

发电成本垂直差异电力市场概率发电^①

——基于大用户电量偏好视角

黄守军¹, 杨俊²

(1. 中山大学岭南(大学)学院, 广州 510275; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要: 针对碳减排后普遍存在的发电成本垂直差异电力市场及其显著的大用户电量偏好差异, 本文提出概率性电量供给以及与之对应的概率发电, 并利用价格杠杆调控发电商低碳发电尤其高发电成本发电机会与供给效能不足. 先后构建发电成本内、外生选择下的概率发电模型, 求解发电商的电量供给均衡并分析概率发电策略的最优性. 最后, 将发电成本内生选择模型拓展到分解市场需求不确定性的概率发电模型. 研究发现: 相比基准发电, 概率发电可以作为一种有利可图的发电容量过剩的解决方法, 即使在发电成本内生选择时也是可行的; 当发电商采用“强”成本差异的发电策略时, 引入折中的概率发电会让产品线上成本水平相互更接近, 且大用户的消费者剩余得到提高; 与此相反, 在市场中实施“弱”成本差异发电, 发电商利用概率发电则增大成本分离并降低大用户的消费者剩余; 在不确定性市场需求下, 当偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价相对于偏好高发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价足够高时, 概率发电可以以一种管理不利需求状况工具的身份出现.

关键词: 发电成本; 垂直差异; 大用户; 电量偏好; 概率发电

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2020)06-0018-26

0 引言

随着资源环境压力的不断增大、市场化改革的不断深入, 以及大用户对于电能可靠性和质量要求的不断提升, 建设更加安全、经济、环保和低碳的电力系统已日益成为全球电力行业的共同目标. 发展低碳电力, 无疑将是推动低碳经济、建设智能电网、实现中国电力行业可持续发展的关键战略^[1]. 考虑中国现有的电源结构和发电技术, 引入低碳技术是实现电力行业低碳化发展的关键所在. 从目前低碳电力技术的研究情况来看, 发电侧和用电侧是低碳化效益比较集中的环节, 也是易于入手进行研究的环节. 发电侧的研究工作主要包括可再生资源的开发与运行^[2]、清

洁发电技术的利用^[3, 4]以及碳捕集与封存技术的发展^[5]等. 用电侧的研究工作则主要集中在改变能源使用方式与提高用电设备转化效率^[6], 以及以低碳为目标的电力需求侧管理^[7]等方面.

在此背景下, 引进减排技术的独立发电商由于显著增加了发电成本和风险, 在机组出力确定中并不具备调度优势, 发电机会在一定程度上反而减少; 与此同时, 低碳出力存在售电价格过高、供应稳定性差等特点, 在与边界市场销售竞争中处于劣势^[8]. 为了更好地体现出不同发电技术之间的成本差异, 本文提出一种双成本层次垂直差异电力市场, 相应地将发电量划分为高、低发电成本电量两种类型. 实践证明, 技术水平

① 收稿日期: 2018-01-08; 修订日期: 2020-01-09.

基金项目: 国家社会科学基金重大资助项目(19ZDA082); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(18wky39).

作者简介: 黄守军(1985—), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 副研究员. Email: huangshj29@mail.sysu.edu.cn

和市场规模是解决成本问题的两个关键;同时,在缺少灵活的交易方式、大用户的市场参与以及合理的电价政策情况下,“高成本、低收益”的低碳电力将难以生存.这也是中国低碳电力发展质量和规模并不尽如人意,结构上亦不合理最重要的原因之一^[9].因此,加快发展低碳电力,应健全灵活有效的电价机制,建立面向用电侧开放的市场交易机制,发挥市场资源配置的决定性作用,坚持走市场化发展的道路.其中,电价机制是核心与杠杆.但是,现行的电力调度办法没有市场的价格发现功能,因此怎样利用价格杠杆调控碳减排成本垂直差异下低碳发电,尤其高减排成本发电机会与供给效能不足,是个有待研究解决的关键问题.

我国在开放发电侧电力市场取得成效的基础上,正逐步开放用电侧,允许电力大用户参与市场竞争.大用户从原来的被动地从售电商购电,转变到主动地选择售电主体,既可以从售电商购电,又可以从发电商直接购电^[10].大用户根据自己的意愿对可供购买的发电量或电量组合进行排序,这种排序反映了大用户个人的需要、兴趣和嗜好等.在发电成本垂直差异下,大用户的电量偏好是对电量发电成本高、低所产生的主观的感觉或评价.尽管学者从技术角度不断进行创新,政府也对试点工作给予支持,然而多数开展试点工作的大用户却在试运行过程中退出,只有少数坚持至今.电力生产经营活动应服从和服务于电力销售的需要,大用户直购电政策推进如此缓慢,已经严重影响电力行业市场化改革进程^[11].电力市场交易分为电力批发交易和电力零售交易.售电商与中小型终端电力用户(一般用户)之间的电力零售交易占比小,且对市场影响单一,所以低碳电力主要是面向与电力大用户的批发交易.因此,针对碳减排后普遍存在的发电成本垂直差异电力市场及其显著的大用户电量偏好差异,在低碳电力销售过程中很有必要对大用户考虑个体消费偏好下的购电行为加以分析,进而构建科学合理的市场交易规则和价格形成机制,对低碳电力实行差异化定价.该问题具有很强的现

实意义和较高的理论价值.现有文献已对直购电下电力系统可靠性^[12]、风险测度^[10]进行了广泛探讨,对直购电交易模式^[13]、含大用户直购电的电力调度^[14]也展开了较多研究.但是,绝大多数仍集中在电力技术或系统稳定层面,缺乏从经济层面对大用户直购电决策及其与发电侧联动的研究.本文提出的基于大用户购电偏好的概率发电可以实现这种联动.

低碳电力销售是发电商或售电商根据电力产品的不同环境属性所采取的差异化销售策略,且以电力用户的自愿选择为基础.其中,电网在低碳电源的接入并网以及低碳电力的传输、使用中发挥关键性、支撑性作用^[15].在低碳环境下,电力销售首先应对基于低碳的购电成本与售电价格进行分析,定制相应的销售策略,降低发电商的运营风险,提高发电商的赢利能力;其次,对低碳的电能产品进行推广,实现差异化销售策略和对应的需求侧管理技术,提倡科学、低碳的用电方式,最大程度满足电力用户的个性化需求.与此对应,概率销售^[16]作为新型销售策略,与其他销售方式相比有独特的特点和明显的优势,已被广泛论证是一种有效的市场细分工具,不仅可以帮助生产商应对市场不确定性,而且还有利于产品线扩展^②.概率销售的基本思想是利用消费者对产品特征偏好强度的不同,对市场实行差异化定价,这与本项目的研究动机与研究目标完全一致.早期关于概率销售领域的文献^[16-18]都是侧重用经济模型来研究概率销售问题,与之不同,最近的概率销售文献主要关注以下几个方面:第一,将库存管理理论用于概率销售策略的研究^[19-22];第二,针对销售机制类似的传统销售策略与概率销售策略的比较分析^[23-26];第三,将博弈论与动态规划等其他建模理论、工具与方法用于概率销售策略的研究^[27-30];第四,考虑消费者不同理性程度对概率销售策略的影响^[31-34].然而,这些学者的研究绝大多数都专注于水平市场上的概率销售,尚未考虑到在垂直差异市场上如何制定可行的概率销售策略,以及消费者电量偏好对概率销售的影响.经验上,虽

② 其中,概率产品并不是一个具体的产品或服务,而是涉及获得一组多个不同商品中任何一个的概率性供给;在概率销售策略下,多商品生产商利用现有不同的产品或服务来创造概率产品,并将这种概率产品作为附加购买选择提供给潜在购买者.

然许多水平市场中可能不存在首选产品,但是同样在相当多的垂直差异市场上,消费者会严格地对其中一种产品要比其他产品更加偏好.也正是由于像发电成本垂直差异电力市场这样的垂直差异市场普遍存在,使得概率销售能否提高垂直差异市场的销售利润更值得研究.除管理实践的相关性以外,研究上述问题对分析发电成本垂直差异下大用户电量偏好的重要差异也有理论贡献.

本文是在现有研究的基础上,借鉴概率销售与概率产品这两个新生的概念,打破固有单一对发电商发电、销售决策以及终端大用户考虑如何购买的研究范式,针对碳减排后发电成本的显著差异及其显著的大用户电量偏好差异,尝试提出概率性电量供给以及与之对应的概率发电,并利用价格杠杆将发电成本垂直差异电力市场的发电侧、市场交易过程和售电侧一并纳入到整体分析,以调控发电商低碳发电,尤其高发电成本发电机会与供给效能不足.在水平电力市场中,处在中间需求位置的大用户并不关心高、低发电成本的两种极端电量.然而,在发电成本垂直差异电力市场中,就不再有这样持不在意态度的大用户了,且在售价一定条件下各自都严格偏好发电成本更高的电量供给.相应地,在水平市场中引入概率销售会导致位于极端处的两种确定性产品销售价格提高^[16];另外,采用概率销售后生产商可以先在第一阶段对某些产品制定更高的价格,而后在第二阶段无剩余地提供概率产品,但是此时消费者将面临一旦市场需求太高将购不到产品的风险^[17].与此相反,由后文部分分析可知,在发电成本垂直差异电力市场中提供概率发电量后,由于电量之间的侵蚀效应(cannibalization)^③使得高发电成本电量的定价降低.考虑到此价格下降,概率发电能否提高发电商的销售利润就不是显而易见的了.为此,笔者着重对构建大用户电量偏好差异下的发电成本垂直差异电力市场概率发电模型,求解并比较分析其均衡策略的最优性展开研究.

1 研究描述

在此背景下,本文首先证明了在发电成本垂直差异电力市场中实施概率发电的最优性.具体而言,研究结果表明概率发电可以作为一种有利可图的发电容量过剩的解决方法,并从偏好低发电成本电量的大用户中获得额外的利润.至关重要,可以适当地调整构成概率性电量供给的低发电成本电量,以便减轻由高发电成本电量和概率发电量之间的品牌替换引起的价格降低.此外,还分析了发电商交易成本可能对概率发电形式的影响^④,发现该交易成本降低了发电商随意增加低发电成本电量来削弱上述价格侵蚀的能力,从而改变了发电商的产品线策略;其次,考虑到发电成本垂直差异电力市场的一个重要特性,就是完全允许发电商进行成本水平选择.这与水平电力市场形成鲜明对比,因为在后一种电力市场中发电量通常被研究人员固定在市场的终端.给定发电商此附加自由度,在内生成本下概率发电的出现又变得存在疑问了.尤其是,合适的产品线设计很可能消除发电商对概率发电的需求,且引入概率发电对成本选择的影响可能仅是对发电商有益的,是否损害大用户的消费者剩余,以及会让产品线上发电成本水平相互更接近还是更分离.同样地,为了理解与这新生的定价方式和发电成本选择相关的政策含义,也考察了概率发电对大用户消费者剩余的影响及其正负性;最后,检验了发电商面临不确定性市场需求时是否仍然会采用概率发电.为此,分别考虑市场需求的实现情形,分析当偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价相对于偏好高发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价足够高时,概率发电能够提高发电商的销售利润.基于此,判断概率发电可以以一种管理不利需求状况工具的身份出现.

综上所述,本文研究尝试的目的扼要概括为解决如下几个关键问题:第一,给定水平与发电

③ 侵蚀效应是指生产商一项新产品的销售会挤占原有产品的销售,也称品牌替换^[35].

④ 这是因为发电商可能会承担用以明确大用户购买概率发电量的附加费用,或者要支付与概率性电量供给相关的某些更复杂的技术过程的额外履行成本.

成本垂直差异电力市场之间的大用户电量偏好差异,在后一种市场中引入概率发电是否为发电商的最优选择.相对于基准发电,发电商如何通过概率发电提高销售利润,以及交易成本会对概率发电的实施产生怎样的影响;第二,如果发电商在成本垂直差异电力市场中内生选择发电成本水平,其是否仍然会采用概率发电.如果是,那么发电成本选择会受到概率发电怎样的冲击.进一步地,产品线上成本水平是向内靠近还是向外远离,以及概率发电对大用户的消费者剩余有什么影响;第三,概率发电能否可以用作管理不利电力市场需求实现的工具.也就是说,在不确定性市场需求情形下,发电商是否会继续采用概率发电,以及概率发电的出现及最优性需要满足怎样的参数约束.此外,这时概率发电对发电商销售利润的正影响程度如何.

虽然概率发电是一种新生的差异化电力定价构思,但是笔者认为两个方面的发展预示其具有很大的应用前景:服务的多渠道增长和技术绑定购买与消费的能力提升.之所以可以促进概率发电,在于此二者限制了大用户参与套利的能力,而这是概率发电的一个关键性要求.相反,如果不能限制套利,那么大用户总能再交易已购买的概率发电量,从而破坏概率发电内在的电量及其偏好大用户类型划分.就服务而言,上述套利是相对困难的,因为消费是以顾客存在为前提.类似地,从技术的角度来看,采用电子方式输送至目标账户的服务只允许源自该账户的消费^[32].正因如此,本文的研究更加显得特别及时和必要.与以往研究相比,本文的科学意义在于:首次较为系统研究发电成本垂直差异电力市场定价理论与方法,探索基于大用户电量偏好的概率发电建模、策略及可行性,并创新性地提出定量分析方法与理论,弥补国内该领域多为定性分析的不足.与此同时,本文研究成果可以为中国低碳电力销售与定价政策评估和决策支持提供实验数据,为制定低碳电源开发与利用的可持续发展战略提供理论依据与方法论贡献.

2 发电成本外生选择模型

本部分将在一定的假设下构建并分析几个理论模型,其中发电商的所有成本选择均为外生变量决策过程,忽略不计.由此,可进一步讨论发电商在发电成本差异电力市场中采用概率发电的最优性.同时,给出简化了的交易成本对概率发电实施的影响.

