

发电投资的实物期权决策方法

吉兴全¹, 文福拴²

(1. 浙江大学电力经济与信息化研究所, 浙江省杭州市 310027; 2. 香港大学电机电子工程学系, 香港)

摘要: 电力工业的市场化改革为发电投资决策引入了更多的不确定性因素, 从而对决策的灵活性提出了更高的要求。针对传统发电规划方法难以处理对决策有灵活性要求的问题, 文中提出将发电投资项目的灵活性表示为一种有价值的实物期权, 运用 Black-Scholes (B-S) 期权定价模型对发电项目的延迟投资决策进行估价, 在相当程度上避免了传统的发电投资决策方法依赖项目的净现值而对诸多实物期权价值只能凭主观判断的缺点, 能够计及灵活性要求, 做出更合理的投资决策。

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

传统的发电规划作为整个电力系统规划的一部分, 已有相当长的研究历史, 国内外已经发展了成熟的理论、方法和算法。一般过程为: 首先根据规划期内的负荷预测数据, 形成等值负荷曲线; 然后, 在满足系统可靠性指标 (通常用失负荷概率表示) 要求的前提下, 计及发电机组的可用率 (主要是强迫停运率) 和检修计划安排, 以给定时期 (一般为发电机组的寿命期) 内发电生产总成本最小为目标, 采用随机生产模拟方法对方案进行优选。必要时, 还需与输电规划相协调。电力工业改革后, 发电规划的主体由整个电力系统的规划部门转变为各独立的发电公司, 能否取得适当的利润甚至能否回收投资成本取决于发电公司在市场中所处的竞争位置及其所采用的运营策略。发电公司或投资者在进行发电投资和规划决策时, 一般无法得到其他发电公司或其他投资者关于未来的发电投资或规划方面的信息, 这些变化使得原有的规划方法不再有效, 亟须新的理论和方法来辅助发电公司进行投资决策, 其中最关键的是如何合理地估算发电公司在发电机组寿命期内的利润及相应的风险。

在传统的发电投资规划决策中, 大多采用净现值 (NPV——net present value) 方法对发电机组寿命期内各阶段 (如每年) 的 (估计) 收益按给定的折现率折算到现值, 然后与投资成本进行比较。在电力市场环境下, 基于 NPV 法的长期发电投资规

划决策方法不再适用。一方面, 如何计及风险的影响对贴现率进行适当调整是一个难题。事实上, 由于发电机组的寿命期一般相当长, 这样在此期间经济环境可能会发生明显的变化, 相应地贴现率也会发生变化。如果对发电机组的整个寿命期内采用单一的贴现率评估其收益, 可能会有很大的误差, 以此为基础进行发电投资决策也可能导致相当大的投资风险。另一方面, NPV 法是通过直接预测未来的现金流来确定投资方案, 其隐含地假定了投资者会按既定方案一直执行下去, 这忽略了在执行既定决策过程中投资者的能动性。事实上, 随着时间的推移, 真实的现金流可能会偏离预测值, 同时, 原来的不确定性因素可能会逐步明朗化, 此时决策者可能会根据当时的市场条件和所获得的新信息对投资方案进行调整, 如扩展投资、延迟投资和放弃部分投资等, 这种调整会使原来用 NPV 方法计算的投资方案的净现值失去意义。以上两方面的问题在传统的电力系统规划模式下并不突出, 因为无论发电投资规划方案是否合理, 政府相关部门或监管机构会保证成本的回收和合理的利润。

针对 NPV 方法所存在的这些缺陷, 经济学家做了大量的探索, 提出了许多方法, 其中以罗伯特·默顿为代表的一些学者所提出的实物期权法 (ROA——real options approach)^[1] 最为引人注目, 其提供了一种比较独特和科学的决策思维方式。由于 NPV 方法的最大弱点在于不能为管理灵活性和不确定性定价, 而金融期权的概念恰好能够反映决策灵活性和不确定性的价值, 因而被引入到投资项目的决策分析之中。

