

进化博弈论在发电报价策略研究中的应用

曾次玲¹, 张步涵¹, 谢培元²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖南省电力调度通信中心, 湖南 长沙 410007)

摘要: 进化博弈论是把博弈论分析和动态进化过程结合起来的一种理论。介绍了进化博弈理论的发展历程与基本思想, 并采用进化博弈论的思想对电力市场发电报价过程进行了建模和求解。最后, 通过算例对模型进行了论证, 结果表明本文提出的模型能充分反映出市场响应及发电商报价的动态过程。

关键词: 电力市场; 进化博弈; 报价

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0013-04

0 引言

随着电力市场化改革的进行, 电能也相应的变成了可交易的商品, 在新的市场环境下, 许多新的名词、概念也应运而生。传统的经济学理论^[1] (投资组合理论、博弈论^[2,3]等) 在电力市场中的应用给电力市场的发展带来了勃勃生机, 但同时也存在不少问题: 大多数经济学模型都是基于成熟市场而建立的, 而且一般存在着两个很强的假设: 市场是竞争性的, 即市场参与人很多, 以至于谁也无法操纵价格; 市场内参与人之间的信息是对称的。对于电力市场来说这显然是不现实的。目前大部分国家和地区的电市场都还处在起步发展阶段, 电力市场相应的法律法规还不完善 (也就是说“游戏规则”还没有完全制定好), 电力市场仍然处于动态的进化发展状态。

许多学者都意识到了传统经济学理论在电力市场应用中存在的问题和不足, 一些学者指出采用传统的均衡理论对能量市场建模可能会导致错误的结论。因为大部分经典经济学理论模型不能反映出人类行为的特性, 如人的情绪的影响、不同个体的目标以及对不确定信息的处理能力等。

进化博弈理论是把博弈论分析和动态进化过程结合起来的一种理论^[4]。它源于生物进化论, 成功地解释了生物进化过程中的某些现象, 并在分析社会习惯、规范或制度的自发形成及其影响因素等方面取得了令人瞩目的成绩。因此, 用进化博弈论来分析发展初期的电力市场的动态特征更为合适。本文将对进化博弈论的基本思想进行论述, 并结合电力市场的情况采用进化博弈论的思想和遗传算法对电力市场中发电商报价的动态特征进行建模和求解。

1 进化博弈论简介

1.1 进化博弈论的发展历程

最早出现的系统地研究人类策略行为的理论应归属于冯·诺依曼 (Von Neumann) 和摩根斯坦 (Morgen - stem) 1944年的著作《博弈理论与经济行为》(Theory of Game and Economic Behavior), 经济学界一般也认为, 冯·诺依曼和摩根斯坦的工作给出了博弈理论发展的一个开端。

1994年诺贝尔经济学奖授给了纳什、豪尔绍尼和泽尔腾 (John Nash, John Harsanyi and Reinhard Selten) 3位博弈论专家。纳什给出的均衡概念为现代非合作博弈理论奠定了基础。纳什关于非合作博弈理论的发展带来了博弈理论在各个领域内应用的复兴。尽管以理性假设为基础发展起来的非合作博弈论有着优美严密的数学推理与数学模型, 而且, 它在政治学、社会学、历史学、哲学、伦理学等其它社会科学诸多学科中得以广泛地成功应用而为人们所推崇。然而美中不足的是一个博弈往往有许多个纳什均衡。正是由于这种多重纳什均衡的存在, 用非合作博弈论分析研究现实问题时, 均衡并不比非均衡占有优势。这使得博弈论的广泛应用受到了一定的限制。而且博弈论认为行为主体的行为是符合理性原则 (即每个个体都是以最大化自身的利润为目的) 的。随着主流经济学的理性主义假设日益受到责难与批评, 也必然波及到以此为基础而构建起来的博弈理论。博弈论中的一个最重要的假设就是博弈双方行为人的共同知识假设, 即所有参与人都是理性的, 所有参与人知道所有参与人都是理性的, 就行为人对现实世界的认识能力而言, 这是一条非常严格的假设, 很显然现实世界这种假设通常是得不到保证的, 这正是博弈论所遇到的一个最大的困惑。