2.1 假设与符号说明

在所研究的垄断电力市场中,将发电商引入低碳技术后的电量供给限定为两种类型:一种是高发电成本电量,另一种是低发电成本电量^⑤.除此成本垂直差异发电量之外,发电商还有权提供一种概率发电量^⑥.假设在概率性电量供给下,发电商进行高成本发电的概率水平为 λ ,且严格预先无条件公布.相应地,低成本发电的概率即为 $1 - \lambda$.如前所述,发电商可能面临源自对大用户告知概率水平并履行概率发电的附加交易成本.在本文建立的模型中,设发电商的等效边际附加交易成本为 t ,且存在于每单位概率发电量的销售过程当中.此外,发电商投入高、低成本发电的单位变动成本分别为 c_H 和 c_L .

发电商的高成本发电容量为 Q_H ,而低成本发电容量为 Q_L ,且 $Q_H < Q_L$.这一假设与双发电成本层次的发电商一般都愿意提供更多的低成本发电容量的轶事证据(anecdotal evidence)相吻合.考虑到容量选择在短期内很可能是不变的,因此这里不考虑发电商的容量选择问题.与发电商的电量类型相对应,该发电成本垂直差异电力市场上存在两种电量偏好大用户,各自的需求规模分别为 q_H 和 q_L ,且 $q_H < Q_H$.为了使得市场交易特性更加贴近于现实,设当前的电量供需情况是供不应求,即 $q_L > Q_H + Q_L - q_H$.如后文所分析,发电商实施概率发电也正是对此供需关系的一种合理考虑.

进一步地,假设从产品或服务价值主观认知的角度看,不同电量偏好大用户在购买电量时对

⑤ 在此,笔者划分电量类型的发电成本高与低只是一个相对概念,暂且不考虑该高、低发电成本的划分依据及其区间端点值.

⑥ 与概率产品相对应,概率发电量是指发电商通过发电概率的指定在高、低发电成本电量中创造出的虚拟发电量,即大用户从两种电量类型中获得其中任何一种的机会.

发电成本有不同的顾客感知价值(customer perceived value, CPV). 对偏好高发电成本电量的大用户而言, 两种电量的价值判断分别为 v_{HH} 和 v_{HL} , 且 $v_{HH} > v_{HL}$; 而偏好低发电成本电量的大用户, 对不同电量的价值感知依次为 v_{LH} 和 v_{LL} , 其中 $v_{LH} > v_{LL}$. 为简化研究问题并不失一般性, 可令 $v_{HH} > v_{LH}, v_{HL} > v_{LL}$, 且 $\Delta v = v_{HH} + v_{LL} - v_{HL} - v_{LH} > 0$. 也就是说, 上述电力市场中除了对给定发电成本水平的电量存在更强购买偏好外, 成本垂直差异对偏好高发电成本电量的大用户心理评价影响更大. 此假设与 Tirole^[36] 的基本成本垂直差异模型构建在理论上是一致的.

在任一销售时段, 大用户和发电商的决策顺序如下: 首先, 大用户给出对不同类型电量的既定顾客感知价值, 并结合发电商控制的销售价格进行电量购买选择, 为的是追求效用最大化; 然后, 发电商在大用户偏好类型及其对电量价值判断的基础上决定电量供给, 并设置对应的售电电价, 以此实现自身利润最优化. 值得注意的是, 为了保证发电商电量供给, 很有必要提出与偏好低发电成本电量的大用户价值判断有关的另外一个假设, 即 $v_{LH} - v_{LL} > c_H - c_L$. 代入 $\Delta v > 0$, 从而得到 $v_{HH} - v_{HL} > c_H - c_L$. 这些条件表明相比低发电成本电量而言, 发电商可以通过向不同电量偏好大用户销售高发电成本电量来获得更大的利润.

作为初步的研究工作, 本文设发电商在交易时段开始之前已具备概率发电条件且确定好产品线及其售电电价, 且所有大用户在销售期内随机出现. 另外, 作一个打破平衡的假设, 即在某一既定情形下, 如果大用户必须在消费者剩余相同的高、低发电成本电量之间进行选择, 那么他会购买自己偏好的那一种电量. 在讨论分析之前, 有必要强调过剩发电容量是在发电成本垂直差异电力市场中出现概率发电的一个必要条件. 换言之, 除非拥有较市场需求规模过剩的发电容量, 否则发电商提供概率发电量将永远不可行. 由此可得如下引理成立:

引理 1 在偏好高发电成本电量的大用户需求规模不小于发电商的高成本发电容量情形下, 即当 $q_H \geq Q_H$ 时, 采用概率发电绝对不会是发电商的最优策略选择.

证明 为了证明上述结论, 需对比分析发电商将高、低发电成本电量分别定位在对其偏好的大用户的发电策略和概率发电的差异.

当发电商实施概率发电时, 不得不扣留一部分理应直接销售给偏好高发电成本电量大用户的高发电成本电量, 改为对其进行概率性电量供给. 既然将高发电成本电量全部销售给对该类型电量偏好的大用户是最有利可图的, 那么通过概率发电将高发电成本电量销售给任何一种大用户, 发电商的利润都将严格受到削弱. 因此, 对发电商来说, 将高、低发电成本电量分别定位供给偏好高、低发电成本电量的大用户是概率发电的相对优势策略. 从而若满足 $q_H \geq Q_H$, 概率发电一定不会出现.

以下首先讨论发电商发电决策过程中有权支配的 3 种基准情形, 即有可能被用来替代概率发电的电量供给方式, 然后构建相应的基准发电模型. 事实上证明采用这样的分析逻辑是非常有必要的.

2.2 基准发电模型

在此, 确定不考虑概率发电下的发电商销售价格与利润. 就这一点而言, 发电商可以在如下 3 种基准情形中任选一种或都不选.

基准情形 I 发电商只专注于针对偏好高发电成本电量的大用户提供电量供给. 这是一种定位“高端市场”的发电策略, 即发电商仅以价格 v_{HH} 服务偏好高发电成本电量的大用户, 而将偏好低发电成本电量的大用户排除在外. 此种具有排外性策略允许发电商获得销售高价 v_{HH} , 相应的利润函数为

$$p_H = v_{HH}, \pi_1 = q_H(v_{HH} - c_H) \quad (1)$$

基准情形 II 发电商向偏好高、低发电成本电量的大用户分别供给高、低发电成本电量, 即屈从于传统的差异化产品线策略.

与此相应, 发电商为低发电成本电量定价为 v_{LL} , 对高发电成本电量定价为 $v_{HH} - v_{HL} + v_{LL}$. 其中, 高发电成本电量价格 p_H 的制定可由大用户激励相容约束得到, 以至偏好高发电成本电量的大用户无所谓购买哪一种电量, 即 $v_{HH} - p_H = v_{HL} - p_L$. 因为此时在高、低发电成本电量之间的价格差等于偏好高发电成本电量的大用户对高、低发电成本的主观价值认知差, 则市场价格符合“强”

差异化发电策略特征. 基准情形 II 下的售电价格与利润函数为

$$\begin{cases} p_H = v_{HH} - v_{HL} + v_{LL}, p_L = v_{LL} \\ \pi_{II} = q_H(v_{HH} - v_{HL} + v_{LL} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) \end{cases} \quad (2)$$

基准情形 III 发电商在市场中通过对高、低发电成本电量分别制定价格 v_{LH} 和 v_{LL} , 销售全部发电容量 $Q_H + Q_L$. 实际上, 发电商是在以偏好低发电成本电量的大用户保留价格 v_{LH} 提供高发电成本电量, 同时以偏好低发电成本电量的大用户保留价格 v_{LL} 提供低发电成本电量. 这依然屈从于传统的差异化产品线策略, 不同的是此时将其定义为“弱”差异化发电策略. 原因在于高、低发电成本电量价格差等于偏好低发电成本电量的大用户对二者的价值判断差, 以至于偏好低发电成本电量的大用户并不在意购买哪一种电量. 然而, 偏好高发电成本电量的大用户将会选择购买高发电成本电量, 因为在这种情况下他可以获得更大的效用. 给定发电量供不应求, 且电量是随机分配的. 由于发电商的销售利润与大用户构成相互独立, 该基准情形下的销售价格与利润函数分别为

$$\begin{cases} p_H = v_{LH}, p_L = v_{LL} \\ \pi_{III} = Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) \end{cases} \quad (3)$$

可以看出在 3 种基准情形中, 发电商为高发电成本电量设置不同的销售价格. 在采用“高端市场”发电策略时, 高发电成本电量的价格为其可取的最大值, 即 v_{HH} . 因为此时发电商并不提供低发电成本电量, 这使得发电商在确定高发电成本电量销售价格时不受任何约束. 在基准情形 II 下, 由于发电商需要兼顾供给两种电量以及考虑到激励相容约束, 高发电成本电量的价格降到 $v_{HH} - v_{HL} + v_{LL}$. 而当采用“弱”差异化发电策略时, 高发电成本电量的销售价格进一步降低至 v_{LH} . 在此, 发电商把价格降到偏好低发电成本电量的大用户对其的感知价值水平, 以确保足够的市场销售量.

总而言之, 基准情形 I 中高发电成本电量可以卖得一个好价格, 但是发电商的两种发电容量均存在过剩. 而在“强”差异化发电策略下, 高发电成本电量定价趋于折中, 但是仍然会出现一部

分高成本发电容量过剩. 就基准情形 III 而言, 虽然高发电成本电量的销售价格相对较低, 但是任何一种发电容量都不会出现过剩. 另外, 这 3 种基准情形之间相比并不存在孰优孰劣, 即互不具有相对优势.

在进行均衡策略选择及最优性分析之前, 需要指出的是, 发电商或许会优先考虑某一特定基准情形. 如果高发电成本电量市场规模 q_H 或者是对其偏好的大用户感知价值 v_{HH} 足够大, 发电商就有可能要忽略低发电成本电量供给, 仅提供如基准情形 I 所述的高发电成本电量; 但是, 如果低成本发电相比高成本发电明显有利可图, 那么基准情形 I 就不再是发电商最优选择. 在这种情况下, 发电商需要在基准情形 II 和基准情形 III 之间做出某种取舍: 在基准情形 II 中, 发电商为了获得更高的销售利润率, 将高发电成本电量定位专供给偏好高发电成本电量的大用户, 为此付出的是要接受高成本发电容量过剩 $Q_H - q_H$. 与此相反, 基准情形 III 的售电电价尽管较低, 但是有利于发电商销售所有高发电成本电量. 以上对 3 种基准情形的比较分析表明, 当高发电成本电量拥有较高的大用户估价或者 $Q_H - q_H$ 不大时, 基准情形 II 是合理可行的; 否则, 基准情形 III 即为发电商的最优策略选择.

2.3 概率发电模型

上节中的 3 种基准情形给出了发电商在不考虑概率发电下的产品线策略选择. 在此基础上, 接下来本节将考察发电商采用概率发电的情形. 为此, 有必要简要分析概率发电如何能改进各个基准情形. 从广义上讲, 概率发电可以通过减少基准情形 I 和基准情形 II 中的过剩发电容量达到对二者优化. 相比而言, 概率发电能够提高基准情形 III 下发电商较低的销售价格. 具体而言, 发电商引入概率发电后, 一方面将高发电成本电量定位在偏好高发电成本电量的大用户, 从而为高发电成本电量获得更高的售电电价; 另一方面, 转而将概率发电量、低发电成本电量提供给偏好低发电成本电量的大用户. 发电商不同成本发电概率水平定义如前, 当概率性电量供给以特定电量偏好大用户作为目标时, 该大用户赋予概率发电量的顾客感知价值表示为其对高、低发电成本电量价值判断的线性组合, 即

$$\begin{cases} v_{H\lambda} = \lambda v_{HH} + (1 - \lambda) v_{HL} \\ v_{L\lambda} = \lambda v_{LH} + (1 - \lambda) v_{LL} \end{cases} \quad (4)$$

此外，发电商必须要自我考虑如何制定电量销售价格，这一点在 Moorthy^[37] 中有过类似强调说明。也就是说，大用户将会逐一计算购买由发电商提供的每一种发电量的效用，进而在其中选择效用最大化的电量类型。

扼要介绍下概率发电可能产生的方式。通常来说，当发电商选择供给概率发电量时，其总是定位在对低发电成本电量偏好的大用户需求上。在此情形下，发电商进行概率发电只能采取以下两种形式：

1) 双成本层次的概率发电。发电商对偏好高发电成本电量的大用户提供 q_H 的高发电成本电量，同时将高成本发电容量内剩余的高发电成本电量 $Q_H - q_H$ 和全部低成本发电容量 Q_L 以概率性电量供给的形式提供给偏好低发电成本电量的大用户。而另一种双成本层次概率发电情形将在下一部分中被证明为相对劣势策略，故在此不再重复。

2) 三成本层次的概率发电。发电商同样对偏好高发电成本电量的大用户提供 q_H 的高发电成本电量，不同的是将高成本发电容量内余下的高发电成本电量 $Q_H - q_H$ 和低成本发电容量 Q_L 中的一部分以概率性供给的形式提供给偏好低发电成本电量的大用户，最后剩余的低发电成本电量则被发电商单独销售给偏好低发电成本电量的大用户。

基于以上考虑，可得

$$p_\lambda = v_{L\lambda} = \lambda v_{LH} + (1 - \lambda) v_{LL} \quad (5)$$

此外，为了保证偏好高发电成本电量的大用户购买高发电成本电量，需要满足

$$v_{HH} - p_H \geq \max(v_{H\lambda} - p_\lambda, v_{HL} - p_L) \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6)，结合假设 $\Delta v > 0$ 实现求解，进而得

$$p_H = v_{HH} - v_{HL} + v_{LL} - \lambda \Delta v \quad (7)$$

上式与式(2)比较发现，发电商向偏好低发电成本电量的大用户提供概率发电量的行为会降低偏好高发电成本电量的大用户在购买高发电成本电量时愿意支付的销售价格 p_H 。受此影响，引入概率性电量供给可以削减发电商从销售高发电