期权 (option) 可以使其持有方在避免标的资产价值风险产生的不利后果的同时利用其有利的变

收稿日期: 2005-01-12。

中国博士后科学基金资助项目 (2003034512); 香港政府研究资助局 (RGC) 资助项目 (HKU 7171/04E)。

动趋势,这种收益和损失的不对等性形成了期权的价值内涵,既保证了高风险所带来的高收益,又能将损失控制在一定的程度内。ROA 正是借鉴期权的思想将人们在实际决策过程中所具有的灵活性用期权模型来表示,并能够准确给出这种灵活性的价值。

ROA 在电力投资规划中有着十分广阔的应用前景,但到目前为止这方面的研究工作仍然相当初步。文献[2,3]提出了基于二叉树的多相关项目多期权投资模型,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。但这种方法是以项目价值服从几何布朗运动为前提的,而对于发电投资规划问题,这一前提未必成立。基于期权理论,文献[4]定性分析了新建电厂对市场电价的影响。文献[5]针对电力市场环境下的发电规划问题,构造了一种延期期权模型,但并未从整体上给出基于实物期权方法的发电投资规划方案。在此背景下,本文将 ROA 方法应用到发电投资决策之中,把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最优投建时间。

1 实物期权方法

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)一定数量的标的资产的权利(而不是义务)[1,6]。

期权意味着相机决策(contingent decisions),即它允许人们根据市场条件的变化而采取不同的行动。在决策时刻,假如情况比预期要好或估计会向好的方向发展,则应该执行期权,否则可以放弃期权。可见,作为规避风险并可从中获利的一种金融工具,期权特别适合于不确定性因素较多的市场环境。期权为人们应对市场风险提供了能动性和灵活性。然而,怎样定量分析期权的价值曾是困扰经济界和数学界的难题。美国经济学家 Black 和 Scholes 在 1973 年根据无套利原则,推导出欧式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”[6],并因此获得了 1997 年度诺贝尔经济学奖。B-S 模型可表示为:

$$V = SN(d_1) - Le^{-rt}N(d_2) \quad (1)$$

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

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T} \quad (3)$$

式中: V 为期权价值; S 为标的股票价格; L 为执行价格; T 为期权有效期; r 为无风险利率; σ 为标的股

票波动率; $N(x) = P\{X \leq x\}$, $X \sim N(0, 1)$ 为标准正态分布的概率分布函数。

可见,影响期权价值的因素有 5 个,如表 1 所示。这样,给定期权的 5 个参数,就可由 B-S 模型计算其价值。

表 1 影响期权价值的 5 个要素
Table 1 Five factors related to the value of options

参数	期权价值
标的股票价值 S	+
执行价格 L	-
波动率 σ	+
有效期 T	+
无风险利率 r	+

注:“+”和“-”分别表示正相关和负相关。

与金融投资一样,项目投资中同样存在类似的选择权,决策者可根据环境的变化做出不同的选择,如市场好转时选择继续或扩大投资,市场不利时缩小或放弃投资。这种可根据环境条件的变化调整投资决策的行为与金融市场中的期权所起的作用十分相似,这促使人们用相对成熟的期权分析理论来研究实际项目的投资,从而产生了实物期权方法,简称 ROA。这种方法的基本思想为:把实际的投资项目看做一系列期权的组合,从而可以把项目价值的分析转变为对一系列期权价值的分析[7~10]。如前所述,有 5 个要素与期权价值有关,类似地,也有 5 个要素影响投资项目的实物期权价值。它们之间的参数对应关系如表 2 所示。

表 2 金融期权与实物期权的对照
Table 2 Comparisons of financial options and real options

参数	金融期权	实物期权
S	股票当前价格	项目预期实现的收益现值
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

可见,ROA 对标的资产的相关信息要求很少,仅需知道其当前价值和价值的波动性,而与任何一个预测型变量相比,波动性随时间变化的稳定性一般更好。此外,ROA 方法中使用无风险利率,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。实物期权定价不需要完成实际的交易,只是利用期权的思想和方法对投资机会进行估价。

