

实物期权方法及其在电力系统中的应用

吉 兴 全¹, 文 福 拴²

(1. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东省青岛市 266510; 2. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 很多国家和地区正在对电力工业进行放松管制和市场化改革, 这将给电力系统的投资决策带来更多不确定性因素。传统的投资方案评估大多采用净现值(NPV)法, 难以计及项目的管理灵活性; 实物期权方法(ROA)较好地解决了这一问题, 并已开始应用于研究电力投资决策方面的问题。首先简要介绍了实物期权的一些概念, 然后对现有的实物期权定价的几种主要方法进行了总结, 最后对 ROA 在电力系统中应用的研究现状做了简要综述, 指出几个有待进一步研究的问题。

关键词: 发电投资; 实物期权; 电力市场

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

传统的投资决策多以净现值(NPV——net present value)作为衡量项目优劣的判据, 一般包括下述 4 个主要步骤: ①预测未来各个规划期内的期望现金流 c_t ; ②估算与该项目各规划期现金流相对应的风险折现率 k ; ③用折现现金流 $\sum_{t=0}^n \frac{c_t}{(1+k)^t}$ 求取其现值 V ; ④将 V 与初始投资 I 相比较, V_{NPV} 取为 $V-I$, 如果 $V \geq I$, 即 $V_{NPV} \geq 0$, 则项目值得投资。

由于 NPV 法考虑了资金的时间价值, 比原有的多种投资评估方法更为合理, 因而能够脱颖而出, 成为包括电力系统在内的很多行业投资决策所广泛采用的方法。然而, 随着电力工业市场化改革的逐步深化, 发电投资所面对的不确定性因素明显增加, NPV 法遇到了一些挑战, 主要表现在 2 个方面:

1) 主观性较强。在 NPV 法中, 用不同的贴现率来体现决策者对风险程度的估计或判断, 然而如何确定计及风险调整后的贴现率是一个难题, 到目前为止仍未有广泛认同的方法。实际上, 随着环境的变化, 风险程度也在变化, 相应的贴现率也应该是变化的。用单一的贴现率代替所有可能出现的贴现率, 会导致评估的可信度降低。从这个意义上讲, NPV 法一般只适用于期限短、不确定性小、变动程度不大的投资项目的决策。

2) 缺乏灵活性。NPV 法隐含着—个基本假设, 即决策是—次性孤立做出的。该方法通过直接预测

未来的现金流确定投资方案, 并假定会按既定方案一直执行下去, 没有考虑在实际决策过程中决策者针对环境的变化所具有的主观能动性。由于不确定性因素的存在, 随着时间的推移, 真实的现金流很可能会或多或少地偏离预测值, 同时原有的不确定因素也会逐步明朗化。此时, 决策者应该根据当时的市场条件和获得的新信息对原有投资方案进行调整, 如扩展投资、延迟投资、放弃部分投资等, 而这些调整会使基于 NPV 法得到的投资方案的净现值失效, 换句话说, NPV 法无法处理这些情况。

针对 NPV 法存在的这些缺陷, 经济学家们做了大量研究工作, 试图为不确定性环境下的投资决策找到更好的解决途径。当前已经提出了很多方法, 其中以罗伯特—默顿为代表的一些学者所提出的实物期权方法(ROA——real options approach)^[1], 为投资者提供了一种比较独特和科学的决策理念与方法。由于 NPV 法的主要弱点在于不能为投资决策的管理灵活性以及有关的不确定性价值进行评估, 而金融期权的概念恰好反映了灵活性和不确定性的价值, 因而, 金融期权被引入投资项目的决策分析中, 形成了 ROA。

ROA 在电力投资与规划决策中有着良好的应用前景, 且已出现了部分研究成果。Hsu^[2] 首先提出了“spark spread”期权的概念, 并据此评价燃气机组在一段时间内的价值; 而文献[3, 4]最早将 ROA 应用于长期发电投资规划问题, 提出了基于二叉树的多相关项目多期权投资模型, 并采用动态规划方法求解, 分析了项目间的相关性对投资决策和期权价值的影响。此后陆续有学者应用 ROA 对电力投资决策进行了研究^[5~14]。

鉴于 ROA 尚不为广大电力工作者所熟悉, 本文首先简单介绍 ROA 的一些基本概念; 以此为基

收稿日期: 2005-05-07; 修回日期: 2005-07-06。
国家重点基础研究发展计划专项资助项目(2004CB217905); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0818); 中国博士后科学基金资助项目(2003034512)。

础,对实物期权定价的一些主要方法进行了分析;最后,对 ROA 在电力系统中的应用做了概述,并指出了应用 ROA 解决实际问题时有待进一步研究的问题。

1 实物期权的一些基本概念

作为一种金融衍生工具,期权是一种可在未来生效的选择权利,它赋予其持有人在规定的时间内、以事先约定的价格买入(或卖出)一定数量标的资产的权利^[1,15]。期权的基本参数包括标的资产(如股票、债券等)、执行价格或约定价格 L 、到期日 T 及权利金 D (即为获得期权而向合同对方支付的费用)。