成本电量中获得的边际利润。更有意思的是，在概率发电中，如果发电商进行高成本发电的概率水平 λ 越大，即概率发电量更接近替代高发电成本电量，上述销售价格 p_H 的降低幅度就更为明显了。

此时，将发电成本垂直差异电力市场结构与 Fay 和 Xie^[16] 所分析的水平市场结构进行比较也是非常有必要的。二者局部静态的差异在于，本文设 $v_{HL} > v_{LL}$ ，而 Fay 和 Xie^[16] 是基于 $v_{LL} > v_{HL}$ 的假设。由式(7)可以看出，当 $v_{HL} > v_{LL}$ 时的高发电成本电量销售价格要比 $v_{LL} > v_{HL}$ 情形下的高发电成本电量销售价格低。这种看似不合理的侵蚀效应加重了笔者对发电成本垂直差异电力市场中是否会出现概率发电产生怀疑，并被激发为此展开更深入的正式解释和讨论。

需要重申的是，发电商一旦采取概率发电，就意味着始终提供高发电成本电量以满足偏好高发电成本电量大用户的市场需求 q_H ，并将未售出的高成本发电容量 $Q_H - q_H$ 连同部分低成本发电容量(设为 ξ_L)一起构成概率性电量供给。这样，虽然偏好低发电成本电量的大用户在购买概率发电量时，并不能确定最终获得的是哪一种类型的电量。但是，可以计算出他买到高、低发电成本电量的概率，且

$$\lambda = \frac{Q_H - q_H}{Q_H - q_H + \xi_L}, 1 - \lambda = \frac{\xi_L}{Q_H - q_H + \xi_L} \quad (8)$$

由此可见，在下文的分析中， ξ_L 是发电商的一个关键性决策变量，且该部分低发电成本电量必须与余下的高成本发电容量 $Q_H - q_H$ 混合成为概率性电量供给。另外，这时概率发电量的边际供给成本可表示为

$$s_\lambda = \lambda c_H + (1 - \lambda) c_L + t \quad (9)$$

其中既包括发电成本又涉及到前述的附加交易成本。于是问题转化为发电商单方最优控制问题，确定 ξ_L 以使其利润函数最大化，即

$$\begin{cases} \max \pi_{H\lambda}(\xi_L) = q_H(p_H - c_H) + \\ (Q_H - q_H + \xi_L)(p_\lambda - s_\lambda) + (Q_L - \xi_L)(v_{LL} - c_L) \\ \text{s. t. } 0 < \xi_L \leq Q_L \end{cases} \quad (10)$$

约束条件为式(5)和式(7)~式(9)。

3 均衡策略选择及最优性分析

3.1 均衡策略选择

分别求解以上两种概率发电形式下发电商的电量供给均衡并与基准情形进行比较分析, 得到的相关结论在命题 1 中列出. 该命题是关于发电成本垂直差异电力市场中概率发电出现及其最优策略选择的. 内容表述如下:

命题 1 发电商在面对发电成本垂直差异电力市场存在发电容量过剩时, 总会发现采用概率发电是有利可图的. 基于此, 发电商会采用双、三成本层次的概率发电形式中二选一, 且表 1 列出了相应的电量价格(含高、低发电成本电量和概率发电量)、低成本发电容量概率性供给量、高成本发电概率水平以及总销售利润. 另外, 发电商产品线策略选择由其概率发电的交易成本决定, 如双成本层次的概率发电适合于相对较低的交易成本情形使用; 反之, 则应该选择三成本层次的概率发电^⑦.

表 1 概率发电的成本外生选择与销售利润

Table 1 Probabilistic generating's exogenous cost choices and sales profits

		概率发电	
		双成本层次概率发电	三成本层次概率发电
发电 商 外 生 选 择	高发电成本 电量价格	$v_{LH} + \frac{Q_L \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H}$	$\Delta v + v_{LH} - \sqrt{\frac{t \Delta v (Q_H - q_H)}{q_H}}$
	低发电成本 电量价格	—	v_{LL}
	概率发电量 价格	$v_{LL} + \frac{(Q_H - q_H)(v_{LH} - v_{LL})}{Q_H + Q_L - q_H}$	$v_{LL} + (v_{LH} - v_{LL}) \sqrt{\frac{t(Q_H - q_H)}{q_H \Delta v}}$
	低成本发电 容量概率性 供给量	Q_L	$\sqrt{\frac{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}{t}} - Q_H + q_H$
	高成本发 电概率水平	$\frac{Q_H - q_H}{Q_H + Q_L - q_H}$	$\sqrt{\frac{t(Q_H - q_H)}{q_H \Delta v}}$
总销售利润		$Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L \left(v_{LL} - c_L + \frac{q_H \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H} \right) - t(Q_H + Q_L - q_H)$	$Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) + q_H \Delta v - 2 \sqrt{t q_H \Delta v (Q_H - q_H)}$

注: “—”表示此时该参数不存在, 下同.

证明 步骤 1 概率发电出现方式及其特征描述. 引理 1 已经证明了在 $q_H \geq Q_H$ 情形下, 发电商对偏好高、低发电成本电量的大用户都不会提供概率发电量, 因而在此只专注于 $q_H < Q_H$ 的情况. 本步骤的目的是描述概率性电量供给的可能出现方式, 进而有助于后文的论述.

率发电, 由于 $q_H < Q_H$, 如果发电商将概率性电量供给定位在偏好高发电成本电量的大用户, 那么每一位购买概率发电量的偏好高发电成本电量的大用户, 都将被排除在发电商直接提供高发电成本电量之外. 另外, 根据激励相容原理, 求解得到与式(5) ~ 式(7)中描述类似的概率发电量的销售价格. 相应地, 发电商每单位概率性电量供给的利润为 $\lambda(v_{HH} - v_{HL} + v_{LL} - c_H) + (1 -$

首先, 分析向偏好高发电成本电量的大用户提供概率发电量并无好处. 对比基准情形 II 与概

⑦ 与发电商概率发电的最优解对应的边际交易成本临界值如式(17)所示.

$\lambda)(v_{LL} - c_L) - t$. 而在此情形下, 发电商进行高成本发电的边际利润为 $v_{HH} - v_{HL} + v_{LL} - c_H$. 后者比前者大 $(1 - \lambda)(v_{HH} - c_H + c_L) + t$, 由此推断发电商不会以概率发电替代对偏好高发电成本电量的大用户直接销售高发电成本电量.

相比之下, 发电商对偏好低发电成本电量的大用户提供概率发电量的实现可能有: 1) 通过向基准情形 I 中被忽略的偏好低发电成本电量的大用户提供电量, 增大单位销售电量; 2) 利用基准情形 II 的过剩高成本发电容量; 3) 提高基准情形 III 中对偏好高发电成本电量的大用户销售高发电成本电量的价格. 因此, 对偏好低发电成本电量的大用户执行概率发电具有提高发电商销售利润的潜力.

基于此, 下面证明 2.3 节中并未赘述的一种双成本层次的概率发电绝非最优策略选择. 在这种情形下, 发电商并不向市场提供高发电成本电量, 而是将全部高成本发电容量 Q_H 和部分低成本发电容量(假设为 δ_L) 共同以概率发电量的形式供给偏好低发电成本电量的大用户. 因而, 此时发电商进行高成本发电的概率为 $\frac{Q_H}{Q_H + \delta_L}$. 将其代入式(5)中, 即得概率性电量供给的销售价格 p_λ , 进而发电商的销售利润可表示为

$$\begin{cases} \pi_{\lambda L}(\delta_L) = Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) - \\ t(Q_H + \delta_L) \\ \text{s. t. } 0 < \delta_L \leq Q_L \end{cases} \quad (11)$$

与基准情形 III 对比, 可见发电商采用上述双成本层次的概率发电后的利润不升反降低, 从而说明这样的概率发电是相对劣势策略.

其次, 分析三成本层次的概率发电均衡解. 此时, 对偏好高发电成本电量的大用户提供高发电成本电量 q_H ; 而由部分低成本发电容量 ξ_L 和高成本发电容量内余下的高发电成本电量 $Q_H - q_H$ 构成的概率发电量, 以及剩余的低发电成本电量 $Q_L - \xi_L$ 都被销售给偏好低发电成本电量的大用户. 当发电量供不应求时, 将式(5)和式(7)~式(9)代入式(10), 化简整理得

$$\begin{aligned} \pi_{\text{HAL}}(\xi_L) = & Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) + \\ & \frac{q_H \xi_L \Delta v}{Q_H - q_H + \xi_L} - t(Q_H - q_H + \xi_L) \end{aligned} \quad (12)$$

存在唯一确定的最优低成本发电容量概率性供给量 ξ_L^* , 使得由式(12)所决定的一阶条件成立, 且

$$\xi_L^* = \sqrt{\frac{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}{t}} - Q_H + q_H \quad (13)$$

将上式分别代入式(5)、式(8)和式(12), 得到如下发电商进行高成本发电的概率水平、概率性电量供给价格以及销售利润

$$\begin{cases} \lambda^* = \sqrt{\frac{t(Q_H - q_H)}{q_H \Delta v}} \\ p_\lambda^* = v_{LL} + (v_{LH} - v_{LL}) \sqrt{\frac{t(Q_H - q_H)}{q_H \Delta v}} \\ \pi_{\text{HAL}}^* = Q_H(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) + \\ q_H \Delta v - 2 \sqrt{t q_H \Delta v (Q_H - q_H)} \end{cases} \quad (14)$$

进一步地, 计算可得 $\pi_{\text{HAL}}(\cdot)$ 对 ξ_L 的二阶偏导数恒为负, 表明销售利润在区间 $(0, Q_L]$ 上是关于低成本发电容量 ξ_L 的严格凹函数, 且函数值在 ξ_L^* 处取最大值. 此外, 将 $0 < \xi_L^* \leq Q_L$ 代入式(13)易知附加交易成本满足

$$\frac{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}{(Q_H + Q_L - q_H)^2} \leq t < \frac{q_H \Delta v}{Q_H - q_H} \quad (15)$$

而对于 $\xi_L^* > Q_L$ 的情形, 发电商就没有足够的低成本发电容量用以提供概率发电量. 考虑到最大可利用的低发电成本电量为 Q_L , 所以当这种情况发生时, 发电商只能退而求次之取 $\xi_L^* = Q_L$. 此时, 发电商只提供高发电成本电量和概率性电量供给, 即对偏好低发电成本电量大用户的三成本层次概率发电变成了双成本层次的概率发电, 且销售利润为

$$\begin{aligned} \pi_{\text{HA}}^* = & Q_H(v_{LH} - c_H) + \\ & Q_L \left(v_{LL} - c_L + \frac{q_H \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H} \right) - \\ & t(Q_H + Q_L - q_H) \end{aligned} \quad (16)$$

总之, 当 $0 < \xi_L^* \leq Q_L$ 时, 发电商在确定最优概率性电量供给的同时, 会对偏好低发电成本电量的大用户单独销售部分低成本发电容量, 且可求出发电商采用三成本层次概率发电的均衡解及其最优销售利润. 在此基础上, 计算参数 t 的取值范围如式(15)所示.

步骤 2 发电商交易成本对基准情形 I ~ 基准情形 III 与概率发电最优解的影响. 针对偏好

低发电成本电量的大用户, 比较两种概率发电下的均衡利润以及 3 种基准发电时的最优利润, 由下式可以看出, 当发电商为选择概率发电付出的附加交易成本 t 相对较大时, 上述销售利润中数 π_{HAL}^* 最大, 即此时对发电商而言, 向偏好低发电

成本电量的大用户实施三成本层次的概率发电是最优策略; 而当参数 t 取值相对较小时, 最大销售利润变为 π_{HA}^* , 这表明此时发电商会对偏好低发电成本电量的大用户实施双成本层次的概率发电。

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_{HA}^* > \max(\pi_{HAL}^*, \pi_I, \pi_{II}, \pi_{III}), \\ \min \left[\begin{array}{l} (Q_H - q_H) \left(v_{LH} - c_H - \frac{q_H \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H} \right), \\ Q_H (v_{LH} - c_H) + Q_L \left(v_{LL} - c_L + \frac{q_H \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H} \right) - q_H (v_{HH} - c_H), \\ \frac{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}{Q_H + Q_L - q_H}, \frac{Q_L q_H \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H} \end{array} \right], \\ t < \frac{Q_H + Q_L - q_H}{4} \\ \pi_{HAL}^* > \max(\pi_{HA}^*, \pi_I, \pi_{II}, \pi_{III}), \\ \min \left[\begin{array}{l} \left(\frac{(Q_H - q_H)(v_{LH} - c_H) + Q_L(v_{LL} - c_L) - q_H(v_{HL} - v_{LL})}{\sqrt{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}} \right)^2, \\ \frac{(Q_H - q_H)(v_{LH} - c_H)^2}{q_H \Delta v}, \frac{q_H \Delta v}{Q_H - q_H} \end{array} \right], \\ \frac{q_H \Delta v (Q_H - q_H)}{(Q_H + Q_L - q_H)^2} \leq t < \frac{4}{4} \end{array} \right. \quad (17)$$

综上所述, 命题 1 揭示了发电成本垂直差异电力市场概率发电的最优性及其出现的方式. 从推导过程可以看出, 概率发电的出现是有条件的, 取决于发电商的交易成本大小. 一旦参数取值过大, 概率发电就不再是最优策略选择. 此外, 该命题还强调当存在发电容量过剩时, 发电商在发电成本垂直差异电力市场中提供概率性电量供给是非常有必要的。