2 发电投资的延迟投资期权模型

发电投资具有投资规模大、回收期长的特点,因而具有很强的市场进入壁垒。这样,新的发电投资

项目即使通过净现值方法分析是可行的,投资者也不一定会立即投资。因为一方面融资环境和能源政策等因素在相当长的时期内可能存在明显的不确定性,另一方面投资机会不会在短时间内消失。面对未来大量的不确定性因素,投资者总是会谨慎地选择一个有利的进入时机,这种在投资时间上的推迟就构成了延迟投资期权。

按照实物期权理论,某发电投资方案的价值即为与该方案对应的延迟投资期权的价值。期权价值越高,意味着该方案价值“看涨”的可能性越大,就越值得投资,但在方案确定的年份是否一定会投资,则取决于当时的市场条件。

延迟投资期权的参数 S, L 和 r 的含义与表 2 中实物期权的含义相同,而投资机会持有期 T 即为方案所确定的投资年份,波动率 σ 可由统计或仿真方法确定,作为初步研究,本文没有考虑 σ 的确定方法。

显然,对于同一个投资项目,不同的投资年份得到的实物期权价值是不同的。由于期权价值与时间具有正相关性,这样项目推迟的时间越长,由 ROA 方法得到的项目的价值就越大,但与此同时,由于项目推迟而引起的潜在的收益损失也就越多,因而对项目投资问题而言应存在一个最佳的投资时机。面对多个可选的投资项目,如何确定各项目的最优投资时间(年份)是确定最终投资方案的关键。

设某发电公司或投资者有 n 个待选项目(为便于论述,假定一个待选项目只包含 1 台机组),机组 i 的投资成本为 L_i ,寿命期内可实现的期望收益为 S_i ,发电公司投资决策的目标为使各项目的延迟期权的总价值最大,其目标函数和约束条件分别为:

$$\max \sum_i z_i V_i(t_i, S_i, L_i, \sigma_i, r) \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_i z_i L_i \leq B \quad (5)$$

式中:

$$V_i = S_i(t_i) N(d_{i1}) - L_i e^{-r t_i} N(d_{i2}) \quad (6)$$

$$d_{i1} = \frac{\ln \frac{S_i(t_i)}{L_i} + \left(r + \frac{\sigma_i^2}{2}\right) t_i}{\sigma_i \sqrt{t_i}} \quad (7)$$

$$d_{i2} = d_{i1} - \sigma_i \sqrt{t_i} \quad (8)$$

V_i 为项目 i 的期权价值;约束条件为资金预算约束; B 为可用资金; t_i 和 z_i 为自变量, t_i 为项目 i 的投运年份, z_i 为 0-1 决策变量, $z_i = 1$ 和 $z_i = 0$ 分别表示投资和不投资项目 i 。

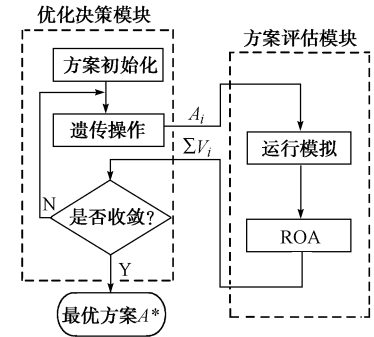
项目 i 的期望收益 $S_i(t_i)$ 可通过电力市场运行模拟得到,如式(9)所示。电力市场运行模拟是以联

营体模式为基础,采用节点电价,计及了网络的容量约束,并假定发电公司按边际成本报价。具体模型详见文献[11]。通过运行模拟可以得到规划期内各时段的节点电价,进而得到 $S_i(t_i)$:

$$S_i(t_i) = \sum_{t=t_i}^{T_i} \sum_{h=1}^H \gamma_i(t, h) P_i(t, h) \quad (9)$$

式中: T_i 为项目 i 的寿命周期; H 为每年的仿真时段总数; $\gamma_i(t, h)$ 为第 t 年第 h 个时段机组 i 所在节点的电价; $P_i(t, h)$ 为相应的机组有功出力,此处仅考虑有功电价。

显然,由式(4)~式(9)所表示的优化问题属于非线性整数规划,需通过数值方法求解,本文采用改进的遗传算法求解。求解框图如图 1 所示,其中包括 2 个模块,即优化决策模块和方案评估模块。前者主要用遗传算法给出待选方案,并逐代优选直至收敛;后者则通过电力市场运行模拟计算给定方案的期望收益,并进一步得到对应的实物期权价值,之后再反馈给优化决策模块。



