

文章编号:1007-5321(2017)04-0041-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.04.007

不确定条件下固定上网电价政策的优化和评估

李 力, 张 昕

(天津师范大学 管理学院, 天津 300387)

摘要: 为准确评价固定上网电价(FIT)政策效果和优化 FIT 水平, 提出了优化投资者决策行为的量化模型, 研究了可再生能源产出的不确定性对投资者最优投资时间和装机容量的影响, 同时以政策成本最小化的方式, 优化政府完成预期装机部署目标时所需的 FIT 水平. 实证方面, 使用实物期权方法和最小二乘蒙特卡洛模拟, 以中国近海离岸风电投资成本等参数, 评价和优化了当前的 FIT 水平. 结果表明, 目前中国近海离岸风电的补贴水平 0.137 USD/kWh 不足以覆盖投资者产量波动带来的风险溢价, 政府应将补贴水平提高至 0.146 USD/kWh 才可有效刺激投资.

关 键 词: 固定上网电价; 近海离岸风电投资; 实物期权; 不确定性

中图分类号: F224.5

文献标志码: A

Evaluation and Optimization of Feed-in Tariffs under Uncertainty

LI Li, ZHANG Xin

(School of Management, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Based on the strategic behaviors of investor, this article presents a policy evaluation model in which a specific Feed-in tariff (FIT) level can be evaluated and optimized. The influence of uncertain generation from RES on the optimal investment time and sizing (capacity choice) of investor was evaluated by using the proposed model. Also, from the view of a policy maker, the optimal tariff level was determined in the way of minimizing the total burden on ratepayers to achieve RES goals. By dint of the current tariff of offshore wind in China, empirical studies through the least squares Monte Carlo method and the real option theory assess and optimize the current level of FIT. It is revealed that the current tariff level of 0.137 USD/kWh for offshore wind in China would not be enough to offset the risk premium resulting from the output uncertainty. Improving the tariff level to 0.146 USD/kWh could take effect to stimulate investment.

Key words: feed-in tariff; offshore wind investment; real option; uncertainty

由温室气体累积引起的气候变化是人类历史上面临的最严峻问题之一, 而可再生能源的使用在减少温室气体排放方面起到了关键作用. 通过对可再生能源单位发电量设置长期固定和保障性购买协议的固定上网电价(FIT, feed-in tariff)政策, 降低了投

资者部署可再生能源的金融风险, 从而有效链接了装机形式的能源目标和政策手段, 特定技术装机容量目标更加容易实现^[1-3]. 差异化设计的 FIT 政策框架, 通过设置反映不同技术投资成本所需的 FIT, 有效刺激投资的同时, 避免了不足和过度支付(FIT

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 天津市哲学社会科学规划一般项目(TJGL16-032)

作者简介: 李 力(1985—), 女, 研究实习员; 张 昕(1978—), 女, 副教授, E-mail: zhangxin0614@126.com.

水平和市场电价的差异由政府 and 电力消费者承担)^[4].

决策有效的 FIT 水平是极具挑战性的任务. 投资者面对产量的不确定性因素会延迟投资时间和优化装机容量, 以获得风险的更多信息, 从而使得项目收益最大化. 因此, 考虑到可再生资源的不确定性, 使用实物期权方法, 理论上分析了投资者的最优投资决策. 实证方面, 通过中国近海离岸风电的投资成本等数据, 使用最小二乘蒙特卡洛模拟, 结合投资者风险溢价的能力, 分析了当前 FIT 水平的不足, 同时提供了一个相对有效的 FIT 水平.

1 问题形式

1.1 模型假设

假设 1 考虑代表性投资者针对特定可再生能源发电技术的投资行为.

假设 2 若新被允许投资的装机容量是 X , 则可再生能源发电技术的年发电量是 $Q(X) = aX^b$. 其中, $a(a > 0)$ 为产量波动系数, 表示资源和技术条件等对发电量的影响; $b(0 < b < 1)$ 为边际产量递减效应系数.

假设 3 资本成本 $I(X) = CX + B$ 是新增装机容量 X 的仿射函数, 其中 C 为单位装机的设备等相关成本, B 为地基和电网等构成的固定成本^[5].

假设 4 在特定可再生能源技术的装机容量实施期内, 电网平价 P_e 是常数^①.

