



基于实物期权的风力发电侧储能投资决策

杨晓萍 杨凡

Investment Decision of Energy Storage in Wind Power Generation Based on Real Options

YANG Xiaoping, YANG Fan

引用本文:

杨晓萍, 杨凡. 基于实物期权的风力发电侧储能投资决策[J]. 现代电力, 2021, 38(4): 442–448. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0345

YANG Xiaoping, YANG Fan. Investment Decision of Energy Storage in Wind Power Generation Based on Real Options[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(4): 442–448. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0345

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0345>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于区间线性规划和可逼近理想解排序法的园区型综合能源系统投资决策

Application of Interval Linear Programming and TOPSIS to Investment Decision on Integrated Energy System of Industrial Parks
现代电力. 2021, 38(3): 297–306 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0347>

考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法

Parabola Regular Variable Filtering Time Constant Method Considering Energy Storage SOC State to Smooth Wind Power
现代电力. 2020, 37(5): 518–525 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0133>

基于全息风险评估和组合赋权的电网建设项目投资决策方法

Investment Decision Method for Power Grid Construction Projects Based on Holographic Risk Assessment and Combination Weighting
现代电力. 2019, 36(5): 87–94 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/87>

基于信息间隙决策理论的综合负荷聚合商储能优化配置模型

Optimal Configuration of Energy Storage for Integrated Load Aggregator Based on Information Gap Decision Theory
现代电力. 2021, 38(2): 193–204 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0305>

考虑蓄电池SOC安全范围的混合储能平抑风光功率波动策略

Strategy of Hybrid Energy Storage to Stabilize Wind–PV Power Fluctuation Considering Battery SOC Safety Range
现代电力. 2018, 35(3): 84–89 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I3/84>

基于SCADA数据的风力发电机发电性能指标评估

SCADA Data Based Evaluation of Wind Turbine Power Generation Performance Indices
现代电力. 2020, 37(5): 539–543 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0128>

基于实物期权的风力发电侧储能投资决策

杨晓萍, 杨凡

(西安理工大学 电气工程学院, 陕西省西安市 710048)

Investment Decision of Energy Storage in Wind Power Generation Based on Real Options

YANG Xiaoping, YANG Fan

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

摘要: 为弥补将锂电池应用于风力发电系统的储能投资是否可行的分析中存在的不足, 通过贴现现金流量法与实物期权理论的对比, 建立了基于实物期权投资决策框架, 提出了满足几何布朗运动假设的布莱克-舒克斯储能项目实物期权定价模型, 并利用 MATLAB 软件中 Financial Toolbox 工具箱中的价格衍生工具对模型的不确定因素进行了灵敏度分析。案例分析表明将实物期权应用在具有不确定因素的风力发电侧储能项目中, 可以预测未来收益, 为投资者提供灵活的投资方案, 避免投资失误。

关键词: 风力发电; 实物期权; 锂电池储能; 敏感性分析; 投资决策

Abstract: To remedy the insufficiency existed in the analysis on whether the investment decision of applying lithium batteries to the energy storage for wind power generation was feasible or not, firstly, by means of contrasting discounted cash flow (abbr. DCF) and real option (abbr. RO) an investment decision framework based on RO was established. Secondly, a Black-Scholes real option pricing model for energy storage project, which satisfied the geometric Brownian motion hypothesis, was proposed, and the price derivatives in the Financial Toolbox of MATLAB software was utilized to conduct the sensitivity analysis on uncertain factors in the proposed model. Case study results show that applying the real option to the energy storage project at wind power generation side that possesses uncertain factors, the future profit can be predicted, thus it can provide flexible investment plan for the investor to avoid the investment mistake.

Keywords: wind power generation; real options; lithium battery energy storage; sensitivity analysis; investment decision

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0345

0 引言

近年来国家提出的节能环保理念, 促进了一

次能源向新能源转变, 新能源发电出力的随机性和波动性^[1]给电网带来了电能质量变差、电网负荷峰谷差变大、网络拥塞等一系列威胁, 储能技术的发展为解决目前的困境带来了新的思路。

