的总的实际发电量;  $p_t^S$  为在时间  $t$  的时候,电量市场中的电价;  $p_t^R$  为在时间  $t$  的时候,备用市场中的电价;  $p_t^F$  为在时间  $t$  的时候,燃料的价格;  $u_t \in \{0, 1\}$ ; 当  $u_t = 1$  的时候,表示机组将在  $t + 1$  的时候处于开机的状态; 当  $u_t = 0$  的时候,表示机组将在  $t + 1$  的时候处于停机的状态;  $x_t$  为状态变量,表示在时间  $t$ , 机组连续开机时间或者停机时间;  $C(q_t^S, q_t^R, q_t^{DR}, p_t^F)$  表示在时间  $t$ , 燃料价格等于  $p_t^F$ , 实际调用备用容量等于  $q_t^{DR}$  的时候,发电机组的成本函数;  $ST(x_t)$  表示在时间  $t$  时机组的启动费用;  $SD(x_t)$  表示在时间  $t$  时机组的停机费用;  $J_t^R(x_t, p_t^S, p_t^R, p_t^F)$  表示在时间  $t$ , 电量价格等于  $p_t^S$ , 备

用价格等于  $p_t^R$ , 燃料价格等于  $p_t^F$  的时候,发电商运行资产的价值。

### 2.2 模型的建立

发电商的目标函数为在某一时间段内的总收益最大,考虑备用之后形式如式(1):

$$J_0^R = \text{Max}_{u_t, q_t^S, q_t^R} E \sum_{t=0}^T [f_i^R(x_t, q_t^S, q_t^R, p_t^S, p_t^R, p_t^F)] - ST(x_t) u_t - SD(x_t) (1 - u_t) \quad (1)$$

其中:

$$f_i^R(x_t, q_t^S, q_t^R, p_t^S, p_t^R, p_t^F) = [p_t^S (q_t^S + q_t^{DR}) + p_t^R q_t^R - C(q_t^S, q_t^R, q_t^{DR}, p_t^F)] \text{sign}(x_t) \quad (2)$$

不失一般性,本文认为发电机组的成本函数为二次成本函数:

$$C(q_t^S, q_t^R, q_t^{DR}, p_t^F) = [ (q_t^S + q_t^{DR})^2 + (q_t^S + q_t^{DR}) + ] p_t^F \quad (3)$$

$$\text{sign}(x_t) = \begin{cases} 1 & x_t > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式(1)满足以下约束条件:

1) 最小运行时间和最小停运时间约束

$$u_t = \begin{cases} 1 & \text{if } on < x_t < off \\ 0 & \text{if } -off < x_t < -on \\ 0 \text{ or } 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

2) 机组状态转移约束

$$x_t = \begin{cases} \text{Min}(on, x_{t-1} + 1) & \text{if } 0 < x_{t-1} \ \& \ u_{t-1} = 1 \\ -on & \text{if } x_{t-1} = on \ \& \ u_{t-1} = 0 \\ \text{Max}(-off, x_{t-1} - 1) & \text{if } x_{t-1} < 0 \ \& \ u_{t-1} = 0 \\ 1 & \text{if } x_{t-1} = -off \ \& \ u_{t-1} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

3) 在时间  $t$  的时候,机组总的实际发电量满足

$$q_t = q_t^S + q_t^{DR} \quad (7)$$

4) 机组输出功率上下限约束

$$q^{min} \text{sign}(x_t) \leq q_t \leq q^{max} \text{sign}(x_t) \quad (8)$$

其中:  $t = 1, \dots, T$

5) 机组旋转备用容量输出约束

$$0 \leq q_t^{DR} \leq (q^{max} - q_t^S) \text{sign}(x_t) \quad (9)$$

6) 机组旋转备用容量实际调用约束

$$0 \leq q_t^{DR} \leq q_t^R \quad (10)$$

7) 机组的启动费用,此处设为常数

$$ST(x_t) = \begin{cases} ST & \text{if } x_t = -off \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

8) 机组的停运费用,此处设为常数

$$SD(x_t) = \begin{cases} SD & \text{if } x_t = on \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