图 1 示出了期权的损益结构,从图中可以看出,期权的价值是不对称的,因而通过期权这种金融工具,人们可以根据市场条件的变化采取不同的行动,既可以实现高利润,又可以避免市场风险,这就是期权的灵活性价值。

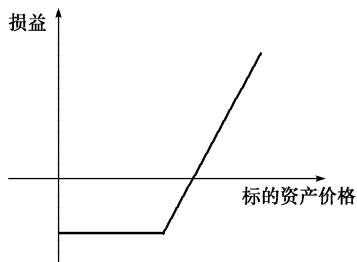


图 1 期权价值的不对称性
Fig. 1 Asymmetry of option's value

与金融投资类似,项目投资中同样存在类似的选择权,投资者可根据环境的变化做出不同的选择。如当前的市场情形较预期好时,可选择继续或扩大投资,反之则缩小或放弃投资。正是项目投资与金融投资之间的这种对应关系,启发了人们用相对成熟的期权理论来分析实物投资项目,从而将实际投资项目看做现金流和一系列期权的组合^[16~18],这样对项目投资进行定量分析就转化为对现金流和系列期权的定价分析。这种将实物项目与金融期权相结合的分析方法就称为 ROA。

按照 ROA 的思想,假定决策者能够辨别和使用决策过程中的“期权”,则不确定性能够带来价值,如图 2 所示。

显然,在投资和回报都相同的情况下,人们更愿意选择那些具有灵活性的项目,这是由于灵活性本身就可认为是一种有价值的期权。Luehrman 提出了一种扩展 NPV(ENPV)的概念,其价值被定义为^[19]:

$$V_{ENPV} = V_{NPV} + F(V) \quad (1)$$

式中: V_{NPV} 为项目本身的净现值; $F(V)$ 为项目所含

期权(灵活性)的价值,是项目收益现值 V 的函数。

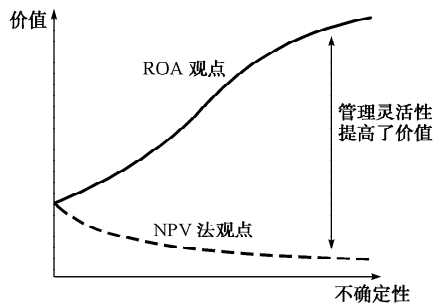


图 2 项目价值与不确定性
Fig. 2 Project value and uncertainties

2 实物期权定价方法

期权意味着相机决策,它允许人们根据市场条件的变化采取不同的行动。在决策时刻,假如情况向着比原来预期的更好的方向发展,则做出一种决策,反之则做出另一种决策。这种用期权形式表示的灵活性本身是有价值的,然而怎样定量评估期权的价值曾是一度困扰经济学界和数学界的难题。1973 年,美国经济学家 Black 和 Scholes 根据无套利原则,导出了金融期权应满足的偏微分方程,并给出了其精确解,即著名的“B-S 期权定价模型”^[15],在期权定价方面取得了突破性进展,并因此获得了 1997 年度诺贝尔经济学奖。此后,学者们又陆续提出了其他一些期权定价方法。大体上讲,主要有下述 5 类期权定价方法:

1)解析方法:基于偏微分方程,对 B-S 模型直接求解。

2)近似的解析方法:对不存在严格解析定价公式的期权,如美式标准期权和算术平均期权等,利用偏微分方程或概率方法求得其近似解析定价公式。

3)二叉树方法:是一种离散方法,它假定在每个小的时间步长,标的资产价格面临上涨或下跌 2 种可能,从而标的资产价格运动的可能路径形成一个二叉树图。从树图末端向后递归计算可求得当前期权的价格。

4)有限差分方法:这是求解偏微分方程数值解的一种常用技术,它利用差分逼近,将 B-S 模型转化为一组差分方程来求解。

5)Monte-Carlo 模拟:利用计算机模拟标的资产价格的随机运动和相应的期权收益,并将收益按无风险利率进行贴现。基于大量随机样本得到的贴现后收益的算术平均值即为该期权价格的估计值。

上述后 3 种方法属于数值方法,对于大多数期权而言,解析定价公式是不存在的,并且已有的解析定价公式大多也仅仅局限于参数为常数等较特殊的

情形。因此,通常需要借助于数值方法求解,这样寻求速度快且高精度的数值方法成为解决大多数期权定价方法的根本出路。与二叉树方法及有限差分方法相比, Monte-Carlo 模拟法的速度较慢,且难以处理可提前执行的期权,因而不能用于美式期权定价。下面简单介绍常用的解析方法和二叉树方法。

2.1 解析方法

Black 和 Scholes 在推导期权定价模型时,假设标的资产(如股票)的价格服从几何布朗运动 (GBM),基于无套利原则,得出了期权价值 F 应满足如下偏微分方程:

$$-rF + \frac{\partial F}{\partial t} + rV \frac{\partial F}{\partial V} + 0.5\sigma^2 V^2 \frac{\partial^2 F}{\partial V^2} = 0 \quad (2)$$