储能主要应用于消纳^[2]、联合调频、调压、削峰填谷^[3]等, 困扰储能市场化推广的因素是设备的检修、维护等成本很难估计; 其次我国电价机制正处于由政府计划管理向市场化改革过渡期, 具有很大波动性^[4]; 另外国家出台的补贴政策对经济性有影响。由于传统的实体价值评估方法难以预测不确定性因素的潜在价值, 因此本文利用实体价值和期权价值之和对尚未盈利的储能项目进行分析, 更合理地对收入和支出进行量化, 预测未来各种变化对经济性带来的影响。文献^[5]在储能投资回收期内利用贴现现金流量法 (discounted cash flow, DCF) 分析了储能经济性并进行敏感性分析, 结果表明以目前技术水平在用户侧应用储能不具有经济性; 文献^[6]利用全寿命周期模型通过动态回收期、内部收益率分析了投资经济性, 并用 Crystal Ball 软件对投资风险进行评估, 为用户侧储能项目建设及投资提供指导; 文献^[7]提出了分布式储能经济性判据, 对比分析铅碳电池和磷酸铁锂电池在削峰填谷应用场景下的经济性并提出了补偿建议; 文献^[8]利用实物期权理论中的延迟型和复合型两种期权模型对风电投资项目进行经济性分析, 弥补了传统分析方法的不足, 为风力发电项目投资决策提供了科学依据; 文献^[9]针对 DCF 的缺点将布莱克-舒克斯 (Black-Scholes, B-S) 定价模型引入到电源的投资决策里, 避免了传统决策方法依赖净现值的缺点, 通过对电源建设项目的期权进行预测, 表明将实物期权理论应用

在电源建设投资决策的可行性；文献 [10] 对比分析 DCF 与实物期权的特点，并将 B-S 应用在知识管理投资项目，结果证明实物期权在分析储能经济性中有可以克服不确定性的优势。

本文针对 DCF 难以预测各种因素变化产生的价值的缺点，以全寿命周期收益模型为基础，计算净现值 (net present value, NPV)，并利用实物期权中的 B-S 定价模型预测延迟执行项目后所带来的期权价值，为投资者在评估投资项目收益时提供有效的依据。

1 建立基于实物期权的投资决策模型

1.1 储能项目中期权定价模型建模步骤

1977 年 Myers 提出实物期权概念 [11]，提出了用期权的概念来对实物投资进行估值，后来 Ross 等人指出在风险投资中可以把投资机会当做一种新型期权—实物期权。实物期权的核心思想是通过规避风险而取得利益，它使投资者对风险较大项目的评价更合理。目前实物期权定价模型主要有以下 3 种方式 [12]：①二叉树模型使用的是数值方法求解，主要针对成长型期权定价；②蒙特卡洛法是利用计算机软件进行大量模拟，然后求取期望值的思路；③B-S 模型通过解析方法直接求解，研究的是延期型实物期权定价。其中二叉树模型使用动态规划原理；蒙特卡洛模型使用模拟思维；B-S 使用偏微分方程解法求取期望值。虽然 B-S 的推导公式繁琐，但是 B-S 方法是基础的理论方法，在求解多因素模型中 B-S 期权定价得到的理论价格更加贴近于市场实际价格，其偏离度小于二叉树定价。应用实物期权理论对风电侧储能项目期权定价按图 1 流程进行。

- 1) 收集风力发电侧储能项目的原始数据；
- 2) 依初始投资相关数据建立资产价值模型；
- 3) 通过 DCF 计算项目的净现值；
- 4) 判断，若净现值大于 0，则进行投资；若净现值小于 0，则进行第 5 步；
- 5) 依据项目中的不确定因素匹配实物期权中对应的定价模型；
- 6) 利用定价模型计算期权价值；
- 7) 将上述小于 0 的净现值与期权价值相加；
- 8) 判断，若扩展净收益大于 0，则进行投资，若小于 0，则放弃投资。