A_i 表示待选方案; V_i 为期权价值

图 1 优化程序框图

Fig. 1 Program flowchart

在用遗传算法求解上述优化问题时,适应度 v 由目标函数加惩罚项构成。惩罚项用于计入资金预算约束。

$$v = \sum_i z_i V_i + \alpha b + \beta \sum_i q_i \quad (10)$$

$$q_i = \begin{cases} 0 & V_i > 0 \\ S_i - L_i & V_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: v 为个体适应度; α 和 β 为惩罚系数; $b = \min(0, B - \sum_i z_i L_i)$ 为资金约束项。

由于期权价值具有非负性^[12],这样当项目收益 S_i 小于投资成本 L_i 时,期权价值总为 0,这就无法区别项目亏损的程度。为此,在式(10)定义的适应度函数中增加惩罚项 $\beta \sum_i q_i$,以区别不同的亏损情况。

3 算例

以图 2 所示的某 30 节点系统为例对所提出的方法进行测试。设每个负荷节点的负荷的年增长率均为 3.5%，无风险利率为 10%，发电机组的寿命周期均为 15 年，其他参数见文献[11,13]。假设某发电公司拟投资兴建新机组，有 4 种机组可供选择，表 3 列出了已有和待选的机组参数，其中 G-1~G-6 为现有机组；G0~G3 为待选机组。

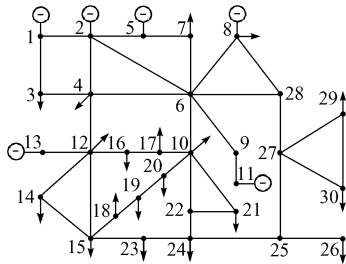


图 2 30 节点系统
Fig. 2 A 30-bus system

表 3 机组参数
Table 3 Parameters of generating units

机组名	节点号	容量/ MW	边际成本/ (美元·(MW·h) ⁻¹)	投资成本/ 10 ⁶ 美元	波动率
G-1	1	80	10	—	—
G-2	2	100	12	—	—
G-3	5	100	14	—	—
G-4	8	60	16	—	—
G-5	11	60	20	—	—
G-6	13	60	12	—	—
G0	1	100	10	200	0.1
G1	5	60	14	140	0.2
G2	8	80	26	60	0.3
G3	11	160	18	1200	0.2

首先，假设这 4 台待选机组均在规划的起始年投入，经电力市场运行模拟计算得到各机组的期望收益和净现值，结果如表 4 所示。

表 4 净现值与期权价值的比较
Table 4 Comparisons of NPV and options value

机组	NPV ($t=0$)		ROA	
	期望收益/ 10 ⁶ 美元	净现值/ 10 ⁶ 美元	期权价值/ 10 ⁶ 美元	投运时间/ 年
G0	20.3	-179.7	0	—
G1	180.1	40.1	117.8	9
G2	155.2	95.2	105.9	3
G3	560.4	-639.6	296.2	15

然后按本文提出的延迟期权方法进行优化计算，遗传算法经 20 代后收敛，得到的最优投资方案和对应的期权价值见表 4。从表 4 中可见，机组 G1 和 G2 的净收益虽然为正，但并不马上投建，而是分

别推迟 9 年和 3 年，这样得到的机会价值大于马上投建的净收益，而机组 G3 的净收益虽然为负值，但其等待 15 年后的机会价值为正，仍有投资价值，原因就在于实物期权与时间的正相关性。