该方程有解析解,即著名的 B-S 模型:

$$F = VN(d_1) - Le^{-rT}N(d_2) \quad (3)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{V}{L}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma \sqrt{T}} \quad (4)$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T} \quad (5)$$

式中: V 为标的资产价格; L 为执行价格; T 为期权有效期; r 为无风险利率; σ 为标的资产价值的波动率; F 为期权价值; $N(\cdot)$ 为标准正态分布的累积概率分布函数。 V, L, T, r 和 σ 这 5 个参数构成了影响期权价值的五要素。注意,在上述 B-S 模型内没有出现标的资产的期望回报率 α ,这意味着期权价格与投资者的期望回报无关。

2.2 二叉树方法

二叉树方法是由文献[20]提出的,也称动态规划方法。该方法以对标的资产价值变化的一种简单描述为基础,认为标的资产价格的运动是由大量小幅度二值运动构成的。把期权的有效期分为 n 个足够小的时间段 Δt ,设 V_0 为标的资产的当前价格, u, d 分别为上升因子和下降因子,则经过 Δt 后,资产价格运动到 2 个可能的新值,即以概率 p 上升到 uV_0 ,或以概率 $1-p$ 下降到 dV_0 ,如图 3 所示。

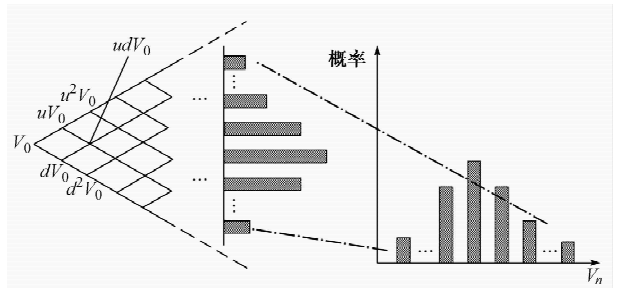


图 3 二叉树及到期日的资产价格分布
Fig. 3 Binomial lattice and probability distribution of asset price on expiration date

这样,经过 n 期达到到期日后,资产价格 V_n 的可能值为:

$$V_n = u^j d^{n-j} V_0 \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (6)$$

二叉树图表示期权价格在有效期内可能遵循的路径。由动态规划方法,从第 n 期开始逐期向前递推,最终不难得到期权在当期的价格 $F_0^{[19, 21]}$:

$$F_0 = \sum_{j=0}^n \frac{\binom{n}{j} p^j (1-p)^{n-j} \max(0, u^j d^{n-j} V_0 - L)}{e^{nr\Delta t}} \quad (7)$$

2.3 实物期权与金融期权及 NPV 法的比较

对实物期权而言,一般不存在交易市场,事实上它只是借用金融期权的思想来研究实物投资。实物期权理论认为,金融期权与实物期权之间存在一一对应关系,它们之间的参数对应关系见表 1。上述各期权定价方法完全适用于对实物期权的定价。

表 1 金融期权与实物期权的对比
Table 1 Comparisons of financial options and real options

参数	金融期权	实物期权
V	股票当前价格	项目期望现金流
L	执行价格	投资成本
T	有效期	投资机会持有期
σ	股票波动率	项目价值波动率
r	无风险利率	无风险利率

下面通过例子对 NPV 法和 ROA 进行比较。假设某投资者考虑在某地兴建电厂 A,固定成本(许可证、土地和设备等)需 50 亿元,寿命期内的期望净收益的折现值为 40 亿元。5 年后可以在该厂新增数台大容量机组,扩建机组的成本为 100 亿元,估计寿命期内的净收益的折现值为 90 亿元。市场存在较大的不确定性,电厂收益的波动率为 8%。无风险利率 $r=0.06$ 。现在要决策是否投建电厂 A。

按照 NPV 法,无论是先期项目 ($V_{NPV} = 40 - 50 = -10$),还是 5 年后扩展项目 ($V_{NPV} = 90 - 100 = -10$),净现值均小于 0,故不应投建此项目。然而,若用 ROA 分析,将 $V=90, L=100, T=5, \sigma=0.08, r=0.06$ 代入式(3)~式(5),可得扩展项目的期权价值为 17.34 亿元,加上先期项目的净现值,项目可实现的总净收益为 7.34 亿元,故应投建该电厂,这与 NPV 法得到的结论相反。原因在于扩展项目的价值具有波动性,且扩展项目的投资决策具有灵活性,亦即可根据 5 年后的实际市场情况相机决策,具有灵活性价值。ROA 计及了这种灵活性价值,而 NPV 法则无法考虑。

可见,ROA 对标的资产的相关信息要求很少,除了投资成本和无风险利率外,仅需知道其现值和

波动率。此外,由于ROA中采用无风险利率,这样就无需对贴现率进行风险校正,从而使定价过程独立于个人的风险偏好。另一方面,ROA不是对NPV法的全面否定,一般仍需要用NPV法得到的项目现值作为ROA的输入参数。比较而言,NPV法是一种刚性的投资评估方法,它无法处理投资者根据市场情况变化对投资决策进行调整的灵活性;ROA则属于柔性评估方法,它能够考虑投资者对环境变化做出响应的能力^[22]。