流程图中的项目扩展净现值 (extended net

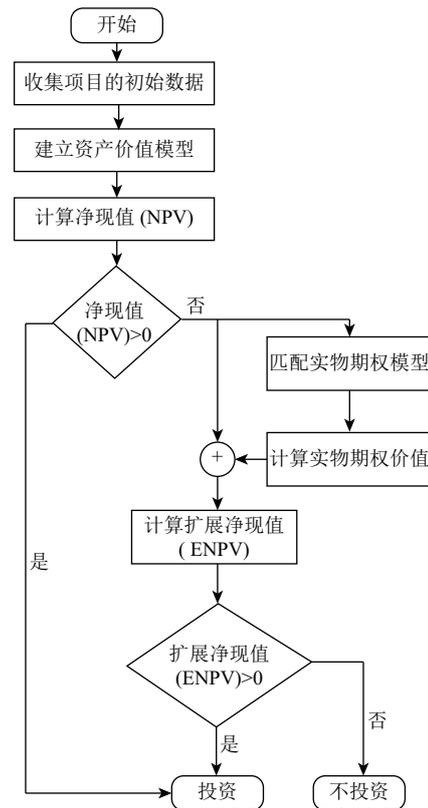


图 1 期权定价流程图

Fig. 1 Flowchart of option pricing

present value, ENPV)，可计算为：

$$E = N + C \quad (1)$$

式中： E 为扩展净现值； N 为储能净收益； C 为期权扩展收益。

1.2 风力发电侧储能项目资产价值模型

储能项目硬件主要包括电池组、功率变换设备、电池管理系统的投资以及项目运行后期的维护费用，所以储能项目投资成本主要包括设备投资成本和运行维护成本 [13]。

1.2.1 储能电池投资成本

储能电池组的投资成本与系统的存储容量和传输功率有关：

$$I_b = k_p \cdot P + k_q \cdot Q \quad (2)$$

式中： I_b 为储能设备初始投资成本； k_p 为储能功率成本系数； P 为额定功率； k_q 为储能容量成本系数； Q 为储能容量。

1.2.2 储能系统维护成本

运行维护成本主要包括电池日常故障预防及消除、定期人工巡检以及运行灯具、冷却和控制设备所需的能源：

$$I_{om} = k_{om} \cdot Q \quad (3)$$

式中： I_{om} 为储能运行维护成本； k_{om} 为单位容量运行维护成本系数。

1.2.3 储能系统初始投资成本

初始投资成本还包括初期土建费用、后期电池置换、废弃处置成本等，这些费用以系数 γ 予以考虑。初始投资成本：

$$I = (1 + \gamma) \cdot I_b + I_{om} \quad (4)$$

1.2.4 储能系统上网电量收益

储能系统的收益主要来源于将限电时段的电能储存并在负荷高峰时释放，从而增加风电场的等效利用小时数来获利，本文对碳排放权、环境收益均不予考虑。储能系统上网电量收益：

$$W = \int_1^n \int_1^{365} \int_{t_0}^t P_M dt dt dt \quad (5)$$

$$S = R \cdot W \cdot \eta \quad (6)$$

式中： W 为 n 年上网电量； P_M 为机组额定功率； S 为上网电量收益； R 为风电标杆上网电价； η 为锂电池的转换效率。

1.2.5 储能系统的残值 S_Z

随着锂电池回收技术发展，锂电池服役结束后，电池正极金属材料可以拆解回收再利用，由于风电场运行周期远大于电池使用寿命，所以功率转换装置、电池管理设备仍然可以在下一批电池中继续使用。除电池在使用过程有少量损失外，其他装置的残值率达30%~40%^[14]。

2 储能项目期权定价模型

2.1 不确定性因素分析

目前投资风电场储能项目的不确定性因素较多，如政策补贴、上网电量、初始投资成本、上网电价、运维成本等。由于地区负荷变化不大所以每年上网电量、运维费用基本稳定，因此本文主要研究储能设备投资成本、上网电价以及利率对投资项目的影

2.1.1 储能初始投资对项目的影

随着储能成本日益下降，电力市场日趋自由化，我国风电储能项目加速普及，已有多个示范项目投入运行，如表1所示。

风电场储能投资成本主要有电池、功率转换设备、基础设施建设费用等，投资成本的随机性波动在金融领域有对应的价格变化模型，这种价格波

表1 国内风光储能示范项目

Table 1 Domestic demonstration project of energy storage for wind power and PV generation

项目名称	省份	储能规模
青海共和450 MW风电配套储能项目	青海	45 MW/90 MW·h
张北风光储能示范工程	河北	19 MW/83.5 MW·h
内蒙红泥井百万千瓦级清洁能源项目	内蒙古	清洁能源1~2 GW
陕西榆林协和风光储智能微网科技项目	陕西	500 kW·h
国家电投官坡风电储能项目	河南	12.4 MW/12.4 MW·h

动满足几何布朗运动^[15]。假设储能硬件的投资成本满足方程：

$$\frac{dI_t}{I_t} = \alpha_I \cdot dt + \delta_I \cdot \Delta z_I \quad (7)$$

式中： t 为投资有效期内的任意时刻； I_t 为 t 时刻的成本； α_I 为投资变动的瞬时期望漂移率； δ_I 为投资变动的波动率； Δz_I 为维纳过程增量。