3.2 最优性分析

接下来笔者依次给出直观分析, 说明概率发电是如何达到优胜于 3 种基准情形的。

首先, 相对基准情形 I 而言, 随着引入概率发电, 品牌替换会使得发电商对高发电成本电量的定价下降. 与之相反, 在概率发电下, 通过将基准情形 I 中并未使用的高、低成本发电容量提供给偏好低发电成本电量的大用户, 从而提高发电商的销售利润。

其次, 与基准情形 II 中的高发电成本电量价格 $\Delta v + v_{LH}$ 相比, 当发电商实施三、双成本层次的概率发电时, 其对高发电成本电量的售价 $\Delta v +$

$v_{LH} - \sqrt{\frac{t \Delta v (Q_H - q_H)}{q_H}}$ 和 $\Delta v + v_{LH} - \frac{\Delta v (Q_H - q_H)}{Q_H + Q_L - q_H}$ 均受到价格侵蚀的影响, 表现出了不同程度的下降. 尽管如此, 但是对发电商来说, 概率发电的好处在于它能够有益利用基准情形 II 下过剩的高成本发电容量。

最后, 比较概率发电与基准情形 III 的均衡解, 不难发现概率发电的相对优势在于发电商可以借助其将目标定位在偏好高发电成本电量的大用户上, 进而为高成本发电容量谋得一个更好的销售价格. 相应地, 三、双成本层次的概率发电下高发电成本电量的价格 $v_{LH} + \left(1 - \sqrt{\frac{t(Q_H - q_H)}{q_H \Delta v}} \right) \Delta v$ 和 $v_{LH} +$

$\frac{Q_L \Delta v}{Q_H + Q_L - q_H}$, 与基准情形 III 中的 v_{LH} 相比, 都有一定程度的提高。

在此, 值得一提的是概率发电的概率水平隐式控制上述侵蚀效应的影响程度. 一方面, 当发电商进行高成本发电概率 λ 较大时, 概率发电量中高发电成本电量的占比更高, 即概率性电量供

给更接近替代高发电成本电量. 因此, 品牌替换越严重; 另一方面, 当参数 λ 取值较小时(可由发电商选择较大的 ξ_L 得到), 这使得大部分的发电量是通过概率性电量供给的形式销售给大用户. 但是对发电商而言, 不间断地为概率发电支付的附加交易成本 t 肯定会削弱其销售利润, 所以过多地进行概率发电也是有问题的. 基于此分析, 就可以理解为什么选择三、双成本层次的概率发电策略要受到该交易成本大小的影响了. 进一步, 当交易成本 t 不存在或相对较低时, 发电商对由交易成本引起销售利润损失的担忧并不特别显著. 于是, 用尽所有低发电成本电量 Q_L 以构造出双成本层次的概率发电形式, 是发电商最大限度减小侵蚀效应的最佳办法; 与此相反, 随着交易成本 t 的增大, 由其造成发电商对削减销售利润的顾虑变得越来越显著. 因此, 为了减小该价格侵蚀, 发电商也不能不加选择地增加大量低发电成本电量以实现概率性电量供给. 既然是这样, 发电商并不会用完所有低发电成本电量来构成概率发电量, 而是对其保留一部分单独提供给偏好低发电成本电量的大用户, 即实施三成本层次的概率发电.

4 发电成本内生选择模型

作为发电成本外生选择模型的对立面, 本部分考虑发电商对其发电成本水平进行内生选择, 分析的主要目的是考察在发电容量过剩时, 发电商自由选择成本水平是否就免去了概率发电的必要. 由于本质上容量决策通常是一个更长期的行为, 所以下文将考虑一个高、低成本发电容量继续确定在 Q_H 和 Q_L 的情景. 此外, 还进一步设发电商不可能在发电成本上混淆一个既定的发电容量. 也就是说, 尽管可以改变每一种发电容量类型对应的成本水平, 但是基础设施(即固定投资)排除了发电商针对每一种发电容量类型给出不止一种成本水平的可能性.

在此背景下, 后文将在证明内生发电成本决策并不排除必要的概率发电的同时, 分析发电商

引入概率发电后该怎样进行发电成本水平选择; 最后, 讨论在发电成本垂直差异电力市场中采用概率发电对大用户消费者剩余的影响.

4.1 模型构建与求解

在 Moorthy 和 Png^[38] 的建模基础上, 本文假设偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价为 κ_L , 而偏好高发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价为 κ_H , 且 $\kappa_H > \kappa_L$. 此外, 发电商投入的边际发电成本以 $c_i = \frac{\alpha \chi_i^2}{2}$ ($i = H, L$) 进行表达, 其中 χ_i 为发电成本水平, $\alpha > 0$ 为耗量特性参数. 这样, 如果发电商决定提供成本水平为 χ_H 和 χ_L 的高、低发电成本电量, 那么市场中不同电量偏好的大用户在选择购买时, 其主观价值感知可量化为 $v_{HH} = \kappa_H \chi_H$ 、 $v_{HL} = \kappa_H \chi_L$ 、 $v_{LH} = \kappa_L \chi_H$ 以及 $v_{LL} = \kappa_L \chi_L$. 与现有文献类似, 构建当发电成本都为内生变量时的发电决策模型, 并由此推导出不同发电情形下的最优成本水平和相应的均衡售电电价以及销售利润, 如命题 2 和命题 3 所示.

命题 2 1) 在发电商只对偏好高发电成本电量的大用户提供高发电成本电量, 即选择定位“高端市场”的发电策略下, 其最优发电成本水平为 $\hat{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha}$, 与此相应的均衡电量价格为 $\hat{p}_H = \frac{\kappa_H^2}{\alpha}$, 销售利润为 $\hat{\pi}_1 = \frac{q_H \kappa_H^2}{2\alpha}$; 2) 当分别对偏好高、低发电成本电量的大用户提供高、低发电成本电量, 即实施“强”差异化发电策略时, 发电商最优发电成本

$$\text{水平为 } \tilde{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha}, \tilde{\chi}_L = \frac{\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L}}{\alpha}, \text{ 均衡的}$$

$$\text{售价为 } \tilde{p}_H = \frac{\kappa_H^2 - (\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha},$$

$$\tilde{p}_L = \frac{\kappa_L \left(\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha}, \text{ 以及销售利润为 } \tilde{\pi}_H = \frac{q_H \kappa_H^2 + \frac{(Q_L \kappa_L - q_H(\kappa_H - \kappa_L))^2}{Q_L}}{2\alpha};$$

3) 在发电商以偏

好低发电成本电量的大用户保留价格同时提供高、低发电成本电量, 即采用“弱”差异化发电策略下,

其最优发电成本水平为 $\tilde{\chi}_H = \tilde{\chi}_L = \frac{\kappa_L}{\alpha}$, 相应的均

衡电量价格为 $\tilde{p}_H = \tilde{p}_L = \frac{\kappa_L^2}{\alpha}$, 销售利润为 $\tilde{\pi}_{III} = \frac{\kappa_L^2(Q_H + Q_L)}{2\alpha}$.

证明 在基准情形 I 下, 发电商为高发电成本电量制定的价格及其销售利润分别为

$$p_H = \kappa_H \chi_H, \pi_I = q_H \chi_H \left(\kappa_H - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) \quad (18)$$

求解 π_I 对 χ_H 的一阶偏导数并令其等于零, 解之可得

$$\hat{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha} \quad (19)$$

将上式代入式(18), 得到

$$\hat{p}_H = \frac{\kappa_H^2}{\alpha}, \hat{\pi}_I = \frac{q_H \kappa_H^2}{2\alpha} \quad (20)$$

而在基准情形 II 下, 发电商将以 $p_L = \kappa_L \chi_L$ 出售低发电成本电量. 此时, 激励相容约束使得偏好高发电成本电量的大用户并不在乎购买哪一种类型的电量, 因而有

$$\begin{cases} p_H = \kappa_H \chi_H - \chi_L (\kappa_H - \kappa_L) \\ \pi_{II} = q_H \left[\chi_H \left(\kappa_H - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) - \chi_L (\kappa_H - \kappa_L) \right] + \\ Q_L \chi_L \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_L}{2} \right) \end{cases} \quad (21)$$

显然, π_{II} 是关于 χ_i 的凹函数. 由上式的一阶条件得

$$\tilde{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha}, \tilde{\chi}_L = \frac{\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L}}{\alpha} \quad (22)$$

上式表明, 发电商对高发电成本电量的成本选择等于其有效水平, 而对低发电成本电量的成本选择则低于其有效水平. 这与 Moorthy 和 Png^[38] 的研究结论在本质上是—致的. 同样地, 定义侵蚀指数 $\omega_1 = \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L \kappa_L}$, 考虑到保证发电商选择的 $\tilde{\chi}_L$ 取值非负, 所以基准情形 II 只

有在 $\kappa_L \geq \frac{q_H \kappa_H}{Q_L + q_H}$, 即满足 $\omega_1 \leq 1$ 的条件下才可以发生. 将式(22) 分别代入 p_H 、 p_L 以及 π_{II} 的解析式中, 经合并整理后得到如下均衡解

$$\begin{cases} \tilde{p}_H = \frac{\kappa_H^2 - (\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha} \\ \tilde{p}_L = \frac{\kappa_L \left(\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha} \\ \tilde{\pi}_{II} = \frac{q_H \kappa_H^2 + \frac{(Q_L \kappa_L - q_H(\kappa_H - \kappa_L))^2}{Q_L}}{2\alpha} \end{cases} \quad (23)$$

对比式(20) 和式(23), 发现后者的最优销售利润大于等于前者的均衡值, 即 $\tilde{\pi}_{II} \geq \hat{\pi}_I$. 这表明当发电成本内生选择时, 对发电商而言基准情形 II 是相对基准情形 I 的优势策略.

最后, 在基准情形 III 下, 不论发电成本如何, 发电商都以偏好低发电成本电量的大用户保留价格来销售高、发电成本电量. 其中, 将高发电成本电量同时向两种电量偏好大用户提供, 而低发电成本电量仅被定位在对其偏好的大用户, 则

$$\begin{cases} p_H = \kappa_L \chi_H, p_L = \kappa_L \chi_L \\ \pi_{III} = Q_H \chi_H \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) + Q_L \chi_L \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_L}{2} \right) \end{cases} \quad (24)$$

为使 π_{III} 等式右边最大化, 分别对 χ_H 和 χ_L 求一阶条件, 得到

$$\tilde{\chi}_H = \tilde{\chi}_L = \frac{\kappa_L}{\alpha} \quad (25)$$

将上式代入式(24), 得

$$\begin{cases} \tilde{p}_H = \tilde{p}_L = \frac{\kappa_L^2}{\alpha} \\ \tilde{\pi}_{III} = \frac{\kappa_L^2(Q_H + Q_L)}{2\alpha} \end{cases} \quad (26)$$

命题 3 在 $\omega_1 \leq 1 + \frac{Q_H - q_H}{Q_L}$ 的情形下, 发电商才可以在发电成本垂直差异电力市场上实施概率发电, 且其均衡时的高、低发电成本水平选

择分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\chi}_H &= \frac{\kappa_L + \frac{Q_L q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)}}{\alpha} \\ \bar{\chi}_L &= \frac{\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H + Q_L - q_H}}{\alpha} \end{aligned} \right. \quad (27)$$

相应地, 最优电量价格与总销售利润分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{p}_H &= \frac{\kappa_L^2 + \frac{Q_L q_H (\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L + \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H + Q_L - q_H} \right)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)}}{\alpha} \\ \bar{p}_\lambda &= \frac{\kappa_L \left[\kappa_L (Q_H + Q_L) ((Q_H - q_H)^2 + Q_H Q_L) - Q_L \kappa_H q_H^2 \right]}{\alpha Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \\ \bar{\pi}_{HA} &= \frac{(Q_H + Q_L) \left(\kappa_L^2 + \frac{Q_L q_H^2 (\kappa_H - \kappa_L)^2}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \right)}{2\alpha} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

证明 为了便于叙述, 在后文分析中, 笔者不失一般性地设 $t = 0$. 这意味着发电商将利用所有低成本发电容量由双成本层次的概率发电构造概率性电量供给. 也就是说, 此时 $\xi_L^* = Q_L$. 发电商的销售利润可表示为

$$\begin{aligned} \pi_{HA} |_{\xi_L^* = Q_L} &= \\ & Q_H \chi_H \left(\kappa_H - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) + Q_L \left[\chi_L \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_L}{2} \right) + \right. \\ & \left. \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L) (\chi_H - \chi_L)}{Q_H + Q_L - q_H} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

可以看出, 在此概率发电下, $\pi_{HA} |_{\xi_L^* = Q_L}$ 为成本水平 χ_i 的严格凹函数, 则存在唯一确定的均衡解使其一阶条件成立, 且求解可得式 (27). 为了保证发电商选择的 $\check{\chi}_L$ 取值非负, 所以概率发电仅在 $\kappa_L \geq \frac{q_H \kappa_H}{Q_H + Q_L}$, 即 $\varpi_1 \leq 1 + \frac{Q_H - q_H}{Q_L}$ 下才可

以出现. 在此基础上, 结合 $\lambda^* = \frac{Q_H - q_H}{Q_H + Q_L - q_H}$,

将上述 $\bar{\chi}_i$ 分别代入式 (5)、式 (7) 和式 (29) 中, 得到 \bar{p}_H 、 \bar{p}_λ 和 $\bar{\pi}_{HA}$, 且解析式如式 (28) 所示.

4.2 发电情形对比

如前所述, 命题 2 和命题 3 已经给出了与不同发电情形对应的发电成本内生选择、总销售利润及其参数约束条件. 其中, 发电成本内生选择包括两种电量成本水平、3 种电量销售价格、低成本发电容量概率性供给量以及高成本发电概率, 且解析表达见表 2 所示.