3 ROA在电力投资决策中的应用

随着电力工业市场化改革的逐步深入,无论是供电方、用户还是投资者,均面临越来越多的不确定因素,为此需要能够规避市场风险的手段。作为一种对冲风险的金融衍生工具,期权被很自然地引入电力市场的研究中^[23]。文献[24~29]对以电能为标的物的期货期权交易进行了研究,采用了多种定价方法评估电力期权的价值;Hogan^[30]则提出了固定输电权(FTR)的概念,用于鼓励输电投资。文献[31~35]对可中断电力合同中隐含的期权进行了估价。从电网公司的角度看,可中断合同赋予其中断用户的权利,相当于其以中断价为敲定价买入了用户的看涨期权,从而回避了高电价的风险。文献[36]以辅助服务市场中的旋转备用期货合约对象,采用B-S模型对旋转备用合约的价值进行了评估。鉴于在电力市场环境下经常出现调峰能力不足的问题,文献[37]提出了调峰权的概念,调峰权的拥有者有权在约定时间内向调峰权的出售方按约定的数量和时段购买其向下调峰容量,并按约定的价格支付调峰费用。从概念上讲,调峰权也是期权的一种表现形式。这些研究成果大多以在期货、期权交易市场存在的前提下,分析期权本身的价值,或者以供电合同的存在为前提,分析其中隐含的期权价值,但从本质上讲仍属于金融期权的范畴。将期权理论应用到电力系统的中长期投资决策问题中,即为电力投资决策的ROA。

ROA的应用范围十分广泛,对于如下情形其优越性尤为明显^[21]:①存在相机决策(也称或有决策)时,没有其他方法能正确评估这种决策的价值;②当不确定性程度高,必须考虑决策灵活性时;③当项目价值不仅依赖于当前决策,而且还依赖于未来(一系列)决策时。

电力投资的回收期长,一般具有多个相机决策点,且电力工业市场化以后引入了很多不确定性因素,因而ROA相当合适。用ROA解决问题时首先要识别投资决策过程中需要面对的不确定性因素,

并构造相应的期权模型。ROA在电力系统投资决策中有以下多种类型的应用。

3.1 延迟投资期权

在电力市场环境下,将来的电价水平和发电公司能够被调度的发电出力的变化趋势是影响投资决策的2个重要因素,但二者都难以准确预测。此外,将来的融资环境和能源政策都可能存在不确定性。由于发电市场具有很强的进入壁垒,新的投资项目即使通过NPV分析是可行的,投资者也未必会立即投资,因为投资机会对发电投资者而言不会在短时间内消失。面对未来大量不确定性因素,投资者会谨慎地选择一个有利的投资时机。当不确定性因素很多且程度很高时,投资者可考虑暂缓进行大规模投资,待电力需求、政策变化、财务状况等信息逐步明朗化以后,再重新对项目进行现金流评估。

推迟发电项目投资相当于获得了一个期权,它赋予投资者在今后某个时段进行投资的权利,期权的执行价格为项目的投资成本,期权标的资产的现值对应于项目的期望净现值。

文献[38]认为不确定性会增加期权的价值,这可能导致期权的执行时间推后,因而不确定性与投资意愿之间存在负相关的关系,也就是说,不确定性会对投资意愿产生负面影响。当投资者做出不可逆的投资决策时,它就放弃了推迟投资的期权^[19],即放弃了等待以获得可能会影响其收益的新信息,一旦市场条件逆转,它也不能停止投资。文献[19]导出了投资临界值的表达式,分析了期权价值与各种因素的关系,指出了不确定性程度越高,投资机会的价值越大,同时投资的门槛也越高。

文献[39]用线性函数来表示电力市场的供需曲线,将需求的不确定性划分为短期不确定性和长期不确定性。前者与天气等因素相关,对新机组的长期赢利能力没有影响;后者与地区经济增长等因素有关,表现了负荷水平的长期特性。事实上,正是长期不确定性因素为投资机会赋予了实物期权价值,因为延迟投资以等待更明确的需求和电价信息是有利的。该文将长期不确定性因素用马尔可夫链模型表示,并用随机动态规划(SDP)方法求解投资决策问题。研究结果表明:设置过低的价格上限,会进一步导致投资推迟,从而影响发电容量的充裕性;另一方面,采用容量价格机制将会使得投资提前,从而可能导致过多的峰荷容量投资。

文献[40]应用ROA分析了不确定性市场环境下可再生能源项目的投资评价问题,并用B-S模型求解项目价值。文献[14]将发电投资方案视为一系列延迟期权的组合,给出了相应的数学模型,并用数