2.1.2 上网电价对项目的影响

2019年国家发展改革委关于完善风电上网电价政策中规定：陆上风电上网电价全部通过竞争方式确定，不得高于项目所在资源区指导价^[16]。近5年风电上网电价如表2所示。

表2 陆上风电上网标杆电价

Table 2 Benchmarking feed-in tariffs and guided price for onshore wind power

时间分类 (元/kW·h)	陆上风电 1类	陆上风电 2类	陆上风电 3类	陆上风电 4类
2015年标杆电价	0.49	0.52	0.56	0.61
2016—2017年 标杆电价	0.47	0.5	0.54	0.60
2018年标杆电价	0.40	0.45	0.49	0.57
2019年指导电价	0.34	0.39	0.43	0.52
2020年指导电价	0.29	0.34	0.38	0.57

国家根据风电的发展会相应地调整风电上网电价，风电上网电价实行竞价方式与金融市场的损益模型一致，因此同样满足几何布朗运动方程：

$$\frac{dR_t}{R_t} = \alpha_R \cdot dt + \delta_R \cdot \Delta z_R \quad (8)$$

式中： R_t 为 t 时刻上网电价； α_R 为上网电价变动的瞬时期望漂移率； δ_R 为上网电价波动率； Δz_R 为维纳过程增量。

2.2 B-S 期权定价模型

目前储能电池的成本过高、上网电价不断降

低使投资回收期较长，给投资带来壁垒。近年来电池技术不断进步促使成本逐年降低，另一方面新疆、三北地区的电网扩容使风电场的限电时间减少，面对诸多不确定因素，投资者会谨慎选择有利时机实施项目，这种通过时间上延迟来增加项目的收益构成了延迟型实物期权。由于储能项目的初始投资成本 I 和上网电价 R 均符合几何布朗运动，所以风力发电侧储能项目的价值满足几何布朗运动方程：

$$dS_t = (\alpha - \omega) \cdot S_t \cdot dt + \delta \cdot \Delta Z_S \quad (9)$$

式中： S_t 为 t 时刻项目资产收益现值； α 为项目价值的瞬时期望漂移率（价值增长速度的期望值）； ω 为由于延迟投资而使项目造成的报酬亏空率； δ 为项目价值增长瞬时标准差，即价值的波动率； ΔZ_S 为维纳过程增量。

式（9）描述了储能项目的价格变化是随机微分方程，在数学上表现为价格变化率满足对数正态分布，1973年美国经济学家布莱克、舒克斯在伊藤引理^[17-18]的基础上建立了无套利实物期权模型的B-S随机微分方程：

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\delta^2}{2} \cdot S^2 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial S^2} + r \cdot S \cdot \frac{\partial X}{\partial S} - q \cdot S \cdot \frac{\partial X}{\partial S} - r \cdot X = 0 \quad (10)$$

在下列假设条件下^[19]：①项目资产收益率服从对数正态分布；②在期权有效期内，无风险利率且金融资产收益是恒定的；③市场无摩擦，即不存在税收和交易成本；④该期权属于欧式期权，到期才能执行。求得不计红利 q 的B-S随机微分方程的显性解：

$$C = S \cdot N(d_1) - X \cdot e^{-rT} \cdot N(d_2) \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r + \frac{\delta^2}{2}\right) \cdot T}{\delta \cdot \sqrt{T}} \quad (12)$$

$$d_2 = d_1 - \delta \cdot \sqrt{T} \quad (13)$$

式中： C 是投资项目的期权价值； S 是项目的收益现值； X 是项目的投资成本； T 是项目有效期； r 是无风险利率； δ 是项目投资回报收益的波动率； $N(\cdot)$ 是标准正态分布的累计概率分布函数。

3 算例分析

新疆地区风资源丰富，属于一类风资源，全年等效满发小时数2600~3100h之间，大唐新疆

某风电场装设33台1.5MW风力发电机组，风电场计划5MW/10MW·h的储能系统，以上网2850h估算，按全年10%限电量储存。2019年一类区域的风电上网电价0.34kW·h，采用磷酸锂电池预制舱户外布置方式，电池的转换效率 $\eta=90\%$ ，循环1000~3000次，一充一放模式设备使用年限 $T=8a$ ，勘测费、基础建设费用651.9万元，设备采购3758.8万元，综合总投资4410.7万元，期望收益率10%，全寿命周期内每年平均运维费1.1%，无风险利率 $r=4.1\%$ ， $\delta=15\%$ 。