幸运的是在 20 世纪 80 年代,人们看到了博弈理论的一个新发展,那就是梅纳德·史密斯(Maynard Smith)的著作《进化与博弈理论》(Evolution and the Theory Game),在早些时候史密斯及史密斯与普瑞斯(Price)合作写就的两篇文章发表在两家权威的刊物上,给出了进化稳定性策略(Evolutionary Stable Strategy,简记为 ESS)概念,并宣称观察到的动物和植物的演进过程可以通过适当定义的博弈纳什均衡来解释。梅纳德·史密斯(Maynard Smith)的工作把人们的注意力从企图构造日益精细但仍未能完全解决理性基础缺陷的理性定义中解脱出来,他们独辟蹊径,从另外一个角度着手为博弈理论的研究寻找到可能的突破口。应该说梅纳德·史密斯和普瑞斯是演进博弈论领域内的理论先驱。进入上世纪 80 年代演进博弈论取得了长足的进步与发展。一些经济学家也开始把进化博弈论应用到经济学领域,目前这种应用趋势仍在进一步发展。

1.2 进化博弈论的基本思想

按照达尔文的生物进化理论,在生物进化过程中,处于相同环境的不同种群为同一种资源而相互竞争,适者生存的自然法则只是只有那些具有更高适应度的种群能够延续下来,竞争的失败者(较低的后代成活率)则逐渐被淘汰。经过长时期的演化后,这种优胜劣汰的自然法则导致的结果是现有种群是经过生存检验的,并且仍将接受检验。生物进化理论通常认为种群个体的后代会继承其前辈的策略(遗传);另一方面,由于自然环境的剧烈变化将对生物的生存竞争产生影响,在进化过程中个体也可能产生突变(变异)。综合到以上因素,因此一般的进化博弈模型主要是基于选择(Selection)和突变(Mutation)这两个因素建立起来的。选择是指本期中的赢者策略(获得较高的支付)在下一时期将更为流行(由于有更多的后代、被竞争对手模仿与学习等方式而被更多的参与者采用);突变一般很少发生,它指种群中的某些个体以随机的方式选择策略,那些获得更高支付的变异策略经过选择后将变得更加流行,那些获得更低支付的变异策略则自然消亡。进化博弈模型的选择形成机制通常有 3 种情形:生态学意义上的适应度(即后代数量)、个体意义上的反应变更(试验、刺激反应等)和社会意义上的策略变更(学习与模仿等)。不管从哪种意义上看,进化博弈的基本思想是在时间的作用下,策略的适应性是不断改进的,即较好的策略将变得更为流行。

进化稳定策略是由梅纳德·史密斯(Maynard Smith)和普莱斯在考察种群中个体的适应度由各个个体行为共同决定的环境下,个体对成功策略的选择时提出来的。进化稳定策略的基本思想是:假设在一个全部选择某一特定策略的大群体中,闯入一个选择不同策略的小群体(变异或外来入侵等),如果该突变小群体在混合群体的博弈中所得到的支付(适应度)大于原群体中个体得到的支付,则该小群体能够侵入大群体,在演化过程中该小群体将逐步壮大并可能取而代之成为大群体;反之,该小群体在演化过程中将自然消亡。如果一个群体能够消除任何小群体的入侵,那么就称该群体达到了一种进化稳定状态,此时该群体选择的策略就是进化稳定策略 ESS。

2 基于进化博弈论的发电报价模拟

2.1 基本规则

各国电力市场的模式和规则各不相同,但总有一些规则是普遍采用的。

- 1) 市场一般分为两部分,一部分是受管制的,另一部分是开放竞争的。
- 2) 在市场出现重大问题时,都会有政府干预。
- 3) 交易一般采用“暗标拍卖”的形式,发电商的报价信息在市场出清前是保密信息。

可见,竞价过程是在一个具有不确定性和有限理性的空间内进行的,且不同发电商之间的竞价策略又是相互影响的。因此,用进化博弈论来分析发电商在竞价过程中的竞价策略的形成过程是合适的。

2.2 进化模型

在竞争市场中,完全可能存在这样的情况:因为目的不同,面对同样的策略,这个竞争者会选择,而另一个竞争者则不会选择。电力市场中也是这样,不同成本的水电和火电的策略不同,水电可能会选择低电价策略,而火电则因生产成本略高而不会采取低电价策略;相同生产成本的火电中,国有的会采取低电价,而合资的或私营的竞争者往往希望成本尽快回收,而不会接受低电价策略。