1.2 建立博弈模型

不确定调整 FIT 水平会增加项目投资者的风险, 从而减少投资. 为了支持比例扩张的部署目标和技术创新, FIT 水平调整应该是透明和可预见性的^[5]. 因此建立动态博弈模型模拟 FIT 政策设计是一个领导者(政策制定者)选择其策略(FIT 水平), 跟随者(投资者)根据政策制定者的信息制定其最优策略(新增装机容量), 最后领导者(政策制定者)依据最优决策优化完成预期装机目标的 FIT 水平. 这种两阶段的博弈在处理政府和投资者关系的研究中具有较多应用^[6-7].

政府在其执政时间内的 FIT 合同, 是指政府和该时期内新被允许投资的可再生能源发电项目的投资者之间的合同. 合同规定新被允许投资的可再生能源发电项目在将来 T 年内, 其单位的发电量将会获得固定的电力收购价格 \bar{P} , 这里 \bar{P} 在 FIT 合同持续期 T 年内均是常数并给定. 投资者在获得 FIT 水

平 \bar{P} 的信息后, 决策其新增装机容量 X^* .

1.3 不确定性因素建模

可再生能源部署的规模化导致了重要的学习获得, 这使得发电效率或者年利用小时数正逐步地改进^[8]. 然而, 极端天气、技术条件以及尾流效应等会导致产量的变化. 假设产量波动系数 a 服从几何布朗运动, 为了获得更加严格的形式, 开始于概率空间 (Ω, F, a) , 滤子 $(F_t)_{t \geq 0}$ 代表 t 时刻可利用的信息. 考虑一维 F_t 布朗运动:

$$da_t = \mu a_t dt + \sigma a_t dW_t \quad (1)$$

其中: W_t 为标准的维纳过程, μ 和 σ 分别为 a_t 经风险调整后的漂移率和波动率^②.

2 投资者的决策

投资者面对产量不确定性带来的风险, 会选择恰当的规模, 以保障预期收益的最大化. 若上网电价水平不足以对冲市场的不利情况, 投资者可以选择不投资新的项目. 相反, 上网电价水平相对慷慨, 投资者会选择较大的新增装机容量. 通常引进一个分析投资者价值的框架, 其包括 FIT 水平、新增装机容量和技术成本等因素, 而实物期权方法是解决这类价值分析框架的有效工具.

对于上网电价 \bar{P} , 由于发电量的不确定性, 使用实物期权方法计算投资机会的价值 $F(a; \bar{P})$ 将是一个最优停止问题:

$$F(a; \bar{P}) = \sup_{\tau \in S} E \{ e^{-r\tau} V(a_\tau^{0,a}; \bar{P}) \}, 0 < a < \infty \quad (2)$$

其中: $V(a_\tau^{0,a}; \bar{P})$ 为在状态 $a_\tau^{0,a}$ 下选择新增装机容量 X^* 时的预期净收益, 集合 S 为所有可能的停止时间, 记号 $a_\tau^{0,a} = \{a_\tau | a_0 = a\}$. 若最优停止时刻的投资触发大于当前的状态 a_0 可以选择投资; 否则不投资, 即 $X^* = 0$.

首先计算当前的 FIT 水平 \bar{P} , 对于任意的状态 a , 投资者的装机容量 X 以及预期净收益 $V(a; \bar{P}, X)$

$$= E \left(\int_0^T a_s X^b e^{-rs} \bar{P} ds \right) - XC_0 - B, \text{ 继续计算有}$$

$$V(a; \bar{P}, X) = AX^b - XC_0 - B \quad (3)$$

其中: $A = \frac{a[1 - e^{-(\mu-r)T}]}{r - \mu} \bar{P}$, C_0 是初始单位设备投资

① 考虑到化石能源在电力部门的主导地位, 可再生能源发电量对电网平价的影响可以忽略.

② 当完备市场不存在套利机会时, 市场存在唯一的等价鞅测度, 使得风险资产可以使用风险中性定价方法, 见文献[9]. 这里 $\mu = r - \delta$, 其中 δ 为风险的市场价格, r 为无风险利率.

成本对 $V(a; \bar{P}, X)$ 关于 X 计算偏导数, 得到新增最优容量 X^* 满足的必要条件, 也就是 $bAX^{*b-1} - C_0 = 0$. 将 X^* 代入式(3), 得到 $V(a; \bar{P})$. 因此, 投资者的决策是上述最优停止问题是否存在满足 $\tau = 0$ 的解. 为了说明上述最优停止时刻 τ 的存在性, 下面的引理说明了 $V(a; \bar{P})$ 的有界性.