3.1 储能系统上网电量收益

利用公式（5）、（6）计算上网电量产生的收益：

$$S = R \cdot W \cdot \eta \cdot 10\% = R \cdot \int_1^n \int_1^{365} \int_{t_0}^t P dtdt \cdot 90\% \cdot 10\% = 0.34 \text{元kW} \cdot \text{h} \times 50000 \text{kW} \times 2850 \text{h} \times 90\% \times 10\% \times 8a = 3488.4 \text{万元}$$

3.2 使用DCF计算储能项目净收益

$$S + S_z - I_{om} = 3488.4 \text{万元} + 30\% \times 3758.8 \text{万元} - 4410.7 \text{万元} \times 1.1\% \times 8 = 4227.898 \text{万元}$$

净收益 $N=4227.898 \text{万元} - 4410.7 \text{万元} = -182.8 \text{万元} < 0$

3.3 使用B-S定价模型计算期权价值

将 $S=3488.4 \text{万元}$ ， $X=4410.7 \text{万元}$ 代入公式（11）—（13）计算从 $T=0$ 到 $T=4$ 的期权价值同时利用公式（1）得到扩展净收益如表3所示。

由于公式（11）—（13）的计算比较繁琐，所以利用MATLAB软件中价格衍生工具对期权进行计算，绘制延迟时间与扩展净收益关系曲线如图2所示。

根据DCF计算，净收益 $N < 0$ 应该放弃投资，但是用B-S定价模型计算期权和扩展净收益发现当延迟时间 $T=3$ 年时扩展净收益 $E > 0$ ，属于可投资项目。由图2曲线可以发现，当投资时间推迟后会带来潜在收益，即项目延迟投资的时间是有价值的，但实际项目实施时不可能无限期延迟。因为各种补贴政策正在取消，风电上网电价越来越接近平价上网，由图3上网电价与扩展净收益关系可以得出，上网电价降低对储能投资将是不利因素，因此投资者需要慎重把握延迟时间来实施项目增加收益。

表3 不同延迟时间的期权、扩展净收益
Table 3 The option and extended net incomes of different delay times

延迟时间/年	T=0	T=1	T=2	T=3	T=4
期权价值/万元	0	26.359	108.42	207.02	310.15
扩展净收益/万元	-182.8	-156.44	-74.38	24.22	127.35