另外不同竞争者对短期和长期利益也会有不同的看法,有的竞争者更看重短期的利益,而有的则更加重视长期的整体利益。

因此,设计一个面面俱到的适应度函数是很难的。唯一的方法是通过在实际市场特征的研究,量体裁衣。市场中策略的总个数为:

$$NC = \sum_{NA} NS_a \quad (1)$$

其中: NA 是竞争者的个数; NS_a 是竞争者 a 采取的策略个数。

考虑不同竞争者追求的目标会有所不同,对每个策略给出以下适应度函数:

$$f(C_{s,a}) = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} r_t(C_{s,a}) \quad (2)$$

其中: $C_{s,a}$ 对应于竞争者 a 采取行为 s 时的策略; $r_t(C_{s,a})$ 是竞争者 a 的策略在时间 t 时的结果(利润); T_a 是竞争者 a 报价时综合考虑的时段数, $T_a = 1$ 表示只考虑当前时段, $T_a = m$ 表示考虑包括当前时段以后的 m 个时段的整体效益; μ_a 是基准因子 ($0 < \mu_a < 1$), 表示竞争者对这个结果的重视程度, T_a 、 μ_a 是描述竞争者特征的参数, 必须事先设定好。

2.3 进化操作

在每一个竞价阶段, 竞争者(发电商)通过仔细分析自己所采取的决策以及取得的相应的成果, 从实践中吸取经验教训。根据自身的喜好和认识, 发电商可能采取的报价方式主要为以下两个方面:

1) 选择。也就是选择成功的策略舍弃失败的策略。报价时可以直接重复以往成功的策略, 也可以组合不同的优秀策略产生新的报价策略。

2) 变异。不管是为了创新也好, 还是因为当前的策略不尽人意也好, 发电商选择与以往策略不同的策略, 就可以认为是变异行为。

对于每个竞争者来说, 允许选择和变异的细胞数目是事先规定好的。参与者的行为特征用参数 μ_a 和 μ_a 表示, 且

$$\mu_a + \mu_a = 1 \quad (3)$$

μ_a 表征竞争者 a 在市场中的保守程度(选择因子), 对于国有性质的发电商而言, 一般会选择相对保险、稳定的策略, 报价时往往趋向于重复以往成功的策略, μ_a 所占比例大, μ_a 的比例小。表征竞争者 a 在市场中的活跃程度(变异因子), 对于非常具有竞争力且就有一定冒险精神的私营竞争者来说 μ_a 比例一般要较大。而对于具有不同的运行成本和特殊功能的竞争者(如燃气轮机组等)来说, 采取有创意一点的、冒险行为的可能性也比较大, μ_a 所占比例也比较大。

以上模型与遗传算法的机理是相似的, 可以采用遗传算法的基本方法来求解^[5]。由于遗传算法的基本求解过程比较简单, 且限于篇幅, 这里将不再论述。

3 算例

将进化博弈模型应用到某处于发展初期的电力市场, 研究时间为 12 个月。假设市场中有 3 个发电商参与长期合约市场和日前市场, 这里所说的一个时段指 1 天, 每个发电商都有两个策略: 报高价(H)、报基价(B)。接近发电商的生产成本单价为基价, 高于单价的为高价。市场采取“暗标拍卖”, 按统一出清电价结算。在这个例子中, 所有的竞争者都只考虑当前时段的情况。各发电商的参数如表 1 所示。

表 1 各发电商的参数

Tab 1 Parameters of each power supplier					
	T_a	μ_a	μ_a	μ_a	$Cost(\text{元}/\text{MWh})$
发电商 1	1	0.8	1.0	0.0	150
发电商 2	1	0.9	0.95	0.05	250
发电商 3	1	0.5	0.8	0.2	350

3 个发电商中, 发电商 1 所占的市场份额最大, 生产成本最低, 发电商 3 所占的市场份额最小, 生产成本最高。当发电商采取不同策略时, 根据各发电商发电成本 $Cost$ 可以得到各个发电商的支付矩阵如表 2 所示^[6]。

表 2 各发电商的支付矩阵

Tab 2 Payments of each power supplier					
发电商 1	发电商 2	发电商 3			
		报高价(元/MWh)	报基价(元/MWh)		
H	H	(925, 1 276, 737)	(612, 639, 1 452)		
H	B	(251, 1 904, 248)	(140, 1 037, 567)		
B	H	(1 891, 249, 242)	(1 006, 133, 542)		
B	B	(238, 244, 32)	(68, 79, 37)		