引理 1 对于 FIT 水平 \bar{P} 和任意状态 a , 预期净收益 $V(a; \bar{P})$ 是有界的.

证明见附录.

由于 $V(a; \bar{P})$ 的有界性, 则 $e^{-\tau} V(a_t^{0,a}; \bar{P})$ 是可积分的, 并且 $\lim_{t \rightarrow \infty} E \{ e^{-\tau} V(a_t^{0,a}; \bar{P}) \} = 0$. 因此, 最优停止时刻是存在的, 也就是投资者不会选择永远等待. 使用实物期权方法计算投资触发 τ , 最优停止问题与美式看涨期权对于支付函数 $V(a; \bar{P})$ 相类似. 考虑上述最优停止问题的解 $\tau^* = \inf \{ t \geq 0 \mid a_t^{0,a} \geq a^*, a > 0 \}$, 这里触发 $a^* > 0$. 当 $a \leq a^*$ 时, 折现因子 $E_a [e^{-\tau^*}] = \left(\frac{a}{a^*} \right)^{\theta} [10]$, 得到

$$E \{ e^{-\tau^*} V(a_t^{0,a}; \bar{P}) \} = V(a^*; \bar{P}) \left(\frac{a}{a^*} \right)^{\theta} \quad (4)$$

其中 $\theta = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}$. 注意 $r > \mu$, 表明 $\theta > 1$, 也就是发电量 $aX^{*b} \rightarrow 0$, 净收益 $V(a; \bar{P}) \rightarrow 0$.

对于当期的 FIT 水平 \bar{P} , 投资者具有选择投资与否的权利, 而不是延迟投资的权利. 如果状态 $a_0 \leq a^*$, 则表示在当期的状态 $(a; \bar{P})$ 下, 不投资是最优决策. 下面给出 a^* 存在的充要条件, 也就是使得 a^* 成为最优执行边界的条件.

定理 1 在给定 FIT 水平 \bar{P} 下, 投资触发 a^* 是函数 $V(a^*; \bar{P}) \left(\frac{a}{a^*} \right)^{\theta}$ 在 \mathbf{R}_+ 上的全局最大值, 需要满足

$$\frac{\bar{P}C_0X^*(1 - e^{(\mu-r)\Gamma})}{(C_0X^*(1-b) - B)(r-\mu)} - \frac{\theta}{a^*} = 0 \quad (5)$$

同时装机容量 X^* 满足 $bAX^{*b-1} - C_0 = 0$, 其中

$$A^* = \frac{a^* [1 - e^{(\mu-r)\Gamma}]}{r - \mu} \bar{P}.$$

证明见附录.

3 政府可实施的上网电价

政府需要解决的问题是以政策成本最小化的方法, 使得 FIT 合同结束后, 达到刺激装机容量 Q 的可

再生能源发展目标. 若政府的折现因子也是 r , 则政府预期需要支付的政策成本是 $C_{\text{cost}}(a_0; \bar{P}) = E \left(\int_0^T e^{-rs} (\bar{P} - P_{\text{el}}) a_s^{0,a} X^{*b} ds \right)$, 政府面对的优化问题是

$$Z(Q) = \min_{\bar{P} > 0} E [C_{\text{cost}}(a_0; \bar{P})], \text{ s. t. } X^* \geq Q \quad (6)$$

为了获得可实施的特定技术支持政策, 政府会考虑在当前的市场水平下制定恰当的上网电价, 使得投资者选择投资是最优决策. 然而, 在相同的市场状态下, 上网电价水平越高, 投资者进行投资的可能性越高, 并且净收益也越大, 而政策成本则会提高, 使得电力消费者难以承担. 因此, 在当前的市场状态下, 存在上网电价的触发使得投资者在这样的触发下恰好实施投资. 这样的上网电价触发记作 \bar{P}_M . 因此, 为达到装机目标 Q , 当 FIT 水平是 \bar{P}_M 时, 在 FIT 结构下投资触发会阻止当期放弃投资的行为, 并且政策总成本是相对最小的. 理论上, 对于当前的市场状态, 由式(5)可以获得 \bar{P}_M , 但超越性使得无法解析地计算这样的方程.