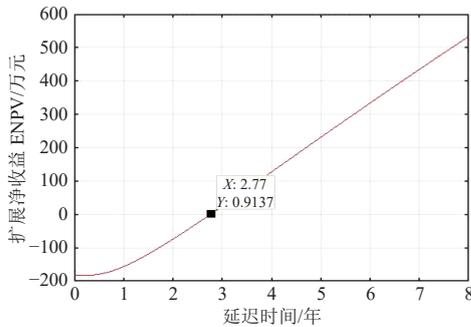


图2 延迟时间与扩展净收益关系曲线

Fig. 2 Relation curve between delay time and net earning

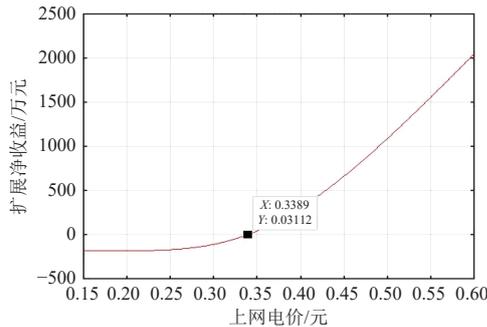


图3 上网电价与扩展净收益关系

Fig. 3 Relation curve between feed-in tariff and net income

3.4 敏感性分析

3.4.1 敏感性指标 Delta

Delta 是分析期权敏感性的一个重要参数，表示标的物收益值的变动对期权价格的影响程度：

$$D = \Delta = \frac{\partial C}{\partial S} = e^{-rT} \cdot N(d_1) \quad (14)$$

当项目属于看涨期权，则 $0 < D < 1$ 。储能项目的敏感性指标 Delta 如图4所示。

从图4曲线可以得出，其他因素不变时， $D = 0.5$ ，储能项目收益达到3687万元； $D > 0.5$ 风电场储能项目在目前的投资环境下可实现盈利。

3.4.2 敏感性指标 Gamma

Gamma 表示 Delta 曲线的变化率，本质就是 Delta 曲线的导数，用于计量期权的市场价与成交价的差异可表示为：

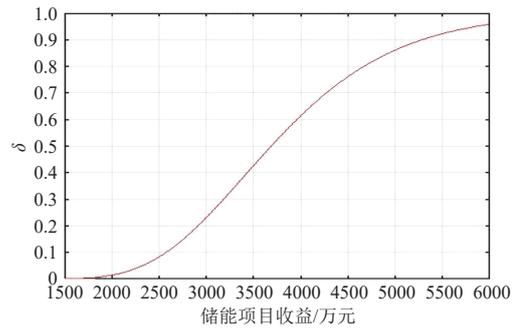


图4 敏感性指标 Delta

Fig. 4 The Delta curve of sensitivity indicator

$$G = \Gamma = \frac{\partial \Delta}{\partial S} = e^{-rT - \frac{1}{2}d_1} \cdot \frac{1}{S \delta \sqrt{2\pi T}} \quad (15)$$

Gamma 值越大就越靠近期权的成交价格，储能的敏感性指标 Gamma 如图5所示。

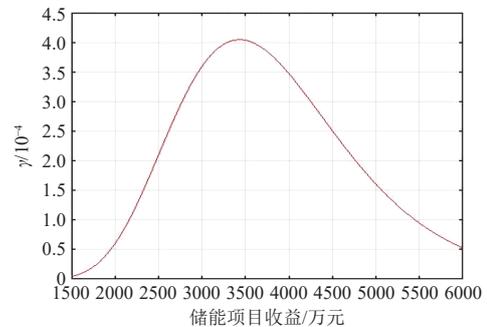


图5 敏感性指标 Gamma

Fig. 5 The Gamma curve of sensitivity indicator

由于 Delta 曲线呈 S 型上升趋势，所以 Gamma 曲线呈两边低中间高，因此当其他条件不变时，在曲线的最高点，即储能项目在市场条件下实际收益等于3453万元时项目即可执行（成交）实现收益。

3.4.3 敏感性指标 Theta

Theta 表示期权价值随时间的变化率，用来衡量延迟时间对期权价值影响程度的敏感性指标：

$$\Theta = \frac{\partial C}{\partial T} = rS e^{-rT} N(d_1) - rXe^{-rT} N(d_2) + \frac{S \delta}{2 \sqrt{2\pi T}} e^{-rT - \frac{1}{2}d_1^2} \quad (16)$$

一般 Theta 为负值，表示期权购买者的期权价值随时间减少或损失的多少，储能项目的敏感性指标 Theta 曲线如图6所示。

当 Theta 的绝对值最大时，表示投资达到平价值，曲线呈 U 型结构，则在最低点之后实施项目可实现盈利，因此当其他因素不变时延迟到第

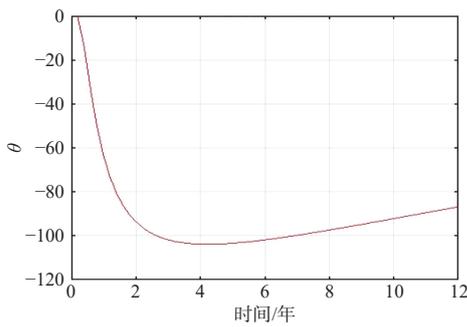


图 6 敏感性指标 Theta

Fig. 6 The Theta of sensitivity indicator

3 年实施投资项目即可获利。

3.4.4 敏感性指标 Roh

Roh 表示利率变化一个单位时期权价值的变化量，是期权值对利率的敏感程度：

$$\rho = \frac{\partial C}{\partial r} = XTe^{-rT}N(d_1) \quad (17)$$

Roh 的大小不仅与初期投资 X 有关还与延迟投资的时间长短有关。储能项目的敏感性指标 Roh 曲线如图 7 所示。

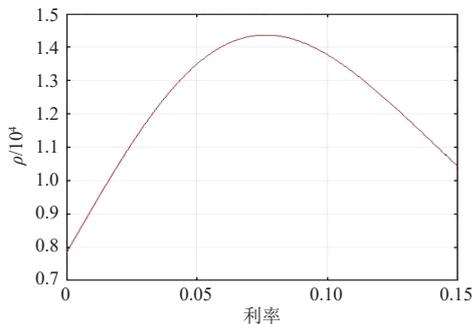


图 7 敏感性指标 Roh

Fig. 7 The Roh curve of sensitivity indicator

当其他因素不变时，利率 $r=7.4\%$ 时期权值的变化最快，利率 r 从两边趋近于 7.4% 对项目投资者是有利的，相反则属于不利因素。

3.4.5 敏感性指标 Vega

Vega 是期权价值与标的物收益值波动率的比值，即对波动率敏感度的测量：

$$v = \frac{\partial C}{\partial \delta} = \frac{S\sqrt{T}}{\sqrt{2\pi}}e^{-rT-\frac{1}{2}d_1^2} \quad (18)$$