表 2 中 (925, 1276, 737) 表示发电商 1、2、3 都采取高价策略时 3 个发电商依次对应的收益为 925、1 276、737 (元/MWh)。

根据以上数据, 得到各发电商竞价仿真结果如图 1~图 3 所示。

从图 1~3 可以看出, 各发电商所采取的报价策略各不相同。从表 1 可知发电商 1 属于保守类型, 所以在竞价初期发电商 1 采用的报价策略中报高价与报基价的比例基本上相等, 随着时间的推移, 发电商尝试新的报价策略, 发现还是报基价比较保险, 因此逐渐加大了报基价的比例, 直到最后市场比较稳定, 发电商 1 只要围绕生产成本报价就可以盈利。发电商 2 在市场中的地位比较特殊, 它不同于发电商 1 在市场占有绝对优势, 但相对发电商 3 它又存在一定优势。因此, 报价过程中一直处于一种试

探的状态,两种报价策略所占的比例相差不大,但最终还是采取主要报基价的策略。而发电商 3 的成本最高,竞争中更具有冒险精神,趋向于险中求胜,因此,报价过程中两种策略所占的比例相差不多,但报高价的趋势很明显,这说明在统一出清电价机制下,发电商有滥用市场势力的倾向,对成本高的发电商来说,报高价才能获得更多的利润。

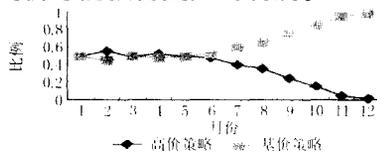


图 1 发电商 1 一年内的报价策略

Fig 1 Bidding strategies of power supplier 1 in one year

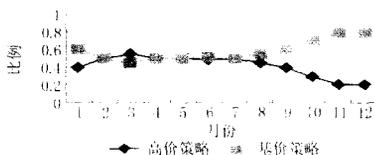


图 2 发电商 2 一年内的报价策略

Fig 2 Bidding strategies of power supplier 2 in one year

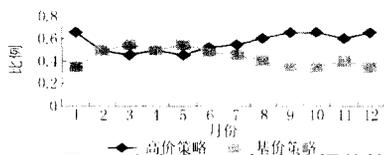


图 3 发电商 3 一年内的报价策略

Fig 3 Bidding strategies of power supplier 3 in one year

根据本文给出的进化博弈模型所得的仿真结果与实际电力市场中的情况是基本吻合的。这说明进化博弈模型能反映出发电商在发展初期的电力市场中报价的动态进化过程。

可见,在市场设计初期,市场运行模式和规则的制定非常重要,政府监管部门在促进发电商提高生产效率的同时,还必须对电力市场进行调控、制定合理的竞价规则,使发电商的报价和盈利都在合理的范围内。

4 结语

本文介绍了进化博弈论的基本思想,并为电力市场发电报价动态过程构建了模型。通过仿真结果可以看出模型充分反映了电力市场不同发电商的行为特征:包括信息不足情况下的报价,市场应变能力等。这将有助于分析电力市场模式设计中可能存在的问题,从而规范电力市场运行。

在电力市场发展初期,市场处于动态的发展过程,发电商的报价策略也在不断调整之中,市场不可能在短时间内达到纳什均衡点,只有当市场相对成熟、稳定后才能达到纳什均衡。可见,传统的博弈模型只能用于市场发展成熟的阶段,而基于生物进化理论的进化博弈论则对市场成熟阶段和市场发展初期都适用,是一个值得更进一步深入研究的问题。

参考文献:

- [1] Pindyck R S, Rubinfeld D L. 微观经济学 (第五版) [M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
Pindyck R S, Rubinfeld D L. Microeconomics, Fifth Edition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [2] 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (1): 19-23; 25 (2): 13-18.
DIAO Qin-hua, LIN Ji-keng, NI Yi-xin, et al Game Theory and Its Applications in Power Markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (1): 19-23; 25 (2): 13-18.
- [3] 甘德强, 王建全, 胡朝阳. 联营电力市场的博弈分析: 单时段情形 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 71-76.
GAN De-qiang, WANG Jian-quan, HU Zhao-yang Auction Games in Pool-based Electricity Markets: Single-period Case [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 71-76.
- [4] 高洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (18): 18-21.
GAO Jie, SHENG Zhao-han Elementary Grouping for Evolutionary Game Theory and Its Application in Electricity Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (18): 18-21.
- [5] Riechmann T. Genetic Algorithm Learning and Evolutionary Games [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2001, 25 (6): 1019-1037.
- [6] Brennan D, Melanie J. Market Power in Australian Power Market [J]. Energy Economics, 1998, 20 (2): 121-133.