接下来, 本节通过对概率发电与 3 种基准情形下均衡解的比较分析, 从而给出概率发电策略的最优性条件.

1) 当 $\varpi_1 > 1 + \frac{Q_H - q_H}{Q_L}$ 时, 基准情形 II 和概率发电都不会出现. 此外, 对发电商而言, 基准情形 I 相比基准情形 III 更有利可图, 所以前者的均衡解是最优策略.

2) 如果 $1 < \varpi_1 \leq 1 + \frac{Q_H - q_H}{Q_L}$, 基准情形 II 不会出现, 但概率发电变得可以出现. 这时, 对比可得基准情形 I 是相对概率发电的优势策略, 即前者的均衡解仍然是发电商的最优策略选择.

3) 当且仅当 $\varpi_1 \leq 1$ 时, 基准情形 II 和概率发电均是可行的方案. 而相对基准情形 I, 发电商在基准情形 II 下获得的均衡销售利润更大, 于是在不考虑概率发电下, 发电商只能在基准情形 II 和基准情形 III 之间做出选择. 进一步地, 比较此两种基准情形以及概率发电下的发电商最优策略, 所得到的相关结论分别在推论 1 和推论 2 中列出.

推论 1 如果偏好低成本电量的大用户对发电商单位成本的估价较小, 需分两种情况讨论. 若 κ_L 满足

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma \kappa_H}{\sigma + \sqrt{Q_H - q_H}} < \\ \kappa_L \leq \frac{\kappa_H \sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}}}{\sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}} + \sqrt{Q_H - q_H}} \\ \text{s. t. } \sigma = \sqrt{q_H \left(\frac{Q_L + q_H}{Q_L} - \frac{Q_L q_H (Q_H + Q_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \right)}, \\ \frac{q_H \kappa_H}{Q_L + q_H} < \frac{\sigma \kappa_H}{\sigma + \sqrt{Q_H - q_H}} < \\ \frac{\kappa_H \sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}}}{\sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}} + \sqrt{Q_H - q_H}} \end{array} \right. \quad (30)$$

那么概率发电为发电商的最优策略选择。而若 κ_L 满足 $\frac{q_H \kappa_H}{Q_L + q_H} \leq \kappa_L \leq \frac{\sigma \kappa_H}{\sigma + \sqrt{Q_H - q_H}}$ ，则基准情形 II 变为发电商的均衡策略；此外，在上述决策中，发电商一旦采用概率发电，将会选择相比基准情形 II 更低的高发电成本电量的最优成本水平及其均衡销售价格，但同时也会提高对低发电成本电量的最优成本水平选择。

对推论 1 作如下说明：首先，为了让概率发电出现，发电商对低发电成本电量的支付意愿 κ_L 应该大于临界值 $\frac{q_H \kappa_H}{Q_L + q_H}$ 。如果该支付意愿过低，它会导致严重的品牌替换。另外，一个较低支付意愿也意味着在概率发电中，将高发电成本电量定位在偏好低发电成本电量的大用户，对发电商是没有多大好处的。正因为如此，要想概率发电成为可行，偏好低发电成本电量的大用户就必须拥有足够高的支付意愿；其次，引入概率发电使得产品线策略选择更加贴近于发电成本。直观表现为，定位在偏好高发电成本电量大用户的发电量成本下降了，而定位在偏好低发电成本电量大用户的发电量成本上升了。这一结论显然出乎常理，即在高、低发电成本电量之间增加折中的概率发电量，本期望随之出现更大的产品分

离。然而，发电商的选择恰好相反。为此，从最优的高、低发电成本水平两个维度进行分析：

1) 在基准情形中，高发电成本电量是专门针对偏好高发电成本电量的大用户，且均衡成本选择在其有效水平 $\frac{\kappa_H}{\alpha}$ 处。而在概率发电下，高发电成本电量的总发电容量一部分继续以确定性的方式销售给偏好高发电成本电量的大用户，而余下部分则通过概率发电提供给偏好低发电成本电量的大用户。由于偏好低发电成本电量的大用户对发电成本的估价较低，所以上述高发电成本电量的有效水平 $\frac{\kappa_H}{\alpha}$ 就变得太高了。因此，针对给定的发电成本选择能力，发电商将降低对高发电成本电量的成本投入。

2) 低发电成本电量仅限于提供给偏好低发电成本电量的大用户，所以购买该类型电量的大用户群保持不变。在基准情形下，之所以低发电成本电量的成本被压低至其有效水平之下，其原因在于为了减小侵蚀效应。更确切地说，此时发电商对高发电成本电量的定价为 $\kappa_H \chi_H - (\kappa_H - \kappa_L) \chi_L$ ，其中 $(\kappa_H - \kappa_L) \chi_L$ 是由低发电成本电量引起的品牌替换造成的价格下降量。然而，发电商实施概率发电后，以上高发电成本电量的销售价格变为 $\kappa_H \chi_H - (1 - \lambda)(\kappa_H - \kappa_L) \chi_L - \lambda(\kappa_H - \kappa_L) \chi_H$ ，且 $(1 - \lambda)(\kappa_H - \kappa_L) \chi_L$ 表示相应的电价减小量。尽管概率发电时的总侵蚀效应更高，但是可以直观地看出，因低发电成本电量所致的侵蚀效应反而比基准情形时的要小。除此之外，概率发电下购得电量的偏好低发电成本电量的大用户为 $Q_H + Q_L - q_H$ ，显然大于基准情形 II 下的 Q_L ，使得扭曲该种电量偏好大用户对单位发电成本的估价 κ_L 代价增高。这两方面考虑都将促使发电商提升低发电成本电量的最优成本水平，为的是从电量销售中获得更大的利润。

推论 2 与推论 1 相反，当偏好低发电成本电量的大用户对发电商单位成本的估价较大时，如 κ_L 满足

表 2 摇发电成本内生选择下的最优策略

Table 2 Optimal strategies under endogenous choices of generating cost

	基准发电			双成本层概率发电
	基准情形 I	基准情形 II	基准情形 III	
高发电成本电量成本水平	$\frac{\kappa_H}{\alpha}$	$\frac{\kappa_H}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L}{\alpha}$	$\frac{\kappa_H + \frac{Q_L q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)}}{\alpha}$
低发电成本电量成本水平	—	$\frac{\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L}}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H + Q_L - q_H}}{\alpha}$
高发电成本电量价格	$\frac{\kappa_H^2}{\alpha}$	$\frac{\kappa_H^2 - (\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L^2}{\alpha}$	$\frac{\kappa_H^2 + \frac{Q_L q_H (\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L + \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H + Q_L - q_H} \right)}{\alpha}}{\alpha}$
低发电成本电量价格	—	$\frac{\kappa_L \left(\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L^2}{\alpha}$	—
概率发电电量价格	—	—	—	$\frac{\kappa_L [\kappa_L (Q_H + Q_L) (Q_H - q_H)^2 + Q_H Q_L] - Q_L \kappa_H q_H^2}{\alpha Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2}$
低成本发电容量概率性供给量	—	—	—	Q_L
高成本发电概率率	—	—	—	$\frac{Q_H - q_H}{Q_H + Q_L - q_H}$
总销售利润	$\frac{q_H \kappa_L^2}{2\alpha}$	$\frac{q_H \kappa_L^2 + \frac{(Q_L \kappa_L - q_H (\kappa_H - \kappa_L))^2}{2\alpha}}{2\alpha}$	$\frac{\kappa_L^2 (Q_H + Q_L)}{2\alpha}$	$\frac{(Q_H + Q_L) \left(\kappa_L^2 + \frac{Q_L q_H^2 (\kappa_H - \kappa_L)^2}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \right)}{2\alpha}$
参数约束条件	—	$\varpi_1 \leq 1$	—	$\varpi_1 \leq 1 + \frac{Q_H - q_H}{Q_L}$

发电成本内生选择

$$\kappa_L > \frac{\kappa_H \sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}}}{\sqrt{\frac{q_H(Q_L + q_H)}{Q_L}} + \sqrt{Q_H - q_H}} \quad (31)$$

那么对发电商而言, 概率发电始终是最优策略选择; 与基准情形 III 相比, 采用概率发电使得发电商增大对高发电成本电量的均衡成本水平及其最优销售价格, 而减小低发电成本电量的均衡成本水平。

考虑到该推论相对简单, 在此仅作一个简要说明: 在式(31)成立下, 基准情形 II 是相对基准情形 III 的劣势策略, 对比基准情形 III 和概率发电下的均衡销售利润, 即可得到上述结论。基准情形 III 属于“弱”差异化发电策略, 且在其中高、低发电成本电量之间的成本差别为零。但是, 概率发电通过在发电成本方面对此两种类型电量供给进行有益地分离, 从而改善了发电成本的极端缺乏差异。具体表现为, 高发电成本电量的成本上升为的是提高边际盈利能力; 而低发电成本电量的成本水平下降在于避免品牌替换。

总之, 推论 1 和推论 2 的主要内容概括起来就是, 只要偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价满足 $\kappa_L > \frac{\sigma \kappa_H}{\sigma + \sqrt{Q_H - q_H}}$, 概率发电就是发电商的最优策略选择。

4.3 对大用户消费者剩余的讨论

前文已经证明了即使在发电商对其发电成本进行内生选择下, 概率发电仍然可以作为一种行之有效的处置过剩发电容量的方法。但是, 引入概率发电对成本选择的影响除了本身值得研究外, 市场上是否只有发电商唯一独自从中获益。为了理解与这新生的定价方式和发电成本选择相关的政策含义, 接下来将分析概率发电对发电成本垂直差异电力市场上两种电量偏好大用户消费者剩余总量的影响及其正负性, 所得结果在命题 4 中列出。

命题 4 当发电商的发电成本为内生变量且概率发电为其可行的策略选择时, 与基准情形 II

对比, 概率发电提高了大用户总的消费者剩余; 但是相对基准情形 III 而言, 概率发电下的大用户消费者剩余却是不升反降。

证明 在基准情形 II 中, 偏好低发电成本电量的大用户无法享受到任何消费者剩余, 即消费者剩余只能来自偏好高发电成本电量的大用户。此时, 后者的边际消费者剩余为 $v_{HL} - v_{LL}$, 则大用户的消费者剩余总量可表示为

$$cs_{II} = \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L - \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L} \right)}{\alpha} \quad (32)$$

而基准情形 III 下, 偏好低发电成本电量的大用户同样不享受消费者剩余, 仅偏好高发电成本电量的大用户拥有消费者剩余, 且其边际消费者剩余可表示为 $v_{HH} - v_{LH}$ 。这样, 大用户总的消费者剩余为

$$cs_{III} = \frac{q_H \kappa_L (\kappa_H - \kappa_L)}{\alpha} \quad (33)$$

当发电商实施概率发电时, 偏好低发电成本电量的大用户仍然无法拥有任何消费者剩余, 但是对偏好高发电成本电量的大用户而言, 其存在消费者剩余。相应地, 这时后者的边际消费者剩余为 $\lambda(v_{HH} - v_{LH}) + (1 - \lambda)(v_{HL} - v_{LL})$, 由此大用户的消费者剩余总量可表示为

$$cs_{\lambda} = \frac{q_H(\kappa_H - \kappa_L) \left(\kappa_L - \frac{Q_L q_H^2 (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \right)}{\alpha} \quad (34)$$

不难看出, 由于基准情形 II 中低发电成本电量的均衡成本水平低于概率发电下的最优值, 所以相比基准情形 II 而言, 概率发电时大用户的消费者剩余总量更大。但是基准情形 III 下总的消费者剩余又显然比概率发电时的还要大, 即为此三者中的最大值。

对命题 4 的解释如下: 只有当偏好高发电成本电量的大用户选择购买高发电成本电量时, 总的消费者剩余才会增大。这是因为偏好高发电成本电量的大用户从来不购买概率发电量, 以及偏好低发电成本电量的大用户始终保持在其价值估

计处. 相比于基准情形 II, 引入概率发电降低了高发电成本电量的成本水平, 同时提高了低发电成本电量的成本水平. 进一步地, 当概率发电被发电商采用时, 高发电成本电量的售价为 $v_{HH} - v_{HL} + v_{LL} - \lambda \Delta v$. 因此, 偏好高发电成本电量的大用户从中获得的消费者剩余为 $(\kappa_H - \kappa_L) \chi_L + \lambda(\kappa_H - \kappa_L)(\chi_H - \chi_L)$. 在基准情形 II 下, 偏好高发电成本电量的大用户获得的消费者剩余为 $(\kappa_H - \kappa_L) \chi_L$. 考虑到概率发电下的均衡 $\check{\chi}_L$ 大于基准情形 II 下的最优 $\tilde{\chi}_L$, 则概率发电时大用户消费者剩余的第一项就严格大于基准情形 II 时的消费者剩余. 另外, 概率发电时大用户消费者剩余的第二项值为正, 所以概率发电总是能够提高消费者剩余^⑧. 从直观上看, 实施概率发电可以激发高发电成本电量形成更大的价格侵蚀, 从而使对该类型电量偏好的大用户获得更高的消费者剩余. 同理, 与基准情形 III 中发电商提供“弱”差异化发电量相比, 由 $\frac{q_H^3 Q_L (\kappa_H - \kappa_L)^2}{\alpha Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} > 0$ 可得 $cs_A < cs_{III}$, 即概率发电下偏好高发电成本电量的大用户只能获得更小的消费者剩余总量. 这是因为发电成本选择和采用概率发电都会给发电商提供多种工具, 以从大用户那里掠取更多消费者

剩余, 即发电成本内生选择下概率发电会更大幅度降低大用户的消费者剩余.