值方法求得了发电厂的最优投建时间。

由于发电市场具有寡头垄断特征,投资者在投资决策过程中还必须考虑新建电厂或机组对未来市场电价从而对其收益的影响。通常,发电容量增加会引起市场电价下降,这可能会导致推迟投资。这样,现有的发电公司在进行新的投资决策时,除了必须考虑新增容量可能引起的电价下降对待建电厂价值的影响,还需要考虑对其现有电厂价值的影响。此时,投资决策应该基于整个发电公司拥有的所有发电厂的价值而不仅是拟新建电厂的价值。由于这些原因,一般而言,在寡头垄断市场中,放弃或推迟兴建新的发电厂或新的机组的可能性会比完全竞争市场中的可能性大^[12]。

3.2 分阶段投资期权

对于同一个发电厂内多台机组不同时兴建的问题,可按时间顺序分为若干相互关联的阶段,每一阶段的投资决策取决于前期投资结果和本阶段可以获取的信息状况。各期投资都对应一个实物期权,且这些期权相互关联。在这种情况下,一个期权的价值不仅仅取决于其自身特征,还与其他尚未执行的实物期权的价值有关,在总体上形成一个复合期权。

针对以水电为主的巴西电力系统,文献[41]分析了作为补充能源的火电在电源投资中所处的位置,基于实物期权理论得到了火电厂多阶段投资决策模型。文献[3,4]对实物期权在发电投资规划中的应用做了较全面、系统的研究,首先根据 Teisberg 的研究成果^[42],假定机组的市场价值服从 GBM,然后用二叉树表示多阶段期权投资模型,由于在一个阶段所做的期权选择会影响随后其他阶段的期权选择,因而需要采用后推式动态规划法确定项目的最优选择期权和相应的项目价值。该文得出了用于计算实物期权价值的递推公式,并进一步分析了投资项目间的相关性对投资决策和期权价值的影响。

然而实物期权的价值并不具备可加性,复合期权中各期权价值的作用机制十分复杂,目前对复合期权价值的研究尚处于理论探索阶段。

3.3 扩张期权

如果在发电投资项目的实现过程中发现电力需求超过预期或投资环境有所改善时,可考虑扩大投资规模,以增加项目价值。投资者所拥有的这种可根据项目实际进展情况和市场有利因素、适当扩大投资规模的权利被称为扩张期权,它赋予投资者在今后某个时段进行追加投资的权利。该期权的执行价格为追加项目的投资成本,标的资产的现值对应于追加项目的期望 NPV。

由式(1)可知,一个投资项目的价值可用 ENPV

表示,它包含传统的 NPV 和扩张期权的价值。如果投资者有多个可选发电投资方案,且各方案实施后均有再次扩展的可能,这样各方案的价值不仅包含先期项目本身的 NPV,还各包含一个扩张期权的价值。在这种情形下,最优投资决策的目标应为最大化投资方案的 ENPV,约束条件为资金预算和期权的可用性。基于这一思想,文献[4]构造了发电投资决策的混合整数规划模型,得到了最优投资方案。

3.4 停启期权

投资的发电项目不一定要在其寿命期内连续运营。如果由于一次能源、电力需求、市场竞争等原因使得在一段时间内该项目处于亏损状态,则可考虑暂停发电以减少损失,待情况好转后重新启用该项目。这种可根据外部环境变化暂时中止及重新启用项目的能力就构成了停启期权。

3.5 转换期权

燃油电厂可根据燃料市场情况的变化或环保的要求,在技术条件允许的情况下将燃料改为天然气;热电联产的发电厂可根据市场情况确定应以发电为主还是供热为主。这种可根据外部环境变化转换生产要素或输出产品的能力就构成了转换期权。文献[11]利用 ROA 对调峰电厂的期权价值进行了评估,考虑了以燃气代替燃油和从调峰电厂转化为基荷电厂的可能性,以及增加利用电厂余热等多种选择。这些不同的选择对发电厂的长期发展具有重要影响。通过采用转换期权,可以对原来不能定量分析的潜在机会的价值量化,为决策提供依据。

3.6 差价期权与发电资产的价值评估

发电设备生产电能的过程是将一次能源转换为电能的过程,因而电价与一次能源的价格差是电力市场参与者谋取利润和对冲风险的基础,也正是这一价格差决定了发电资产的经济价值。文献[2]以电力市场与天然气市场的价格差为基础,首先构造了一种新型期权(exotic options),即 SSO(spark spread option)。

SSO 的价值与机组的热耗率相关,热耗率越低,燃料价格越低,电价越高,则 SSO 的值越大。机组每生产 1 MW·h 的电能,其收益为:

$$\pi = \max(P^E - HP^F, 0) \quad (8)$$

式中: P^E 为电能的价格; P^F 为一次能源的价格; H 为机组的热耗率。

当给定现货电价与燃料价格时,发电公司将对机组是否运行进行决策。显然,仅当 $P^E \geq HP^F$ 时才运行机组。

拥有一个电站相当于持有一系列差价买权^[5~8,43],买权的“约定热耗率”等于机组的运行热

耗率,这意味着可以用金融领域的相关理论来研究电站或机组的价值。用 $E_0(\cdot)$ 表示对括号中的表达式取期望值,并折算到期初,则在一段时间 $[0, T]$ 内,机组价值为^[10]:

$$V = \sum_{t=1}^T E_0 [\max(P_t^E - HP_t^F, 0)] \quad (9)$$

文献[2]用 B-S 模型计算 SSO 的价值。通过算例分析发现:如果忽略期权的价值,而仅用传统的折现现金流方法,电站价值将被低估近 20%。

由于峰荷电厂可以对市场电价和需求的变化做出快速的反应,文献[6]把电站的运行利润用一系列买权来表示,并用 B-S 模型进行估价。结果表明,峰荷燃油/气机组比腰荷燃煤机组更有投资价值,而传统算法更倾向于边际成本较小的燃煤机组。