4 数值模拟和案例

4.1 中国离岸风电技术 FIT 政策

4.1.1 模拟方法

政策制定者结合投资者的最优决策准则, 选择恰当的 FIT, 使得当期激励投资的政策成本最小, 并达到装机目标. 实际上, 只有执行投资的项目预期价值大于等待的价值, 投资者才会及刻投资. 或者说, 当前时刻的预期净收益足以使得等待的机会成本比等待的价值更高. 此时, 实物期权方法评价的灵活性价值, 可以解释为一种风险溢价的度量. 风险溢价作为可再生能源项目投资收益的重要构成部分, 政府通过实施 FIT 合同以达到投资风险补偿, 降低风险溢价的目的.

在刺激投资者当期投资的情况下, 有效的上网电价实质上是在当前市场状态下, 刺激投资者在当期实施投资是最优决策的最小 FIT 水平. 投资者在面对政府颁布并实施的 FIT 时, 考虑到其财政金融条件以及对收益风险补偿的满意度, 决策当期是否投资以及投资容量. 具体来说, 若当期有效的 FIT 水平使得投资者当前进行投资, 此时投资时间的灵活性价值小于覆盖风险的 FIT 带来的预期收益. 在数值模拟方面, 在刺激投资者当期投资的情况下, 使用最小二乘蒙特卡洛方法来模拟时间的灵活性价值

或者风险溢价。这种方法为模拟美式看涨期权提供了强有力的工具^[11]。

考虑到地区电网可再生能源电力消纳的能力,将给定可能的装机容量和固定上网水平区间,在区间内的每一个点,采用最小二乘蒙特卡洛方法计算其在给定时期内执行投资的可能性。项目预期净收益是该时期内执行投资的平均收益,而风险溢价则是当前不执行投资是最优决策的路径上,通过比较执行投资与最优执行时间时的预期项目价值之差获得的,模拟的具体步骤见附录。执行可能性,对于当前的装机容量和补贴水平,投资者可以认为是政府的风险补偿水平。政策制定者可以将执行可能性定义为投资者的满意度,而满意度以及预期收益等是否被投资者所接受并实施投资,取决于投资者的金融财政条件以及风险的偏好水平等因素。

4.1.2 案例选取和数据

以 2015 年末为基准,数值计算了中国近海离岸风电投资与装机目标相结合的上网电价政策,模型中使用的数据如表 1 所示。由于目前中国近海离岸风电技术的年均利用小时数大致与在岸风电技术风能资源丰富的地区相当^[1],其产量波动系数的漂移率 μ 和波动率 σ 认为与在岸风电技术的年均利用小时数变化相一致。采用中国国家统计局近 5 年来,关于在岸风能资源比较丰富的地区(新疆、内蒙古、甘肃、宁夏、河北等)的年平均利用小时数数据,可以近似估计中国离岸风电装机因子的漂移率和波动率,具体计算方法见文献[12]。对于估计尾流效

应,采用 Boomsma 等^[13]提出的方法,即固定 b 后^①,使得 aX^b 尽可能与风电技术的年实际发电总量接近来估计 a ,这里 X 是装机总量。采用江苏如东离岸最大风电场的数据进行计算^②,离岸风电技术单位兆瓦装机的设备成本 C_0 和 2015 年末累积装机总量 M_0 则来自于 REN21 的报告^[1],固定投资成本的估计来自于文献[14]。由于离岸风电是相对不成熟的技术,其学习率 β 可以认为 2030 年之前均为常数^[8]。

4 数值结果

4.2.1 中国当前近海离岸风电补贴政策效果分析

政府依据产量波动系数 a_t 的演化、装机容量总目标 Q 、学习率 β 以及投资者的满意度等制定刺激投资者当期均投资的有效 FIT 水平 \bar{P}_M 。基准情景中,投资者认为只要政府的风险补偿水平达到 80%,即可按照预期收益最大化的原则,选择最优的装机容量进行投资。因此,执行可能性大于或者等于 80% 所对应的最小上网电价下的最大装机容量,分别认为是当期有效 FIT 和投资者最优新增装机容量。

使用所提出的模型,分析当前中国近海离岸风电 FIT 水平的有效性。2015 年中国国家能源局执行的近海项目 FIT 为 0.137 USD/kWh,见文献[5]。图 1 说明了当前政策下,投资者的投资反馈。可以看到,此时覆盖风险的最高比率仅仅达到了 55.49%,对应的投装机量也仅是 200 MW。因此,只有极端喜