5 模型拓展研究

至此, 前文已经分析了在确定性市场需求下发电商的最优策略选择. 作为内生选择模型的扩展研究^⑨, 本部分尝试考虑不确定性市场需求, 为的是考察并对该情形下如果发电商必须在市场需求不确定性被分解之前决定发电成本水平和概率发电形式, 那么概率发电是否会继续出现及最优性展开研究. 正是基于这种研究目的, 且在模型构建中高发电成本电量的需求 q_H 是一个重要的影响因素, 所以笔者假设市场需求不确定性仅与此参数有关^⑩. 具体而言, 发电商面临最低需求 \underline{q}_H 的概率为 γ , 而最高需求 \bar{q}_H 的概率即为 $1 - \gamma$, 且 $\underline{q}_H < Q_H < \bar{q}_H$. 在此情景下, 发电商不得不确定是否有必要采用概率发电. 有意思的是, 研究结果表明当替换指数 $\omega_2 = \frac{\Gamma_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L \kappa_L}$ 足够小时, 概率发电是可以继续出现的. 同理, 在上述条件下, 3 种基准情形中 II 或 III 均有可能是相对优势策略, 且只要满足

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa_L > \frac{\kappa_H \sqrt{\frac{\Gamma_H (\Gamma_H + Q_L)}{Q_L} - \frac{Q_L q_H^2 (Q_H + Q_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - \underline{q}_H)^2}}}{\sqrt{\frac{\Gamma_H (\Gamma_H + Q_L)}{Q_L} - \frac{Q_L \bar{q}_H^2 (Q_H + Q_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - \underline{q}_H)^2} + \sqrt{Q_H - \Gamma_H}}} \\ \text{s. t. } \Gamma_H = \gamma q_H + (1 - \gamma) Q_H \end{array} \right. \quad (35)$$

概率发电就是发电商的最优策略选择, 相关结论如表 3 所示.

在这种情况下, 发电商为了实现概率发电,

会保留部分高成本发电容量, 并将其和一定的低成本发电容量混合构成概率性电量供给. 具体概述如下:

⑧ 也可以理解为概率发电提高大用户的整体福利, 因为只有在发电商认为概率发电是最优策略选择时, 才会采用它.
 ⑨ 在此, 虽然也可以对第二部分进行扩展研究, 但是笔者排除了这种模型拓展路径而选择了第四部分进行扩展, 是因为这样本文研究的层次更分明、逻辑关系更清晰. 另外, 在一定程度上讲, 发电成本内生选择模型涵盖在内生选择模型之内, 限于篇幅, 从略.
 ⑩ 但下文的方法框架可以容纳一般的情形. 其证明过程与命题 5 类似, 篇幅限制在此不再赘述.

表 3 不确定性市场需求下的发电成本内生选择及销售利润

Table 3 Endogenous generating cost choices and sales profits under uncertain market demand

		基准发电			双成本层次概率发电
		基准情形 I	基准情形 II	基准情形 III	
发电成本内生选择	高发电成本电量成本水平	$\frac{\kappa_H}{\alpha}$	$\frac{\kappa_H}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L + \frac{Q_L q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)}}{\alpha}$
	低发电成本电量成本水平	—	$\frac{\kappa_L - \frac{\Gamma_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L}}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L}{\alpha}$	$\frac{\kappa_L - \frac{q_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_H + Q_L - q_H}}{\alpha}$
	高成本发电概率	—	—	—	$\frac{Q_H - q_H}{Q_H + Q_L - q_H}$
销售利润		$\frac{\kappa_H^2 \Gamma_H}{2\alpha}$	$\frac{\kappa_L^2 Q_L + \Gamma_H \left(\kappa_L^2 + \frac{(\kappa_H - \kappa_L)^2 (\Gamma_H + Q_L)}{Q_L} \right)}{2\alpha}$	$\frac{\kappa_L^2 (Q_H + Q_L)}{2\alpha}$	$\frac{(Q_H + Q_L) \left(\kappa_L^2 + \frac{Q_L q_H^2 (\kappa_H - \kappa_L)^2}{Q_H (Q_H + Q_L - q_H)^2} \right)}{2\alpha}$
参数约束条件		—	$\varpi_2 \leq 1$	—	$\varpi_2 \leq \frac{\Gamma_H (Q_H + Q_L - q_H)}{Q_L q_H}$

命题 5 对发电商而言, 当其面对最低需求 q_H 的概率为 γ , 最高需求 \bar{q}_H 的概率为 $1 - \gamma$ 的不确定性市场需求, 且 $q_H < Q_H < \bar{q}_H$ 时, 不论基准情形 II 和基准情形 III 之间谁优谁劣, 只要式 (35) 所示的偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价约束成立, 概率发电仍然会以最优策略选择的身份出现; 与此相应, 发电商将依次预留可计算的高、低成本发电容量, 并以此向大用户提供概率性电量供给。

证明 以下沿用推论 1 中给出的分析逻辑。当采用基准情形 I 时, 发电商仅以价格 v_{HH} 对偏好高发电成本电量的大用户提供服务, 且其最优成本水平和均衡销售利润分别为

$$\bar{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha}, \bar{\pi}_I = \frac{\kappa_H^2 \Gamma_H}{2\alpha} \quad (36)$$

而在基准情形 II 下, 发电商将会分别向偏好高、低发电成本电量的大用户供给相应的类型电量。此时, 发电商的均衡成本水平与最优销售利润可表示为

$$\begin{cases} \bar{\chi}_H = \frac{\kappa_H}{\alpha}, \bar{\chi}_L = \frac{\kappa_L - \frac{\Gamma_H (\kappa_H - \kappa_L)}{Q_L}}{\alpha} \\ \bar{\pi}_{II} = \frac{\kappa_L^2 Q_L + \Gamma_H \left(\kappa_L^2 + \frac{(\kappa_H - \kappa_L)^2 (\Gamma_H + Q_L)}{Q_L} \right)}{2\alpha} \end{cases} \quad (37)$$

类似地, 为了保证发电商选择的 $\bar{\chi}_L$ 取值非负, 所以基准情形 II 只有在 $\kappa_L \geq \frac{\Gamma_H \kappa_H}{\Gamma_H + Q_L}$, 即满足 $\varpi_2 \leq 1$ 条件下才可以出现。

当采用基准情形 III 时, 发电商对两种电量偏好大用户都提供高发电成本电量, 并把低发电成本电量仅被销售给偏好低发电成本电量的大用户, 则计算可得最优成本水平和均衡销售利润为

$$\bar{\chi}_H = \bar{\chi}_L = \frac{\kappa_L}{\alpha}, \bar{\pi}_{III} = \frac{\kappa_L^2 (Q_H + Q_L)}{2\alpha} \quad (38)$$

然而, 由于发电商面临偏好高发电成本电量的大用户关于需求的不确定性, 因此当发电商采用概率发电时, 其需要选择定位于偏好高发电成本电量大用户的最优高成本发电容量 ρ_H^* , 同时

确定构成概率发电量的均衡低成本发电容量 φ_L^* 。由于已设交易成本 $t=0$ ，则发电商的最优策略是将全部低成本发电容量都用于概率性电量供给，即 $\varphi_L^* = Q_L$ 。这样，大用户购买概率发电量为高发电成本电量的概率为 $\frac{Q_H - \rho_H^*}{Q_H + Q_L - \rho_H^*}$ 。

如前所述，给定偏好低发电成本电量的大用户需求 q_L ，以下进一步分解市场需求不确定性，分别考虑高发电成本电量的需求规模 q_H 的两种实现情形：

1) 当大用户对高发电成本电量的需求 q_H 实现值为 \underline{q}_H 时，将其代入式 (11) 可以将发电商的销售利润变形为

$$\begin{aligned} \pi_{HA} |_{q_H = \underline{q}_H} &= \underline{q}_H (\kappa_H (\chi_H - \chi_L)) + \kappa_L \chi_L - \\ &\frac{\Delta v (Q_H - \rho_H^*)}{Q_H + Q_L - \rho_H^*} - c_H + (Q_H - \rho_H^*) (\kappa_L \chi_H - c_H) + \\ &Q_L (\kappa_L \chi_L - c_L) \end{aligned} \quad (39)$$

2) 当大用户对高发电成本电量的需求 q_H 实现值为 \bar{q}_H 时，对应的发电商销售利润为

$$\begin{aligned} \pi_{HA} |_{q_H = \bar{q}_H} &= \rho_H^* (\kappa_H (\chi_H - \chi_L)) + \kappa_L \chi_L - \\ &\frac{\Delta v (Q_H - \rho_H^*)}{Q_H + Q_L - \rho_H^*} - c_H + (Q_H - \rho_H^*) (\kappa_L \chi_H - \\ &c_H) + Q_L (\kappa_L \chi_L - c_L) \end{aligned} \quad (40)$$

至此，发电商的总利润可由式 (39) 和式 (40) 加权平均，即 $\gamma \pi_{HA} |_{q_H = \underline{q}_H} + (1 - \gamma) \times \pi_{HA} |_{q_H = \bar{q}_H}$ 表出。将条件利润代入，即得

$$\begin{cases} \pi_{HA}(\rho_H^*) = \\ \frac{Q_L (\kappa_H - \kappa_L) (\chi_H - \chi_L) (\gamma \underline{q}_H + (1 - \gamma) \rho_H^*)}{Q_H + Q_L - \rho_H^*} + \\ \gamma \kappa_L \chi_H (\underline{q}_H - \rho_H^*) + \chi_H Q_H \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) + \\ \chi_L Q_L \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_L}{2} \right) \\ \text{s. t. } \underline{q}_H \leq \rho_H^* \leq Q_H \end{cases} \quad (41)$$

进一步地，由 $\pi_{HA}(\cdot)$ 对 ρ_H^* 的二阶偏导数

恒为正，且 $\frac{\partial^2 \pi_{HA}(\cdot)}{\partial \chi_H^2} < 0$ 、 $\frac{\partial^2 \pi_{HA}(\cdot)}{\partial \chi_L^2} < 0$ ，不难证明上式的一阶条件是在鞍点而非最大值处成立。也就是说，只能从两个角点 Q_H 和 \underline{q}_H 分析该最优解的存在性。

1) 在角点解 $\rho_H^* = \underline{q}_H$ 处，即实施概率发电。此时，发电商的销售利润可表示为

$$\begin{aligned} \pi_{HA} |_{\rho_H^* = \underline{q}_H} &= \\ &\frac{\underline{q}_H Q_L (\kappa_H - \kappa_L) (\chi_H - \chi_L)}{Q_H + Q_L - \underline{q}_H} + \chi_H Q_H \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_H}{2} \right) + \\ &\chi_L Q_L \left(\kappa_L - \frac{\alpha \chi_L}{2} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

分别求解它对 χ_H 和 χ_L 的一阶偏导数并令其等于零，解之可得

$$\begin{cases} \chi_H^* = \frac{Q_L \underline{q}_H (\kappa_H - \kappa_L)}{\alpha \left(\kappa_L + \frac{Q_H (\underline{q}_H + Q_L - \underline{q}_H)}{Q_H + Q_L - \underline{q}_H} \right)} \\ \chi_L^* = \frac{\underline{q}_H (\kappa_H - \kappa_L)}{\alpha \left(\kappa_L - \frac{Q_H (\underline{q}_H + Q_L - \underline{q}_H)}{Q_H + Q_L - \underline{q}_H} \right)} \end{cases} \quad (43)$$

约束条件为 $\kappa_L \geq \frac{\underline{q}_H \kappa_H}{Q_H + Q_L}$ ，以确保 $\chi_L^* \geq 0$ 。也就是说，当概率发电可以出现时，侵蚀指数满足 $\varpi_2 \leq \frac{\Gamma_H (Q_H + Q_L - \underline{q}_H)}{Q_L \underline{q}_H}$ 。将上式代入式 (42)，经化简整理后得

$$\pi_{HA}^* = \frac{(Q_H + Q_L) \left(\kappa_L^2 + \frac{Q_L \underline{q}_H^2 (\kappa_H - \kappa_L)^2}{Q_H (Q_H + Q_L - \underline{q}_H)^2} \right)}{2\alpha} \quad (44)$$

2) 在角点解 $\rho_H^* = Q_H$ 处，这与基准情形 II 很难区分，即二者可以视作为同一种情况处理。考虑到其已不属于概率发电范畴，故相应的均衡解在此不予考虑。

综上所述，只有在 $\kappa_L \geq \frac{\kappa_H \Gamma_H}{\Gamma_H + Q_L}$ ，即 $\varpi_2 \leq 1$ 的前提下，基准情形 II 和概率发电才可以出现，且后者有可能最终成为发电商的最优策略选

择. 而此时, 不论基准情形 II 和基准情形 III 之间相对优劣结果如何, 由 $\pi_{HA_1}^* > \pi_{III}$ 可知, 基准情形 III 是概率发电的无条件相对劣势策略, 所以发电商的最优策略只会在基准情形 II 与概率发电之间选择. 既然如此, 当且仅当 $\pi_{HA_1}^* > \pi_{II}$, 即式 (35) 成立时, 概率发电才是发电商的最优策略选择. 需要说明的是, 式 (35) 为基准情形 II 和概率发电同时出现的区间 $\kappa_L \geq \frac{\kappa_H \Gamma_H}{\Gamma_H + Q_L}$ 的一个子集.

可以看出, 这如同推论 1 和推论 2 所述, 偏好低发电成本电量的大用户对发电成本的估价需要高于概率发电以最优策略选择的身份出现时的某一临界值. 不过值得注意的是, 在 $\gamma = 1$ 的特定条件下, 命题 5 与推论 1 和推论 2 中的相关结论理所当然地合二为一.