文献[7]利用欧式期权的相关理论,研究了发输电资产的价值问题,定义了发电欧式 SSO 买权和卖权。由于输电资产的价值取决于不同区域的市场电价差额,故该文同时对区域 SSO 买权和卖权做了定义。进而分别在电价与一次能源价格服从 GBM 随机过程和均值回归随机过程的假定下推出了 SSO 的价值,并以此为基础给出发电资产和输电资产的价值评估过程。分析结果表明,基于期权方法得到的资产价值高于传统折现现金流方法得到的价值。

文献[44]建立了考虑旋转备用的发电资产实物期权模型,目标函数为:使得发电公司能够在某段时间内,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,收益最大化。模型还计入了机组的启停机时间限制、启停成本限制等技术约束。

期权类型不同,其定价方法一般也不同。当项目所含的期权结构比较单一,或期权之间的相关性较弱时,可直接利用解析方法的 B-S 期权定价模型求解。否则,可利用动态规划方法或 Monte-Carlo 仿真方法求解。

4 有待进一步研究的课题

ROA 借鉴了金融期权的思想,为投资者提供了一种比较独特和科学的辅助决策工具。然而,在应用 ROA 解决实际问题时仍存在下述需要进一步研究的课题。

首先,金融期权的维持成本为 0。也就是说,一旦获得了金融期权,就可以在不必支付其他成本的情况下,在到期日以合约规定的价格执行期权。然而,实物期权却并非如此。例如,对于多阶段投资决策问题,如果推迟投资以等待更有利的时机,则有可能造成未来投资时原材料、工资等成本上涨,市场被竞争对手占领所造成的投资成本增加或收益减少,

以及推迟投资所造成的当前收入减少等。

其次,与金融期权不同,实物期权一般不具备独占性^[21]。只有当投资机会对于竞争对手来说存在很高的进入壁垒时,才可以忽略竞争对手的反应,近似认为具有独占性。在很多场合,一个投资机会可能同时被多个竞争者所拥有,此时实物期权的执行价值不再仅仅是项目价值与投资成本之差,而与竞争对手的反应也有关系。这正是期权博弈理论所要解决的问题^[45~48]。期权博弈理论是在采用期权定价理论对项目价值进行评估的同时,利用博弈论的思想和方法,对项目投资进行科学管理与决策的理论与方法。文献[46]认为:在完全竞争的行业中使用期权博弈方法所取得的结果一般与 NPV 法相差不大;而在完全垄断行业中就更没有必要应用期权博弈理论,此时应用实物期权理论更为合适;期权博弈理论最适合应用于寡头垄断行业。文献[48]针对双寡头动态博弈的情况,给出了一个粗略的决策准则。但目前为止,期权博弈理论的研究尚处于起步阶段,要达到实用的程度尚需要做大量的研究工作。

此外,当投资者拥有多个实物期权时,各期权之间可能存在着先后关联性。此时,一个实物期权的价值不仅取决于其自身的特征,而且还与其他尚未执行的期权的价值有关,相当复杂。

5 结语

具有灵活性的投资决策在现实生活中普遍存在。在期权理论产生之前,人们无法准确估计各种机会的灵活性的价值。实物期权理论在投资决策中的应用,解决了对这些灵活性的价值进行评估的问题,使人们能够定量掌握这些无形机会的价值,有助于更好地决策。

随着电力工业放松管制和市场化运营的逐步推广与深入,发电投资将趋于分散化和多元化。由于电力市场中存在大量的不确定性因素,且电力投资具有资本密集性和不可逆性等特征,因而很有必要考虑采用具有灵活性的投资方案。这种灵活性是有价值的,而实物期权方法可以很好地对这种灵活性进行估价,因而很适于电力投资决策分析。随着对与实物期权相关的理论、模型、方法及算法研究的不断深入,以及电力工业改革的逐步推进,可以预料实物期权理论在电力工业中将有很好的应用前景。

参考文献

- [1] AMRAM M, KULATILAKA N. 实物期权:不确定环境下的战略投资管理. 张维,译. 北京:机械工业出版社,2001.
- AMRAM M, KULATILAKA N. Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World. ZHANG Wei,