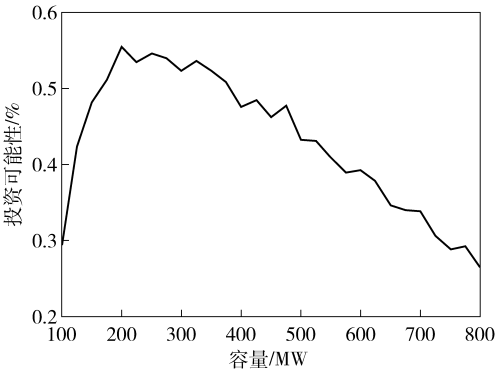


图 1 目前中国近海离岸风电上网电价政策对投资的刺激作用

表 1 案例中使用的基本参数			
变量	参数	取值	
设备有效期/ a	Γ	15	
漂移率/%	μ	0.45	
波动率/%	σ	4.00	
无风险利率/%	r	5.00	
边际产量递减效应系数	b	0.82	
产量波动系数初值/($\text{MWh}\cdot\text{MW}^{-1}$)	a_0	7 300	
FIT 实施计划总期数/年	T	15.00	
设备成本/($\text{million USD}\cdot\text{MW}^{-1}$)	C_0	2.767	
最初累积装机容量/MW	M_0	1 000.00	
学习率/%	β	15	
电网平价/($\text{USD}\cdot\text{kWh}$)	P_{el}	0.65	
固定投资成本/ million USD	B	150	

① 选择 $b=0.82$,对中国陆上风能资源丰富的省份(新疆、内蒙古、甘肃、宁夏、河北等)的年装机容量和总发电量回归模拟得到。
② 江苏龙源如东的海上风电场(482 MW)2010~2015 年年均有效发电时间约 2 400 h。

好风险的投资者才会选择投资. 同时其他实证研究结果也表示,由于 2015 年的 FIT 水平使得投资者的获益较少^[15],加之环境挑战和技术成熟度等问题导致 2015 年末实际的装机总容量仅是 1 GW,远低于 2015 年末要求部署 8 GW 离岸风电装机容量的政策目标^[5].

4. 2. 2 中国当前有效离岸风电补贴政策的制定

结合目前中国近海离岸风电 FIT 比较低的情况,说明有效 FIT 触发的选择,如表 2 所示. 从表 2 中可以看到,当 FIT 高于或等于 0. 146 USD/kWh 时,政府对风险溢价的补偿水平才会达到投资者的满意度. 此外,对于相同的装机容量选择,FIT