从式 (18) 可知，无论项目未来亏损还是盈利，Vega 的值总大于零，Vega 值越大，期权价值对波动率变化越敏感，相反则不敏感，储能项目的敏感性指标 Vega 曲线如图 8 所示。

图 8 中 Vega 曲线呈两边低中间高，即在 Vega

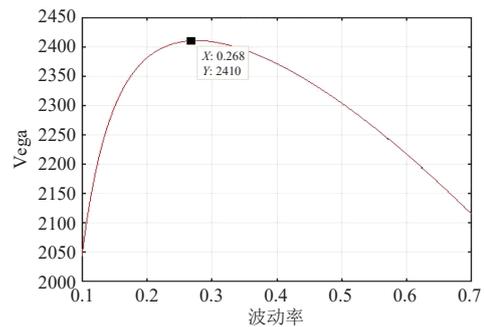


图 8 敏感性指标 Vega

Fig. 8 The Vega curve of sensitivity indicator

最大值的两侧，波动率对期权价值的影响被弱化，因此在其他因素不变时，储能项目收益的波动率在 26.8% 时，波动率对期权价值影响最大。

风电侧储能作为周期长、初期投资大的项目，从论证立项到最后运行具有较大的风险，也决定了收益的不确定性。将实物期权定价理论应用在实际案例中表明，传统 DCF 方法对项目进行评价时忽略一些不确定性而得出放弃投资的结论，但利用实物期权中 B-S 定价模型评价却发现经过延迟后项目具有投资潜力，同时对不确定性因素进行敏感性分析，可以为投资者投资时提供参考依据。

4 结论

对新疆某风电场储能系统进行经济性分析，发现使用 DCF 方法计算净收益为 -182.8 万元，投资将会亏损，但对算例中的收益利用实物期权中的 B-S 定价模型对收益进行预测，结果表明：

- 1) 推迟 3 年后投资将会获得 200 万元的期权收益，项目的扩展净收益将由负变正，投资者将会获利。
- 2) 目前 0.34 元/kW·h 的电价可以保证项目顺利实施，但随着上网电价逐步下降，电价处于 $0.25\sim 0.338$ 元/kW·h 之间，是影响投资环境的主要因素。
- 3) 当利率 $r=7.4\%$ 会获得最大收益，如果利率从 4.1% 上升对投资有利，但大于 7.4% 时收益就会下降，对投资是不利因素。

参考文献

- [1] 杨月, 钟良, 王为人, 等. 泛在电力物联网建设下消纳弃风弃光资源的储能系统综述[J]. 中外能源, 2019, 24(6): 92-99.