- Trans. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [2] HSU M. Spark Spread Options Are Hot! The Electricity Journal, 1998, 11(2): 28—39.
 - [3] MIN K J, WANG C H. Generation Planning for Inter-related Generation Units: A Real Options Approach. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2000 Summer Meeting, Vol 4. Seattle(WA, USA): 2000. 2261—2265.
 - [4] WANG C H. Generation Planning for Electric Power Utilities Under Market Uncertainties: A Real Options Approach, Doctoral Dissertation. Ames (IA, USA): Iowa State University, 2001.
 - [5] SHIJIE D, JOHNSON B, SOGOMONIAN A. Spark Spread Options and the Valuation of Electricity Generation Assets. In: Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Vol 3. Wailea (HI, USA): 1999. 1—7.
 - [6] FRAYER J, ULUDERE N Z. What Is It Worth? Application of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets. The Electricity Journal, 2001, 14(8): 40—51.
 - [7] DENG S J, JOHNSON B, SOGOMONIAN A. Exotic Electricity Options and the Valuation of Electricity Generation and Transmission Assets. Decision Support Systems, 2001, 30(3): 383—392.
 - [8] POATS R S. The Spark Spread as a Measure of Wholesale Electricity's Economic Reliability. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2002 Winter Meeting, Vol 2. New York (NY, USA): 2002. 967—968.
 - [9] GITELMAN G. Use of Real Options in Asset Valuation. The Electricity Journal, 2002, 15(9): 58—71.
 - [10] CHUNG L T, BARZ G. Short-term Generation Asset Valuation: A Real Options Approach. Operations Research, 2002, 50(2): 297—310.
 - [11] 王晓巍. 不确定性条件下投资项目实物期权的研究——TC 调峰电厂案例中的柔性期权分析.[硕士学位论文]. 上海: 上海财经大学, 2003.
WANG Xiao-wei. Study of Real Options of Project Invested Under Uncertainty——Analysis on Flexibility Options in TC Peak Shaving Power Plant, Thesis. Shanghai: Shanghai Financial University, 2003.
 - [12] KEPPO J, LU H. Real Options and a Large Producer: The Case of Electricity Markets. Energy Economics, 2003, 25(5): 459—472.
 - [13] 李开海, 王旭, 蒋燕. 期权理论在电源规划投资模型中的应用. 现代电力, 2003, 20(3, 4): 129—132.
LI Kai-hai, WANG Xu, JIANG Yan. Application of Option Theory in Investment Model of Generation Expansion Planning. Modern Electric Power, 2003, 20(3, 4): 129—132.
 - [14] 吉兴全, 文福拴. 发电投资的实物期权决策方法. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 1—5.
JI Xing-quan, WEN Fu-shuan. A Real Option Approach to Generation Investment Decision-making in Electricity Market Environment. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 1—5.
 - [15] 姜礼尚. 期权定价的数学模型和方法. 北京: 高等教育出版社, 2003.
JIANG Li-shang. Mathematical Modeling and Methods of Option Pricing. Beijing: Higher Education Press, 2003.
 - [16] VONNEGUT A. Real Option Theories and Investment in Emerging Economies. Emerging Markets Review, 2000, 1(1): 82—100.
 - [17] YEO K T, QIU F S. The Value of Management Flexibility——A Real Option Approach to Investment Evaluation. International Journal of Project Management, 2003, 21(4): 243—250.
 - [18] KORKEAMAKI T, MOORE W T. Capital Investment Timing and Convertible Debt Financing. International Review of Economics and Finance, 2004, 13(1): 75—85.
 - [19] AVINASH K D, ROBERT S P. 不确定条件下的投资. 朱勇, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
AVINASH K D, ROBERT S P. Investment Under Uncertainty. ZHU Yong, Trans. Beijing: China Renmin University Press, 2002.
 - [20] COX J C, ROSS S A, RUBINSTEIN M. Option Pricing: A Simplified Approach. Journal of Financial Economics, 1979, 9(7): 229—263.
 - [21] 茅宁. 期权分析: 理论与应用. 南京: 南京大学出版社, 2002.
MAO Ning. Options Analysis: Theory and Application. Nanjing: Nanjing University Press, 2002.
 - [22] BUSBY J S, PITTS C G C. Real Options in Practice: An Exploratory Survey of How Finance Officers Deal with Flexibility in Capital Appraisal. Management Accounting Research, 1997, 8(2): 169—186.
 - [23] MORK E. Emergence of Financial Markets for Electricity: A European Perspective. Energy Policy, 2001, 29(1): 7—15.
 - [24] CATER J C. Valuing Options for Electric Power Resources. The Electricity Journal, 1995, 8(3): 43—49.
 - [25] GHOSH K, RAMESH V C. An Options Model for Electric Power Markets. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1997, 19(2): 75—85.
 - [26] DAVISON M, ANDERSON C L, MARCUS B et al. Development of a Hybrid Model for Electrical Power Spot Prices. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 257—264.
 - [27] KARAN B. Value of an Option to Purchase Electric Power——The Case of Uncertain Consumption. Energy Economics, 2002, 24(2): 121—137.
 - [28] DENG Shi-jie, XIA Zhen-dong. Pricing the Hidden Options in Power Contracts: A Case with Tolling Agreements. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol 2. Toronto (Canada): 2003. 869—873.
 - [29] BLENMAN L P, CLARK S P. Power Exchange Options. Finance Research Letters, 2005, 2(2): 97—106.
 - [30] HOGAN W W. Contract Networks for Electric Power Transmission. Journal of Regulatory Economics, 1992, 4(3): 211—242.
 - [31] GEDRA T W, VARAIYA P P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 122—128.
 - [32] GEISS C G. Pricing Residential Load Shedding as a Call Option. Energy, 1998, 23(4): 309—316.
 - [33] KAMAT R, OREN S S. Exotic Options for Interruptible