表 2 当期关于新增装机容量和 FIT 触发的选取过程

新增装机容量/MW	FIT/(USD/kWh)					
	0. 142	0. 143	0. 144	0. 145	0. 146	0. 147
	执行投资可能性/%					
125	0. 534 8	0. 559 3	0. 578 6	0. 606 2	0. 657 8	0. 680 2
150	0. 620 5	0. 625 6	0. 671 9	0. 689 3	0. 738 6	0. 758 2
175	0. 701 1	0. 720 8	0. 739 7	0. 748 8	0. 771 9	0. 831 8
200	0. 672 8	0. 708 1	0. 732 1	0. 774 4	0. 788 8	0. 807 4
225	0. 699 4	0. 751 9	0. 774 4	0. 767 2	0. 830 1	0. 835 3
250	0. 687 9	0. 728 4	0. 755 0	0. 779 0	0. 812 4	0. 846 8
275	0. 664 1	0. 708 9	0. 761 1	0. 798 5	0. 814 3	0. 834 1
300	0. 690 9	0. 726 6	0. 724 4	0. 787 4	0. 819 5	0. 825 3
325	0. 679 1	0. 697 7	0. 737 4	0. 789 2	0. 777 7	0. 818 5
新增装机容量/MW	折现后的预期净收益/million USD					
125	82. 497 2	86. 399 9	90. 302 6	94. 205 4	98. 108 1	102. 010 8
150	106. 063 0	110. 595 1	115. 127 1	119. 659 2	124. 191 3	128. 723 4
175	126. 974 3	132. 117 0	137. 259 8	142. 402 5	147. 545 2	152. 688 0
200	145. 676 2	151. 414 0	157. 151 8	162. 889 7	168. 627 5	174. 365 3
225	162. 492 7	168. 812 3	175. 131 9	181. 451 6	187. 771 2	194. 090 9
250	177. 669 5	184. 559 5	191. 449 4	198. 339 3	205. 229 2	212. 119 1
275	191. 399 2	198. 849 2	206. 299 2	213. 749 2	221. 199 2	228. 649 2
300	203. 836 2	211. 837 1	219. 838 1	227. 839 1	235. 840 0	243. 841 0
325	215. 106 9	223. 650 6	232. 194 3	240. 738 0	249. 281 7	257. 825 5
新增装机容量/MW	折现后的风险溢价/million USD					
125	31. 438 8	34. 165 2	37. 419 3	43. 002 7	51. 470 3	54. 938 6
150	48. 115 6	52. 768 2	59. 998 8	67. 275 9	76. 320 6	81. 699 5
175	70. 271 4	78. 429 1	83. 928 9	89. 248 8	95. 198 4	110. 441 4
200	76. 969 2	87. 244 4	95. 281 8	107. 017 6	113. 017 3	121. 756 0
225	92. 783 2	104. 530 2	116. 403 2	116. 769 4	135. 756 7	142. 154 2
250	98. 917 9	110. 217 3	119. 898 9	132. 408 2	143. 124 3	158. 942 6
275	99. 274 1	115. 344 8	129. 720 4	148. 187 1	154. 409 6	166. 089 3
300	113. 099 6	125. 402 8	136. 344 4	151. 434 7	166. 623 6	174. 928 3
325	118. 300 4	124. 746 9	142. 066 2	164. 213 8	164. 891 8	182. 154 9
新增装机容量/MW	折现后的政策成本/million USD					
125	300. 510 4	304. 413 2	308. 315 9	312. 218 6	316. 121 4	320. 024 1
150	348. 970 1	353. 502 1	358. 034 2	362. 566 3	367. 098 4	371. 630 4
175	395. 990 3	401. 133 0	406. 275 7	411. 418 5	416. 561 2	421. 703 9
200	441. 812 4	447. 550 3	453. 288 1	459. 025 9	464. 763 7	470. 501 5
225	486. 612 2	492. 931 8	499. 251 5	505. 571 1	511. 890 8	518. 210 4
250	530. 522 9	537. 412 8	544. 302 7	551. 192 6	558. 082 5	564. 972 4
275	573. 648 9	581. 098 9	588. 548 8	595. 998 8	603. 448 8	610. 898 8
300	616. 073 8	624. 074 8	632. 075 7	640. 076 7	648. 077 7	656. 078 6
325	657. 866 4	666. 410 1	674. 953 8	683. 497 5	692. 041 2	700. 585 0

水平越高,风险补偿水平越高. 因此,政府从政策成本最小化的角度考虑,势必选择达到投资者满意度的 0.146 USD/kWh 作为当前的 FIT. 而对于投资者,此时达到其满意度的新增装机容量选择分别是 225 MW、250 MW、275 MW 和 300 MW,相应的预期收益则分别是 187.771 2 million USD、205.229 2 million USD、221.199 2 million USD 和 235.840 0 million USD. 考虑到预期收益的最大化,新增装机容量 300 GW 是当期的最优投资决策. 因此,降低投资者的风险,完成预期装机目标,应继续向可再生能源发电投资者提供最低需求 FIT,即 0.146 USD/kWh.

5 结束语

使用实物期权方法优化了与预期装机目标相匹配的最优 FIT 政策. 实证研究集中在评估中国离岸风电的 FIT 政策,通过考虑可再生能源产出的不确定性,使用最小二乘蒙特卡洛方法,模拟当前政策支持下,投资者的决策行为. 首先,实证发现当前的 FIT 政策并不能有效地吸引投资,这是中国离岸风电企业在中国并不能盈利的原因;其次,为满足预期的装机目标,政府需将目前 0.137 USD/kWh 的离岸风电购买电价提高至 0.146 USD/kWh,才能在政策成本最小的情况下有效刺激投资. 这些结果对于政策制定有重要意义,直接影响到可再生能源的投资部署和中国的可再生能源发展计划的实施.

笔者建立的模型和数值模拟方法,尽可能考虑到了可再生能源投资的实际情况和投资者的决策要素,但仍有不足. 首先,没有动态地考虑技术进步和学习效应对于技术成本的影响;其次,使用几何布朗运动模拟产量的不确定性,由于数据有限,无法精确评估漂移率和波动率. 下一步应该改进这些限制. 所提出的模型也同样适用其他国家或者地区,甚至其他的可再生能源资源类型,只需要考虑具体的资源特征即可.