YANG Yue, ZHONG Liang, WANG Weiren, et al. Over-

- view on energy storage system for accommodation of wind and photovoltaic power curtailment under the construction of ubiquitous power internet of things[J]. *Sino-Global Energy*, 2019, 24(6): 92-99(in Chinese).
- [2] 胡静, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 适应中国应用场景需求和政策环境的电网侧储能商业模式研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 367-375.
HU Jing, LI Qionghui, HUANG Bibin, *et al.* Business model research of energy storage on grid side adapted to application scenarios and policy environment in China[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 367-375(in Chinese).
- [3] 薛金花, 叶季蕾, 许庆强, 等. 客户侧储能技术应用现状及经济可行性分析研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2019, 14(6): 34-39, 45.
XUE Jinhua, YE Jilei, XU Qingqiang, *et al.* Application status and economic feasibility analysis research of customer side energy storage technology[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019, 14(6): 34-39, 45(in Chinese).
- [4] 李颂中, 刘通, 张震宇, 等. 平价上网等新政下风电行业的授信政策建议[J]. *开发性金融研究*, 2020(1): 77-88.
LI Songzhong, LIU Tong, ZHANG Zhenyu, *et al.* Credit strategies for wind power industry in the context of state policies of price-parity[J]. *Development Finance Research*, 2020(1): 77-88(in Chinese).
- [5] 陈薇冰, 吴宁, 肖静, 等. 用户侧储能系统技术方案及经济性评估[J]. *广西电力*, 2019, 42(3): 2-5, 10.
CHEN Weibing, WU Ning, XIAO Jing, *et al.* The technical solution and economic evaluation of user side energy storage system[J]. *Guangxi Electric Power*, 2019, 42(3): 2-5, 10(in Chinese).
- [6] 潘福荣, 张建赟, 周子旺, 等. 用户侧电池储能系统的成本效益及投资风险分析[J]. *浙江电力*, 2109, 38(5): 43-49.
PAN Furong, ZHANG Jianyun, ZHOU Ziwan, *et al.* Cost-benefit and investment risk analysis of user-side battery energy storage system[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2109, 38(5): 43-49(in Chinese).
- [7] 沈汉铭, 俞夏欢. 用户侧分布式电化学储能的经济性分析[J]. *浙江电力*, 2019, 38(5): 50-54.
SHEN Hanming, YU Xiahuan. Economic analysis of distributed electrochemical energy storage on the user-side[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(5): 50-54(in Chinese).
- [8] 王文平, 杨洪平. 实物期权理论在风力发电项目投资决策中的应用[J]. *电网与清洁能源*, 2008, 24(2): 42-46.
WANG Wenping, YANG Hongping. The application of real option on wind power generation project investment decision[J]. *Power System and Clean Energy*, 2008, 24(2): 42-46(in Chinese).
- [9] 袁德, 李宜君, 董全学, 等. 基于 Black-Scholes 实物期权定价模型的发电商投资决策分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2008, 36(12): 17-20.
YUAN De, LI Yijun, DONG Quanyue, *et al.* The generation investment decision based on the Black-Scholes real option pricing model[J]. *Power System Protection and Control*, 2008, 36(12): 17-20(in Chinese).
- [10] 陈敏, 罗涛, 李敏杰. 实物期权法与NPV法应用于广西海上风电投资决策的比较研究[J]. *经济管理文摘*, 2020(12): 131-132.
CHEN Min, LUO Tao, Li Minjie. Comparative research on real option method and NPV method applied to Guangxi offshore wind power investment decision[J]. *Abstracts of Economic Management*, 2020(12): 131-132(in Chinese).
- [11] 张戈. 不确定性条件下发电投资决策模型与方法研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2012.
- [12] 张明明. 基于实物期权的新能源发电项目投资评价研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [13] 李达, 姜鹤, 翁军华, 等. 工业用户侧电化学储能应用及其经济性分析[J]. *电器与能效管理技术*, 2019, 6: 48-52.
LI Da, JIANG He, WENG Junhua, *et al.* Application and economic analysis of industrial user-side electrochemical energy storage[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019, 6: 48-52(in Chinese).
- [14] 李庆, 陈敏. 中国风电固定上网电价政策的实物期权理论与实证分析[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(5): 65-73.
LI Qing, CHEN Min. The real option theory and empirical analysis of China's wind power fixed on-grid tariff policy[J]. *China Management Science*, 2016, 24(5): 65-73(in Chinese).
- [15] 高蓉. 实物期权方法在新能源项目投资估值中的应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [16] 张宇擎. 基于实物期权的风电-氢储能系统价值评估研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [17] 李崇焯. 基于实物期权的风电项目投资决策研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2019.
- [18] 张晓阳, 孙燕. 实物期权在海上风电投资决策中的应用[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(10): 98-104.
ZHANG Xiaoyang, SUN Yan. Application of real options in offshore wind power investment decision-making[J]. *Journal of Electric Power System and Automation*, 2016, 28(10): 98-104(in Chinese).
- [19] 栾凤奎, 刘明光, 刘铠诚, 等. 基于实物期权的电网公司碳资产价值评估[J]. *智慧电力*, 2018, 46(8): 45-51.
LUAN Fengkui, LIU Mingguang, LIU Kaicheng, *et al.* Evaluation of the value of carbon assets of grid companies based on real options[J]. *Wisdom Electric Power*, 2018, 46(8): 45-51(in Chinese).

收稿日期: 2020-09-30

作者简介:

杨晓萍(1963), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统运行与控制、电力电子在电力系统中应用方面的研究;
杨凡(1989), 男, 硕士, 研究方向为电力市场。