- Electricity Supply Contracts. *Operations Research*, 2002, 50(5): 835—850.
- [34] OREN S S. Integrating Real and Financial Options in Demand-side Electricity Contracts. *Decision Support Systems*, 2001, 30(3): 279—288.
- [35] 张显,王锡凡,王建国,等. 可中断电力合同中新型期权的定价. *中国电机工程学报*, 2004, 24(12): 18—23.
ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue et al. Pricing for Exotic Option of Interruptible Electricity Contracts. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(12): 18—23.
- [36] RASHIDINEJAD M, SONG Y H, JAVIDI M H. Option Pricing of Spinning Reserve in a Deregulated Electricity Market. *IEEE Power Engineering Review*, 2000, 20(7): 39—40.
- [37] 高志华,任震,黄雯莹. 电力市场中调峰权及其交易机制. *中国电机工程学报*, 2005, 25(5): 88—92.
GAO Zhi-hua, REN Zhen, HUANG Wen-ying. Peak Regulation Right and the Corresponding Transaction Mechanism in Electricity Market. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(5): 88—92.
- [38] SARKAR S. On the Investment-uncertainty Relationship in a Real Options Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2000, 24(2): 219—225.
- [39] BOTTERUD A, ILIC M D, WANGENSTEEN I. Optimal Investments in Power Generation Under Centralized and Decentralized Decision Making. *IEEE Trans on Power Systems*, 2005, 20(1): 254—263.
- [40] VENETSANOS K, ANGELOPOULOU P, TSOUTSOS T. Renewable Energy Sources Project Appraisal Under Uncertainty: The Case of Wind Energy Exploitation Within a Changing Energy Market Environment. *Energy Policy*, 2002, 30(4): 293—307.
- [41] MOREIRA A, ROCHA K, DAVID P. Thermopower Generation Investment in Brazil—Economic Conditions. *Energy Policy*, 2004, 32(1): 91—100.
- [42] TEISBERG E O. An Option Valuation Analysis of Investment Choices by a Regulated Firm. *Management Science*, 1994, 40(4): 535—548.
- [43] CHUNG L T. Exercising Real Unit Operational Options Under Price Uncertainty. In: *Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting*, Vol 1. Singapore: 2000. 436—440.
- [44] 马歆,刘涌,侯志俭,等. 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). *继电器*, 2004, 32(23): 1—4.
MA Xin, LIU Yong, HOU Zhi-jian et al. A Study of Real Options Model of Operating Capital Value of Generator for Spinning Reserve and Short-term Risk Assessment Part One. *Relay*, 2004, 32(23): 1—4.
- [45] GRENADIER S R. Strategic Exercise of Options: Development Cascades and Overbuilding in Real Estate Markets. *Journal of Finance*, 1996, 51(5): 1653—1679.
- [46] 安瑛晖,张维. 期权博弈理论的方法模型分析与发展. *管理科学学报*, 2001, 4(1): 38—44.
AN Ying-hui, ZHANG Wei. Analysis and Development of the Method and Model of Option-game Theory. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(1): 38—44.
- [47] 戚译,朱秀君. *经济博弈论*. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
QI Yi, ZHU Xiu-Jun. *Economic Game Theory*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
- [48] 高强. 期权博弈理论在企业项目投资中的应用; [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
GAO Qiang. Application of Option Game Theory in Project Investment, Thesis. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.

吉兴全 (1970—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力市场与电力系统规划. E-mail: xqji@sohu.com

文福拴 (1965—), 男, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力市场及电力系统故障诊断方面的研究工作. E-mail: fushuan.wen@gmail.com

Real Options Approach and Its Applications in Power Systems

JI Xing-quan¹, WEN Fu-shuan²

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

(2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The power industry in many countries around the globe is now on the way of deregulation and restructuring so as to introduce competition and build a competitive market for power supply, and this will introduce more uncertainties in investment decision-making. The traditional net present value (NPV) method has been most widely used for evaluating investment opportunities in many areas. However, the NPV method cannot take the managerial flexibility of investment decision-making into account. Recently, the real options approach (ROA) has attracted quite a lot of attention as a powerful approach for addressing this problem, and it has already been applied in power system investment decision-making. The fundamental concept of ROA is described first. Then, currently available real options pricing methods are briefly surveyed. Finally, the applications of ROA in power systems are reviewed, and some interesting topics which require further research efforts are clarified.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905), the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-04-0818) and Postdoctoral Science Foundation of China (No. 2003034512).

Key words: generation investment; real options; electricity market