附录

引理 1 的证明:若在状态 $(a; \bar{P})$ 下,投资者选择不投资,则 $V(a; \bar{P}) = 0$; 否则状态 $(a; \bar{P})$ 下的最优新增装机容量 X 满足 $bAX^{b-1} = C_0$, 其中 $A = \frac{a[1 - e^{(\mu_a - r)\Gamma}]}{r - \mu_a} \bar{P}$. 因此, $X = C_0 b^{\frac{1}{1-b}} A^{\frac{1}{1-b}}$, 且 $0 \leq V(a; \bar{P}) = C_0 b^{\frac{b}{1-b}} A^{\frac{b}{1-b} + 1}$.

定理 1 的证明:对于 $V(a^*; \bar{P}) \left(\frac{a}{a^*}\right)^\theta$ 取对数

后,关于 a^* 计算一阶偏导数,得到

$$\frac{1}{V(a^*; \bar{P})} \frac{\partial V(a^*; \bar{P})}{\partial a^*} - \frac{\theta}{a^*} = 0 \quad (7)$$

同时由 X^* 满足 $bAX^{*b-1} - C_0 = 0$, 有

$$\frac{\partial X^*}{\partial a^*} = \frac{X^*}{(1-b)} \frac{[1 - e^{(\mu_a - r)\Gamma}]}{r - \mu_a} \bar{P} \quad (8)$$

$$X^* = \left(\frac{C_0}{bA}\right)^{\frac{1}{b-1}} \quad (9)$$

$$\text{从而 } \frac{\partial V}{\partial a^*} = \frac{C_0 X^*}{ba^{*2}}.$$

为说明 a^* 是全局最大值,需要说明

$$\frac{1}{V(a^*; \bar{P})} \frac{\partial^2 V(a^*; \bar{P})}{\partial a^{*2}} - \frac{1}{V^2(a^*; \bar{P})} \left(\frac{\partial V(a^*; \bar{P})}{\partial a^*}\right)^2 + \frac{\theta}{a^{*2}} \leq 0 \quad (10)$$

由于 $\frac{\partial^2 V(a^*; \bar{P})}{\partial a^{*2}} = \frac{C_0 X^*}{(1-b)ba^{*2}}, \left(\frac{\partial V(a^*; \bar{P})}{\partial a^*}\right)^2 = \left(\frac{C_0 X^*}{ba^{*2}}\right)^2$, 且对于可再生能源的产量不确定性,漂移率 μ_a 远小于波动率 σ_a , 结合 $\theta > 1$, 从而 a^* 是全局最大值.

最小二乘蒙特卡洛模拟步骤如下.

第 1 步 使用蒙特卡洛方法,选取大量随机数,模拟状态变量的 N 条样本路径.

假设离岸风电项目有有限生命并且考虑时间分割 $0 = t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq T_1 - 1 \leq T_1$, 区间 $[0, T_1]$ 分成 $T_1 - 1$ 等份,时间间隔均是 $\Delta t = 1$. 对于第 j 条路径,指标 $j \in [1, N]$,由离散风险中性过程式(1)得到

$$a^j(t_{i+1}) = a^j(t_i) \exp \left\{ \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) \Delta t + \sigma Z_i \sqrt{\Delta t_i} \right\} \quad (11)$$

其中 Z_i 为独立的标准正态随机变量.

第 2 步 将区间 $[P_L, P_U]$ 分成 n_1 等份,间隔均是 $\Delta n = \frac{P_U - P_L}{n_2}$, 每个等分点 P_l 可以表示为 $P_l = P_L + \frac{P_U - P_L}{n_1} l, l = 0, 1, \dots, n_1 + 1$. 将区间 $[X_L, X_U]$ 分成 n_2 等份,间隔均是 $\Delta n = \frac{X_U - X_L}{n_2}$, 每个等分点 X_k 可以表示为 $X_k = X_L + \frac{X_U - X_L}{n_2} k, k = 0, 1, \dots, n_2 + 1$.