如果不考虑备用,那么目标函数可以简化为如下形式:

$$J_0 = \text{Max} E \sum_{t=0}^T f_t(x_t, q_t^S, p_t^S, p_t^F) - ST(x_t) u_t - SD(x_t) (1 - u_t) \quad (13)$$

其中:

$$f_t(x_t, q_t^S, p_t^S, p_t^F) = [p_t^S q_t^S - C(q_t^S, p_t^F)] \text{sign}(x_t) \quad (14)$$

成本函数为:

$$C(q_t^S, p_t^F) = [(q_t^S)^2 + q_t^S + ] p_t^F \quad (15)$$

### 3 结语

实物期权是一种研究不确定环境下引入期权思想用于非金融资产投资管理的思想,本文对实物期权的概念、分类进行了介绍,并运用实物期权的思想建立了考虑旋转备用的发电商运行资产实物期权模型,该模型对电量价格、备用价格和燃料价格等市场运行条件不确定的情况予以考虑,更符合电力市场运行实际。

### 参考文献:

- [1] Wolak F A. An Empirical Analysis of the Impact of Hedge Contracts on Bidding Behavior in a Competitive Electricity Market[R]. Stanford University, 2000.
- [2] Wise J. Financial Market Trading in the Australia Electricity Market[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. 1274-1277.
- [3] Ghosh K, Ramesh V C. An Options Model for Electricity Power Market[J]. Electrical Power and Energy System, 1997, 19(2): 75-85.
- [4] Hsu M. Spark Spread Options Are Hot[J]. The Electricity Journal, 1998, 11(2): 1-12.
- [5] Deng S J, Blake J, Aram S. Exotic Electricity Options and Valuation of Electricity Generation and Transmission Assets

- [J]. Decision Support Systems, 2001, 30(3): 383-392.
- [6] Tseng C L, Barz G. Short-term Generation Asset Valuation: A Real Options Approach[J]. Operations Research, 2002, 50(2): 297-310.
- [7] Tseng C L. Exercising Real Unit Operational Options Under Price Uncertainty[A]. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. 436-440.
- [8] Frayer, Julia, Uludere, et al. What Is It Worth? Application of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets[J]. The Electricity Journal, 2001, 14(8): 40-51.
- [9] Amram M, Kulatilaka N. 实物期权——不确定环境下的投资管理 (Real Options Managing Strategic Investment in an Uncertain World) [M]. 张维,译 (ZHANG Wei, Trans). 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2001.
- [10] Hull J C. Options, Futures, & Other Derivatives [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [11] Strbac G. Trading Electricity and Ancillary Services in the Reformed England and Wales Electricity market [A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2001. 41-44.
- [12] Flynn M, Sheridan W P, Dillon J D, et al. Reliability and Reserve in Competitive Electricity Market Scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 78-87.
- [13] 甘德强,胡朝阳,沈沉 (GAN De-qiang, HU Zhao-yang, SHEN Chen). 美国新英格兰备用电力市场设计和优化新模型 (Design and Optimization Model of USA New England Reserve Market) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(2): 19-23.

收稿日期: 2004-04-09

作者简介:

马 歆 (1972 - ),男,博士研究生,主要从事电力市场方面的研究; E-mail: maxin@sjtu.edu.cn

刘 涌 (1976 - ),男,博士研究生,主要从事电力市场方面的研究;

侯志俭 (1942 - ),男,教授,博导,主要从事电力市场和电力系统静态安全分析方面的研究。

### A study of real options model of operating capital value of generator for spinning reserve and short-term risk assessment ( )

MA Xin, LIU Yong, HOU Zhijian, JIANG Chuanwen

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Electricity market is a special economic system and has a great difference with common commodity markets. This system has complex market rules, variant relationship between supply and demand, and strict technology limits and system conditions, it's difficult to describe its operation process with complete and clear mathematic language through an analytical model, which makes its operation with great uncertainty. In part one, the real options thought for nonfinancial capital investment under uncertainty environment is introduced, and the real options model of operating capital value of generator for spinning reserve is constructed under uncertain market conditions of electricity price, reserve price and fuel price.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50079006).

**Key words:** operating capital value; real options; risk assessment