固定其他参数不变，改变机组 G1 的波动率，分别计算其对应的实物期权价值，如图 3 所示。图中同时给出了在第 9 年投入 G1 时的净现值。

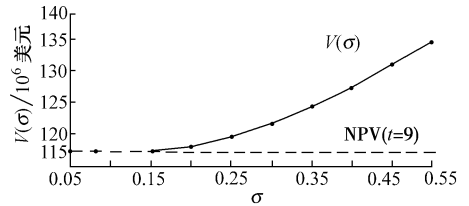


图 3 $V(\sigma)$ 与 NPV 的比较
Fig. 3 Comparisons of $V(\sigma)$ and NPV

可见，当 σ 较小时，ROA 法与 NPV 法得到的结果十分接近。此时，投资者认为市场前景比较明朗，未来的决策过程与既定的投资方案应该基本吻合，无需调整投资方案，因而在这种环境下体现不出决策的灵活性的价值。随着 σ 的增大，市场不确定性程度加大，方案对应的实物期权价值显著增加。这是由于实物期权价值包含了项目的灵活性价值，在第 9 年的决策中，投资者可根据市场条件的变化决定是否执行原定的投资方案，这符合人们的一般理念。另一方面，NPV 法则总是假定未来的投资过程一直按原定的方案进行，因而无法计及项目投资决策过程中的灵活性价值。

4 结语

随着电力工业放松管制和市场化改革的逐步深入，发电投资将趋于分散化和多元化。由于电力市场中存在着大量的不确定性因素，且发电投资具有资本密集性和不可逆性，这样选择有利的投资时机对发电投资者就十分重要。本文尝试将实物期权方法应用于发电投资决策，建立了发电投资项目延迟决策的实物期权模型，可以得到最佳的投资时间，较好地计入了投资灵活性所具有的价值，体现了人们面对不确定因素时的能动性。

与金融期权不同，实物期权一般不具有独占性，只有当投资机会对于竞争对手而言进入壁垒很高时，才具有近似的独占性，方可忽略竞争对手的反应。一般情况下，多个投资者可以同时竞争一个投资机会，此时实物期权的价值不再是项目价值与投资成本的差额，而是与竞争对手的投资决策有关。此外，当某发电公司拥有多个实物期权时，各期权之

间在时间上存在着先后关联性,一个实物期权的价值不仅仅取决于其自身的特征,而且与其他尚未执行的期权价值有关。这将是我們今后的研究课题。

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] 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.
- [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 Summer Meeting, Vol 4. Seattle(WA, USA): 2000. 2261—2265.
- [4] KEPPON J, LU Hao. Real Options and a Large Producer: The Case of Electricity Markets. Energy Economics, 2003, 25(5): 459—472.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] VONNEGUT A. Real Option Theories and Investment in Emerging Economies. Emerging Markets Review, 2000, 1(1): 82—100.
- [8] 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.
- [9] KORKEAMAKI T, MOORE W T. Capital Investment Timing and Convertible Debt Financing. International Review of Economics and Finance, 2004, 13(1): 75—85.
- [10] 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.
- [11] 王成山, 吉兴全. 输电网合作投资的费用分摊方法. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 22—26.
WANG Cheng-shan, JI Xing-quan. Allocation of Transmission Investment Cost Using Cooperative Game Theory. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 22—26.
- [12] 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.
- [13] SUNH B, YU D C, XIE Y S. Application of Fuzzy Set Theory to Power Flow Analysis with Uncertain Power Injections. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 2. Singapore: 2000. 1191—1196.

吉兴全(1970—), 男, 博士, 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, 博士, 主要从事电力市场及电力系统故障诊断方面的研究工作。

A Real Option Approach to Generation Investment Decision-making in Electricity Market Environment

JI Xing-quan¹, WEN Fu-shuan²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The world-wide power industry restructuring has introduced more uncertain factors for generation investment decision-making, and hence more flexibility concerning the investment strategy required. The currently available generation investment decision-making methods developed for the traditional regulated power industry could not well meet the flexibility requirement encountered in the electricity market environment. Given this background, a new decision-making method is presented in this paper with generation investment project flexibility regarded as a valuable real option. Based on the well-developed Black-Scholes option pricing theory, a deferment option model of generation investment is developed. This method is more applicable to the generation investment decision-making problem in the electricity market environment than the traditional net present value (NPV) based method.

This work is supported by China Postdoctoral Fellow Science Foundation (No. 2003034512) and the Research Grant Committee (RGC) of Hong Kong Government (No. HKU 7171/04E).

Key words: generation investment; real options; electricity market