第3步 对于每个等分点 (P_l, X_k) , 在第 j 条路径上计算即刻执行期权的价值以及连续等待的预期价值折现。

执行期权的价值由当前状态情况下投资的净收益现金流获得。时刻 t_i 路径 j 的预期投资收益 $W^j(a^j(t_i); P_l, X_k) = \max\{V^j(a^j(t_i); P_l, X_k), 0\}$, 时刻 t_i 路径 j 的连续价值是 $F_L^j(t_i)$, 表示期权在时间 t_i 没有执行, 但是在 t_i 后的任意时刻均有可能执行的价值。 $F_L^j(t_i)$ 的观察值由净收益的模拟值折现获得, 也就是 $F^j(t_i) = E \left[\sum_{\tau=t_i}^{t_{n2}} e^{-r(\tau-t_i)} W^j(\tau) \right]$ 。特别地, 使用状态变量的幂函数形式来回归预期收益的折现, 则连续价值的估计为

$$F_L^j(t_i) = \beta_0 + \beta_1 a^j(t_i) + \beta_2 a^{2j}(t_i) \quad (12)$$

其中回归系数分别为 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, 通过模拟路径的总数来计算获得。

第4步 对于每条路径 j , 检查当前状态 $(a^j(t_i); P_l, X_k)$ 是否可以投资。

如果在当前状态 $(a^j(t_i); P_l, X_k)$ 执行期权的价值大于或者等于连续价值, 也就是 $F_L^j(t_i) \leq W^j(t_i)$, 则记录这条路径, 否则不标记。

第5步 对于每个时期的状态 $(P_l, X_k; t)$, 路径 $[1, N]$ 上可以标记的路径条数是 M 。定义精度 ε , 若 $\frac{M}{N} \geq \varepsilon$, 则可以认为在状态 $(P_l, X_k; t)$ 下, 政府可以选择FIT水平 P_l , 投资者可以选择装机容量 X_k 。

第6步 对于 $t = 1, 2, \dots, 5$, 重复进行上述状态。

参考文献:

- [1] IRENA. Renewable energy target setting [EB/OL]. Abu Dhabi: IRENA, 2015 [2017-03-02]. <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=602>.
- [2] Klessmann C, Rathmann M, De Jager D, et al. Policy options for reducing the costs of reaching the European renewables target [J]. Renewable Energy, 2013 (57): 390-403.
- [3] Couture T, Gagnon Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: implications for renewable energy investment [J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 955-965.
- [4] Haas R, Eichhammer W, Huber C, et al. How to promote renewable energy systems successfully and effectively [J]. Energy Policy, 2004, 32(6): 833-839.
- [5] IRENA. Adapting renewable energy policies to dynamic market conditions [EB/OL]. Abu Dhabi: IRENA, 2014 [2017-03-02]. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/policy_adaptation.pdf.
- [6] Alizamir S, Véricourt F D, Sun Peng. Efficient feed-in-tariff policies for renewable energy technologies [J]. Operations Research, 2016, 64(1): 52-66.
- [7] Kalkuhl M, Edenhofer O, Lessmann K. Learning or lock-in: optimal technology policies to support mitigation [J]. Resource and Energy Economics, 2012, 34(1): 1-23.
- [8] Lemming J K, Morthorst P E, Clausen N E. Offshore wind power experiences, potential and key issues for deployment [M]. Denmark: Technical University of Denmark, 2009.
- [9] Harrison J M, Kreps D M. Martingales and arbitrage in multiperiod securities markets [J]. Journal of Economic Theory, 1979, 20(3): 381-408.
- [10] Takashima R, Siddiqui A S, Nakada S. Investment timing, capacity sizing, and technology choice of power plants, in handbook of networks in power systems [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 303-321.
- [11] Longstaff F A, Schwartz E S. Valuing American options by simulation: a simple least-squares approach [J]. Review of Financial Studies, 2001, 14(1): 113-147.
- [12] Chen Shen, Insley M C. Regime switching in stochastic models of commodity prices: an application to an optimal tree harvesting problem [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2012, 36(2): 201-219.
- [13] Boomsma T K, Meade N, Fleten S E. Renewable energy investments under different support schemes: a real options approach [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220(1): 225-237.
- [14] NREL (National Renewable Energy Laboratory). Renewable energy technologies: cost analysis series [EB/OL]. Washington DC: U. S. Department of Energy, 2016 [2017-03-02]. http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html.
- [15] Mancheva M. China Long yuan plugs in 4 turbines at 400-MW offshore wind park [EB/OL]. Bulgaria: Renewables Now, 2016 [2017-03-02]. <https://renewablesnow.com/news/china-longyuan-plugs-in-4-turbines-at-400-mw-offshore-wind-park-507775/>.