收稿日期: 2004-05-14; 修回日期: 2004-07-28

作者简介:

曾次玲 (1976 -), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统分析和电力市场方面的研究;

张步涵 (1950 -), 男, 教授, 主要从事电力系统分析和电力市场方面的研究; E-mail: ling-yuan@263.net

谢培元 (1975 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护和电力市场方面的研究。

基于小波变换的 EHV 输电线路单端暂态电压保护算法的探讨

陈茂英, 杨明玉, 张新国, 胡巨

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 讨论了信号李氏指数的小波变换特性, 提出了一种基于暂态电压信号小波变换的超高压输电线路单端量保护算法。利用单端暂态电压信号的小波变换模极大值, 对电压信号的李氏指数进行最小二乘法估计, 以便判断故障线路。仿真表明, 在各种故障情况下该保护算法都足以提取和放大故障线路和非故障线路的差异, 可靠、准确地动作。

关键词: 单端暂态量保护; 小波变换; 最小二乘法; 李氏指数

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0017-04

0 引言

传统保护基于提取故障引起的工频信号, 这给超高压 (EHV) 输电线路实现速动造成困难。故障产生的高频信号富含多于工频信号的信息, 贯穿于信号的整个频域。所以, 利用高频分量来实现线路保护的技术, 能很好地解决 EHV 线路保护速动性和可靠性之间的矛盾。近年来, 基于故障后产生的高频暂态分量的继电保护—暂态保护得到广泛的研究^[1]。目前, 研究最多的是暂态电流保护^[2~5]。这是因为普通电流互感器传变高频分量的特性优于普通电压互感器。随着光电互感器的发展, 光电电压互感器的高频传变能力的提高, 构造简单的单端暂态电压保护是可以实现的, 和暂态电流保护相配合, 能很好地提高暂态保护的可靠性。

实施暂态保护的关键是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立。本文在分析故障线路和非故障线路的暂态电压信号特征的基础上, 利用小波变换提取其特征, 并运用最小二乘法对暂态电压波形的李氏指数进行估计, 从而可以实现单端暂态电压保护。

仿真表明, 该保护算法是可靠、准确的。

1 信号李氏指数的小波变换特性^[6,7]

1.1 李氏指数

这是数学上表征信号局部特征的一种度量, 其定义是, 设信号 $x(t)$ 在 t_0 附近具有下述特征:

$$|x(t_0+h) - p_n(t_0+h)| \leq A|h|^n, \quad n < n+1 \quad (1)$$

则称 $x(t)$ 在 t_0 处的李氏指数 (Lip schitz 指数) 为 n , 式中 h 是一个充分小量, $p_n(t)$ 是过 $x(t_0)$ 点的 n 次多项式 ($n \in \mathbf{Z}$)。

如果 $x(t)$ 为 n 次可微, 但 n 阶倒数不连续, 因此 $n+1$ 次不可微, 则 $n < n+1$; 如果 $x(t)$ 的 Lip schitz 指数为 n , 则 $x(t) dt$ 的 Lip schitz 指数必为 $n+1$, 即每积分一次, Lip schitz 指数增 1。

李氏指数定义是对 $x(t)$ 上的一点 t_0 而言的, 若扩展到一段区间 $[a, b]$, 则要求当区间 $[a, b]$ 内的任意两点 t_0 和 t_0+h 都满足条件 (1) 时, 称 $x(t)$ 在此区间为均匀 Lip schitz。

Application of evolutionary game theory in power supply bidding strategies

ZENG Ci-ling¹, ZHANG Bu-han¹, XIE Pei-yuan²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hunan Electric Power Control & Communication Centre, Changsha 410007, China)

Abstract: Evolutionary game theory is a theory of combining the game theory analysis with the dynamic analysis of the evolutionary process. Evolutionary game theory and its developing process are introduced, and the model about the bidding process in power market is established and solved by using evolutionary game theory. The proposed model is illustrated by a case study, and the results show that the proposed model can perfectly describe market response and the dynamic process of power suppliers' bidding.

Key words: power market; evolutionary game theory; bidding