6 数值模拟

由于计算和证明过程都比较复杂, 很难直接利用模型对所提出的 5 种发电情形下的发电商电

量供给均衡与大用户消费者剩余水平进行比较, 为更形象地描述概率发电对发电商最优策略选择的影响程度, 本部分设计一个算例对结果进行数值模拟.

在模型构建的基本假设与符号说明下, 当发电成本外生选择时, 表 4 列出了笔者给定的发电成本、需求规模与发电容量以及大用户的顾客感知价值三方面的经济技术参数, 而其它参数定义如前. 其中, 对单位变动发电成本 $c_i (i = H, L)$ 的确定, 综合考虑低碳经济下火力发电投资内部成本、辅助服务成本和环境效益等各方面因素, 选取部分统计数据的中、下两档成本水平作为研究对象^[39]. 而发电商的边际附加交易成本 t 约为高成本发电时变动发电成本的 8% ~ 12%; 此外, 需求规模与发电容量主要参见常规的日前电力市场每个交易时段的负荷供需情况, 不同的是本文考虑只有一个发电商的完全垄断情形. 最后, 电力大用户的顾客感知价值是主观的、个性化的, 因其不同感受而有不同的判断, 在此暂定为在对应类型电量总发电成本的 1.5 倍 ~ 2.5 倍范围内取值, 而 Δv 可相应计算得到^[40].

表 4 发电商发电决策的经济技术参数

Table 4 Economic and technical parameters of the generator's generation decisions

参数	发电成本 / (元 · kW ⁻¹)			需求规模与发电容量 / MW				顾客感知价值 / (元 · kW ⁻¹)				
	t	c_H	c_L	Q_H	Q_L	q_H	q_L	v_{HH}	v_{LH}	v_{HL}	v_{LL}	Δv
取值	0.04	0.4	0.2	240	320	200	380	1	0.75	0.6	0.4	0.05

在上述算例情景的某一交易时段, 将相关参数取值依次代入式 (2) ~ 式 (10), 即可得到发电商在不同基准和概率发电情形下的电量价格与销售利润. 考虑到该发电成本垂直差异电力市场存在过剩的高成本发电容量, 为了验证此时发电商实施概率发电对其是有利可图的, 分别求解发电商的最优售电价格 (含高、低发电成本电量和概率发电量)、低成本发电容量概率性供给量、高成本发电概率水平以及均衡的销售利润, 并对结果进行比较分析.

首先, 与基准情形 I 和基准情形 II 相比, 引入概率发电都会降低高发电成本电量的销售价格. 如表 5 中第一行的最右两列与最左两列数据所示, 其中基准情形 I 下的电量价格 1 元 · kW⁻¹ 高于基准情形 II 下的 0.8 元 · kW⁻¹, 而两种概

率发电形式下的售价 0.794 元 · kW⁻¹ 和 0.78 元 · kW⁻¹ 都低于基准情形 II 下的销售价格. 究其原因在于, 在概率性电量供给下, 发电商选择高成本发电的概率水平隐式控制上述侵蚀效应的影响程度. 直观表现为: 三成本层次概率发电下的 $\lambda^* = 0.4$ 较大, 这时概率性电量供给相对更接近替代高发电成本电量, 因此品牌替换更严重; 而双成本层次概率发电下的 $\lambda^* = 0.111$ 较小, 则大部分的低发电成本电量就得以概率性电量供给的形式提供给偏好低发电成本电量的大用户. 与此同时, 为概率发电支付的附加交易成本削弱了发电商的销售利润, 所以该参数取值大小将决定哪种概率发电形式会被最终采用. 相对式 (17) 给出的临界值, 当 $t = 0.04$ 元 · kW⁻¹, 即取值较大时, 由其造成发电商对削减销售利润的顾虑变

得显著. 因此, 为了减小侵蚀效应, 发电商并不会用尽所有低发电成本电量来构成概率发电量, 而是对其保留 270.557MW 单独提供给偏好低发电成本电量的大用户, 即实施三成本层次的概率发电形式. 这可从表 5 中最后一行的最右两列数据看出, 即双成本层次概率发电下的销售利润 142.489 千元小于三成本层次概率发电下的销售利润 150 千元.

其次, 与基准情形 III 相比, 两种概率发电下高发电成本电量的销售价格都表现出不同程度的提高, 且在低成本发电容量概率性供给 $\xi_L^* = Q_L$

下的售价上升幅度更大. 如表 5 中第一行的后三列数据所示, 基准情形 III 下的电量价格为 0.75 元 \cdot kW⁻¹, 而三、双成本层次概率发电下的售价依次为 0.78 元 \cdot kW⁻¹ 和 0.794 元 \cdot kW⁻¹, 对应的增幅分别为 4% 和 5.87%. 另外, 不考虑概率发电下, 基准情形 III 是发电商的相对最优策略. 在概率发电可以出现的条件下, 双成本层次的概率发电只比基准情形 I 获得的销售利润高, 故不会被发电商选择, 而三成本层次的概率发电更有利可图, 才是发电商的最优策略选择.

表 5 发电成本外生选择模型的最优策略选择

Table 5 Optimal strategy choices of models under exogenous generation cost choices

		基准发电			概率发电	
		基准情形 I	基准情形 II	基准情形 III	双成本层次	三成本层次
发电成本外生选择	高发电成本电量价格/(元 \cdot kW ⁻¹)	1	0.8	0.75	0.794	0.78
	低发电成本电量价格/(元 \cdot kW ⁻¹)	—	0.4	0.4	—	0.4
	概率发电量价格/(元 \cdot kW ⁻¹)	—	—	—	0.439	0.54
	低成本发电容量概率性供给量/MW	—	—	—	320	49.443
	高成本发电概率	—	—	—	0.111	0.4
销售利润/千元		120	144	148	142.489	150

以上为发电商成本外生选择下的均衡策略选择及最优性分析, 接下来验证当发电成本内生选择时, 与发电模型构建、均衡求解以及发电情形对比相关的研究结论. 在表 4 所列的经济技术参数基础上, 给定 $\kappa_H = 1.1$ 、 $\kappa_L = 0.9$ 以及 $\alpha = 1.5$ kW \cdot 元⁻¹, 将其代入命题 2 和命题 3, 可得不同发电情形下发电成本内生选择模型的均衡解与大用户的消费者剩余.

首先, 可计算出此时侵蚀指数 $\varpi_1 \leq 1$, 这样对发电商而言, 基准情形 II 和概率发电都是可以出现的. 与基准情形 I 下的最优销售利润 80.667 千元相比, 基准情形 II 下发电商可获得的均衡销售利润显著增加, 达到了 144.733 千元. 这验证了当发电成本选择为外生变量决策过程时, 基准情形 II 是相对基准情形 I 的优势策略. 于是如果不考虑概率发电, 发电商只能在基准情形 II 和基准情形 III 之间做出某种取舍. 如果考虑双成本层次概率发电, 由于偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本的估价 $\kappa_L > 0.369$, 也就是此时式 (31) 成立, 则基准情形 II 是相对基准情形 III 的劣势策略. 这可从表 6 倒数第二行的中间两列数据看

出, 即销售利润 151.2 千元大于 144.733 千元, 因此发电商的最优策略选择只会在双成本层次概率发电和基准情形 III 之间产生.

其次, 对比基准情形 III 和双成本层次概率发电的均衡解, 可得后者的销售利润 154.273 千元更大, 这表明概率发电是发电商的最优策略选择. 此外, 实施概率发电后, 发电商在增大对高发电成本电量的均衡成本水平及其最优销售价格的同时, 减小低发电成本电量的均衡成本水平. 如表 6 中最右两列的前三行数据所示, 其中基准情形 III 下高发电成本电量的成本水平 0.6 元 \cdot kW⁻¹ 及其销售价格 0.54 元 \cdot kW⁻¹ 分别小于双成本层次概率发电下的对应值 0.699 元 \cdot kW⁻¹、0.907 元 \cdot kW⁻¹, 而双成本层次概率发电下发电商对低发电成本电量的最优成本水平选择 0.526 元 \cdot kW⁻¹ 低于基准情形 III 下的成本水平选择 0.6 元 \cdot kW⁻¹.

最后, 就发电成本内生选择下的大用户消费者剩余而言, 其中偏好低发电成本电量的大用户始终不享受消费者剩余. 如前所述, 与基准情形 II 中提供“强”差异化的发电量相比, 双成本层次概率发电下高发电成本电量的成本水平降低了,

而低发电成本电量的成本水平提高了. 这使得当发电商采用概率发电时, 偏好高发电成本电量的大用户从中获得的消费者剩余增加, 这与表 6 最后一行中 23.561 千元大于 20.667 千元相一致; 但是, 相比于基准情形 III 中采用“强”差异化发电策略, 发电

商的成本水平选择与实施概率发电都有利于其从偏好高发电成本电量的大用户中掠取更多的消费者剩余, 以致双成本层次概率发电下的大用户消费者剩余不升反降, 进而表现为 23.561 千元介于最大值 24 千元和最小值 20.667 千元之间.

表 6 发电成本内生选择模型的均衡解与大用户的消费者剩余

Table 6 Equilibrium solutions of models under endogenous generation cost choices and large user's consumer surplus

		基准发电			双成本层次概率发电
		基准情形 I	基准情形 II	基准情形 III	
模型 均 衡 解	高发电成本电量成本水平/(元·kW ⁻¹)	0.733	0.733	0.6	0.699
	低发电成本电量成本水平/(元·kW ⁻¹)	—	0.519	0.6	0.526
	高发电成本电量价格/(元·kW ⁻¹)	0.807	0.703	0.54	0.907
	低发电成本电量价格/(元·kW ⁻¹)	—	0.465	0.54	—
	概率发电量价格/(元·kW ⁻¹)	—	—	—	0.545
	低成本发电容量概率性供给量/MW	—	—	—	320
	高成本发电概率	—	—	—	0.111
	销售利润/千元	80.667	144.733	151.2	154.273
大用户消费者剩余/千元		—	20.667	24	23.561

以下分析模型拓展部分的研究结论. 在此之前, 同样先给定参数取值 $\gamma = 0.3$ 、 $\bar{q}_H = 260$ MW 以及 $q_H = 180$ MW, 将其代入计算可得这时替换指数 $\omega_2 \leq 1$, 表明基准情形 II 和概率发电都是可行的方案, 即后者能成为发电商最优策略选择的条件满足. 由表 7 可知, 在不考虑概率发电下, 发电商在基准情形 I 和基准情形 II 中选择的最优高发电成本电量成本水平均为 0.733 元·kW⁻¹, 且高于基准情形 III 下的 0.6 元·kW⁻¹. 但是, 基准情形 II 中的均衡低发电成本电量成本水平 0.516 元·kW⁻¹ 则低于基准情形 III 下的 0.6 元·kW⁻¹. 在决定发电策略优劣的销售利润方面, 基准情形 III 的 151.2 千元最大, 即其为相对最优策略, 而基准情形 I 仅为 81.473 千元最小, 则相

对最劣; 反之, 如果发电商考虑双成本层次的概率发电形式, 其销售利润将在角点解 $\rho_H^* = 180$ MW 处达到最优, 且满足 $\pi_{H\lambda_1}^* > \pi_{III}^*$. 此时, 发电商选择高成本发电的概率水平为 $\lambda^* = 0.158$, 而均衡时高、低发电成本电量成本均处于 3 种基准情形对应值的中间水平, 分别为 0.684 元·kW⁻¹ 和 0.537 元·kW⁻¹. 另外, 此时偏好低发电成本电量的大用户对发电商单位成本的估价 $\kappa_L > 0.741$, 即式(35)成立, 则表明 $\pi_{H\lambda_1}^* > \pi_{II}^*$. 也就是说, 实施概率发电才是发电商的最优策略. 这与表 7 倒数第一行中双成本层次概率发电下的最优销售利润 153.434 千元比 3 种基准情形的均衡利润都要大相一致. 其中, $\kappa_L > 0.741$ 显然是 $\omega_2 \leq 1$ 即 $\kappa_L \geq 0.426$ 的一个子集.

表 7 拓展模型的发电成本内生选择及其销售利润

Table 7 Endogenous generation cost choices and sales profits of the extended models

		基准发电			双成本层次概率发电
		基准情形 I	基准情形 II	基准情形 III	
发电成本内生选择	高发电成本电量的需求规模/MW	200	200	200	180
	高发电成本电量成本水平/(元·kW ⁻¹)	0.733	0.733	0.6	0.684
	低发电成本电量成本水平/(元·kW ⁻¹)	—	0.516	0.6	0.537
	高成本发电概率	—	—	—	0.158
销售利润/千元		81.473	145.334	151.2	153.434

7 结 束 语

市场化电价机制是调控发电商低碳发电尤其高发电成本发电机会与供给效能不足的关键,基于此本文考虑独立发电商引入低碳技术后,普遍存在的发电成本垂直差异电力市场及其显著的大用户电量偏好差异,提出概率性电量供给以及与之对应的概率发电。先后考察了发电成本内、外生选择下的概率发电模型,求解发电商的电量供给均衡并分析概率发电策略的最优性。最后,将模型拓展到分解市场需求不确定性的概率发电模型。差异化定价是本文一个重要的研究新维度,因为在低碳环境下若干市场中发电成本垂直差异概念是合理且真实存在的。此外,在水平电力市场发电商通常可以借助概率性电量供给获得更高的售电电价。与此相反,在发电成本垂直差异电力市场中,发电商却要面临品牌替换带来的价格下降。这使得在后一种电力市场是否会出现概率发电存在疑问,然而,本文首先就给出概率发电在发电成本垂直差异电力市场中确实有必要存在的证明,且可以作为一种有利可图的发电容量过剩的解决方法。研究结果还表明,增加发电商的附加交易成本会导致产品线策略由双成本层次的概率发电变为三成本层次的概率发电。

其次,分析发电商的成本水平内生决策过程。一个有趣的结论是,即使在发电商有自由选择发电成本水平权力下概率发电也是可行的。原以为可以确切地推测出,合适的产品线设计可以消除对概率发电的需要。但是,事实并非如此:如果偏好低发电成本电量的大用户对单位发电成本有相当高的估价,概率发电也会出现,即使发电商拥有选择成本水平的自由。另外,当发电商采用“强”差异化发电策略时,引入概率发电对其成本选择的影响是促进成本水平相互更接近,尽管这时概率发电量是一种折中的、概率性电量供给。这也与直觉上期望在高、低发电成本的两种极端电量之间产生更大的成本分离不一致。在此

情形下,概率发电可以提高大用户的消费者剩余,即使偏好高发电成本电量的大用户转为购买低发电成本电量。与之相反,当发电商采用“弱”差异化发电策略时,引入概率发电会使得产品线上成本水平向外远离,以达到利用差异化获益的目的。同时,成本区分和利用概率性电量供给的能力为发电商提供多种工具,以掠取更大的大用户消费者剩余。因此,概率发电降低了这时的大用户消费者剩余。总的来说,关于大用户消费者剩余的结果仿效了 Jiang^[41] 的研究结论——水平市场上的福利不见得总是在改进。最后,讨论在面临不确定性市场需求情况下发电商是否会采用概率发电。其中,笔者论证当偏好低发电成本电量的大用户对发电成本的估价相对足够高时,概率发电可以继续增加发电商的销售利润。基于此,概率发电可以以一种管理不利需求状况工具的身份出现。

诚然,作为初步的研究工作,本文并非不存在研究局限与不足。比如,全篇明确集中在分析发电成本垂直差异背景下的概率发电策略并证明其可行性,以至于忽略了某些值得进一步关注的研究维度与细节。究其根本原因,主要在于受客观研究的水平与难度所限。第一,尽管本文暂时不考虑概率发电下低碳技术的减排效果,但这并不意味着该因素对发电商或大用户的决策不重要,而是由于这样做可能会卷入十分复杂的分析,很难找到双方互动的理性均衡策略;第二,即使在给定概率发电的可行性条件下,垄断发电商还是有可能实施不同成本层次的概率发电策略,这样大用户获得高发电成本电量的概率水平也会不同。然而,确定上述概率发电的不同成本层次和对应的概率并不是一个简单的工作,所以超出了当前的研究范围;第三,不同电量偏好大用户的支付意愿在时间上的变化(可参见相关文献,例如文献[42])以及检验发电成本垂直差异电力市场上纵、横向竞争对发电商概率发电及其最优策略选择的影响等,都同样是值得笔者连同其他学者今后进行更深入研究的问题。

参 考 文 献:

- [1] Yuan R, Behrens P, Tukker A, et al. Carbon overhead: The impact of the expansion in low-carbon electricity in China 2015

- 2040 [J]. *Energy Policy*, 2018, 119: 97 - 104.
- [2] Lazkano I, Nostbakken L, Pelli M. From fossil fuels to renewables: The role of electricity storage [J]. *European Economic Review*, 2017, 99: 113 - 129.
- [3] 许东灏, 穆延非, 陈新明, 等. 不同惰性组分稀释合成气对燃气-蒸汽联合循环的效益分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4138 - 4146.
Xu Donghao, Mu Yanfei, Chen Xinming, et al. Effect of syngas dilution using different inert species on gas turbine combined cycle [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 4138 - 4146. (in Chinese)
- [4] Shi B, Xu W, Wu E, et al. Novel design of integrated gasification combined cycle (IGCC) power plants with CO₂ capture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 176 - 186.
- [5] Safdarnejad S M, Hedengren J D, Baxter L L. Dynamic optimization of a hybrid system of energy-storing cryogenic carbon capture and a baseline power generation unit [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 66 - 79.
- [6] 娄素华, 张立静, 吴耀武, 等. 低碳经济下电动汽车集群与电力系统间的协调优化运行 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(5): 176 - 183.
Lou Suhua, Zhang Lijing, Wu Yaowu, et al. Coordination operation of electric vehicles and power system under low-carbon economy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(5): 176 - 183. (in Chinese)
- [7] Lin K-C, Purra M M. Transforming China's electricity sector: Politics of institutional change and regulation [J]. *Energy Policy*, 2019, 124: 401 - 410.
- [8] 黄守军, 杨俊. 异质发电商竞争下电力市场减排锦标博弈——结构与行为 [J]. *管理科学学报*, 2017, 20(12): 52 - 71.
Huang Shoujun, Yang Jun. Mitigation tournament game under heterogeneous generators competition in electricity market: Structure and behavior [J]. *Journal of Management Science in China*, 2017, 20(12): 52 - 71. (in Chinese)
- [9] 张新华, 甘冬梅, 黄守军, 等. 考虑收益下限的火力发电商碳减排投资策略 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(11): 69 - 81.
Zhang Xinhua, Gan Dongmei, Huang Shoujun, et al. Investment strategy of carbonemission reduction of coal-fired power firms considering revenue floors [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(11): 69 - 81. (in Chinese)
- [10] 鲁皓, 林荫华. 基于双曲型谱风险度量的大用户购电策略 [J]. *运筹与管理*, 2018, 27(4): 138 - 143.
Lu Hao, Lin Yinhua. Big users' electricity purchasing strategy based on hyperbolic spectrum risk measure [J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(4): 138 - 143. (in Chinese)
- [11] 李昂, 高瑞泽. 论电网公司市场势力的削弱——基于大用户直购电政策视角 [J]. *中国工业经济*, 2014, 6: 147 - 159.
Li Ang, Gao Ruize. Analyzing the impairment loss of market power of grid company: Based on the large customers direct purchase policy [J]. *China Industrial Economics*, 2014, 6: 147 - 159. (in Chinese)
- [12] 杜孟珂, 程浩忠, 柳璐. 考虑大用户直购电的发输电系统可靠性评估方法 [J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 570 - 575.
Du Mengke, Cheng Haozhong, Liu Lu. Reliability evaluation of generation and transmission system considering direct power purchase by large consumers [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 570 - 575. (in Chinese)
- [13] 尹龙, 刘继春, 高红均, 等. 考虑多种用户价格机制下的综合型能源售电公司购电竞价策略 [J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 88 - 95.
Yin Long, Liu Jichun, Gao Hongjun, et al. Study on bidding strategy of comprehensive power retailer under multiple user-price mechanisms [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 88 - 95. (in Chinese)
- [14] 冯涛, 卢志刚, 李学平, 等. 考虑大用户直购电的动态环境经济调度 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18): 151 - 159.
Feng Tao, Lu Zhigang, Li Xueping, et al. Dynamic emission economic dispatch considering large consumers direct purchasing [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(18): 151 - 159. (in Chinese)
- [15] 陈晓巍, 陈晓刚. 低碳电力营销管理的几点思考 [J]. *中国电力企业管理*, 2018, 526(13): 80 - 81.
Chen Xiaowei, Chen Xiaogang. Some thoughts on marketing management of low carbonelectricity [J]. *China Power Enterprise Management*, 2018, 526(13): 80 - 81. (in Chinese)
- [16] Fay S A, Xie J H. Probabilistic goods: A creative way of selling products and services [J]. *Marketing Science*, 2008, 27

- (4): 674 – 690.
- [17] Jerath K, Netessine S, Veeraraghavan S K. Revenue management with strategic customers: Last-minute selling and opaque selling [J]. *Management Science*, 2010, 56(3): 430 – 448.
- [18] Fay S A, Xie J H. The economics of buyer uncertainty: Advance selling vs. probabilistic selling [J]. *Marketing Science*, 2010, 29(6): 1040 – 1057.
- [19] Xiao Y B, Chen J. Evaluating the potential effects from probabilistic selling of similar products [J]. *Naval Research Logistics*, 2014, 61: 604 – 620.
- [20] Fay S A, Xie J H. Timing of product allocation: Using probabilistic selling to enhance inventory management [J]. *Management Science*, 2015, 61(2): 474 – 484.
- [21] Xu X Y, Lian Z T, Li X, et al. A hotelling queue model with probabilistic service [J]. *Operations Research Letters*, 2016, 44(5): 592 – 597.
- [22] Zhang Y, Hua G W, Wang S Y, et al. Managing demand uncertainty: Probabilistic selling versus inventory substitution [J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 196: 56 – 67.
- [23] Chen R R, Esther G-O, Paolo R. Opaque distribution channels for competing service providers: Posted price vs name-your-own-price mechanisms [J]. *Operations Research*, 2014, 62(4): 733 – 750.
- [24] Fay S A, Xie J H, Feng C. The effect of probabilistic selling on the optimal product Mix [J]. *Journal of Retailing*, 2015, 91(3): 451 – 467.
- [25] Huang X, Sošić G, Kersten G. Selling through priceline? On the impact of nameyour-own-price in competitive market [J]. *IIE Transactions*, 2017, 49(3), 304 – 319.
- [26] Zheng Q, Pan X J A, Carrillo J E. Probabilistic selling for vertically differentiated products with salient thinkers [J]. *Marketing Science*, 2019, 38(3): 442 – 460.
- [27] Zhang Y, Huang A Q, Cheng T C E, et al. Simulating the demand reshaping and substitution effects of probabilistic selling [J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2016, 15(4): 699 – 710.
- [28] Liu Q, Xiao Y B. Choice-based revenue management with probabilistic goods [R]. Working Paper, Hong Kong: Hong Kong Univeresity of Science and Technology, 2017.
- [29] 杨 光, 刘新旺, 秦晋栋. 关于概率销售的动态演化博弈研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(9): 2231 – 2243.
Yang Guang, Liu Xinwang, Qin Jindong. Probabilistic selling strategy study based on dynamic evolution game theory [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(9): 2231 – 2243. (in Chinese)
- [30] 杨 光, 刘新旺, 秦晋栋, 等. 双渠道异质产品市场背景下的概率销售策略研究 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 1049 – 1059.
Yang Guang, Liu Xinwang, Qin Jindong, et al. Probabilistic selling policy in dual-channel and heterogeneous products market [J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1049 – 1059. (in Chinese)
- [31] Huang T L, Yu Y M. Sell probabilistic good? A behavioral explanation for opaque selling [J]. *Marketing Science*, 2014, 33(5): 743 – 759.
- [32] Zhang Z L, Joseph K, Subramaniam R. Probabilistic selling in quality-differentiated markets [J]. *Management Science*, 2015, 61(8): 1959 – 1977.
- [33] Chao Y, Liu L, Zhan D Y. Vertical probabilistic selling under competition: The role of consumer anticipated regret [R]. Working Paper, Louisville: University of Louisville, 2016.
- [34] 毛 可, 傅 科, 徐佳焱. 无理由退货政策下的概率销售策略 [J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(4): 964 – 977.
Mao Ke, Fu Ke, Xu Jiayan. Probabilistic selling with money back guarantees [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2020, 40(4): 964 – 977. (in Chinese)
- [35] Moorthy K. S. Product and price competition in a duopoly [J]. *Marketing Science*, 1988, 7(2): 141 – 168.
- [36] Tirole J. *The Theory of Industrial Organization* (7th printing) [M]. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [37] Moorthy K S. Market segmentation, self-selection, and product line design [J]. *Marketing Science*, 1984, 3(4): 288 – 307.
- [38] Moorthy K S, Png I P L. Market segmentation, cannibalization, and the timing of product introductions [J]. *Management*

Science, 1992, 38(3): 345–359.

- [39] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究 [J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 31–41.
- Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties [J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 31–41. (in Chinese)
- [40] 张新华, 卢灿华, 陈志伟. 碳调度模式下火力发电商的碳减排投资策略分析 [J]. 中国管理科学, 2017, 25(11): 179–188.
- Zang Xinhua, Lu Canhua, Chen Zhiwei. Analysis on carbon abatement investment strategy for thermal power generation-companies in carbon dispatching mode [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(11): 179–188. (in Chinese)
- [41] Jiang Y B. Price discrimination with opaque products [J]. Journal of Revenue and Pricing Management, 2007, 6(2): 118–134.
- [42] Desiraju R, Shugan S M. Strategic service pricing and yield management [J]. Journal of Marketing, 1999, 63(1): 44–56.

Probabilistic generating in the vertical generation cost-differentiated electricity market: A perspective from the large user's generation capacity preference

HUANG Shou-jun¹, YANG Jun²

1. Lingnan (University) College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: For the vertical differentiated-generation-cost electricity market prevailing after carbon emission reduction and the significant differences in large user's generation capacity preference, the paper proposes a probabilistic supply of electric quantity and its corresponding probabilistic generating. Further, price leverage is utilized to regulate insufficient generation opportunity and insufficient supply efficiency of low-carbon generation, especially high generation cost generation. The probabilistic generating models under endogenous and exogenous choices of generation cost are constructed successively, the generator's electric supply quantity equilibria are solved, and the optimality of probabilistic generating strategies is analyzed. Finally, the model under endogenous generation cost choice is extended to the probabilistic generating model which decomposes the market demand uncertainty. The research finds that probabilistic generating can be regarded as a way to profitably dispose excess capacity compared to three generating benchmarks, and remains viable even when the generation cost choice is endogenous. When the generator employs a generation strategy of "strong" cost differentiation, the introduction of a compromised probabilistic generating causes closer cost levels in a product line, and enhances the large user's consumer surplus. In contrast, in a market where the generator implements generating of "weak" cost differentiation, the use of probabilistic generating enlarges the cost separation and degrades the large user's consumer surplus. Under an uncertain market demand, when the large user preferring lower cost generation capacity has a sufficiently high valuation for the unit generation cost relative to the large user preferring higher cost generation capacity, probabilistic generating may be used as a tool to manage adverse demand conditions.

Key words: generation cost; vertical differentiation; large user; generation capacity preference; probabilistic generating