

# 考虑系统稳定性的供用电交易模型

乞建勋, 方军, 牛东晓, 孔峰

(华北电力大学工商管理学院, 河北省保定市 071000)

## A BILATERAL DEALING MODEL CONSIDERING THE SYSTEM STABILITY

QI Jian-xun, FANG Jun, NIU Dong-xiao, KONG Feng

(Norch China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** The special character of electric power as a kind of commodity leads to the difficulty and complexity in its trade in the electric market. The planning for its bargaining system must consider the risk of price fluctuation together with the technological and physical restriction of the power system. Based on in-depth analyses on the option-forward bargaining theories we draw an operable bargaining model, which considers the stability of the electric power system. Participants under this model are inspired to adjust the quantity of power consumption as well as a 'settlement price', and this trading strategy is helpful to the stability of the system.

**KEY WORDS:** Electricity markets; Bilateral contracts; Settlement price; System stability

**摘要:** 电力商品的特殊性决定了其交易的特殊性, 这突出表现在相关交易制度和交易行为不仅应考虑价格波动的风险, 更应适应电力系统物理技术条件的约束, 从而有利于系统稳定。基于对电力市场交易制度与电力系统运行稳定性相互之间这种强相互作用特征的理解, 在深入分析期权—远期双边合约交易模型的基础上形成了更具操作性的交易模型。论述了基于此模型的市场参与者在价格激励机制的作用下将采取既有利于控制交易风险同时也有利于系统稳定运行的交易策略, 并提供了算例和说明。

**关键词:** 电力市场; 双边合约; 结算电价; 系统稳定性

## 1 引言

价格是在市场中进行资源配置的最重要的信号, 也是交易制度设计的核心。这在电力市场中也不例外。

电力市场的参与者的竞价和交易行为同在其他市场中的参与者一样, 也希望实现在控制风险的前提下追求最大利益的目标; 但同时, 电力商品具有与一般商品显著不同的特性。这突出表现在电力商品的在规模意义上的不可储藏特性, 在生产、流

通环节上的强技术约束性, 以及作为一种不易替代的基础能源所具有的很低的需求的价格弹性。以上种种, 就使得电力市场的运行规律和动态行为与一般商品市场的情况迥异。这突出表现在电力市场的经济因素与电力系统的物理因素之间具有很强的相互制约和影响。比如当实际耗电量由于市场需求变化而剧增时, 如果发输电总功率不能及时跟随到位, 那么轻则会影响电能质量, 重则将破坏电力系统稳定性, 这一点在系统接近满负荷或热极限的工况下尤甚。而发输电功率适应市场需求的过程又不可避免地伴随着价格信号的变化, 从而在一定程度上改变市场需求。同时, 注意到电力投资相当于是用大时间滞后的经济手段去控制一个快速响应的物理系统<sup>[1]</sup>, 故现时投资的快速膨胀很可能引起未来出现电力过剩。凡此种种, 都应该是在进行电力市场交易制度设计时清醒认识到的, 交易制度的设计就不应仅仅局限于被动地应对价格波动风险, 而应该把有利于系统稳定性的考虑加入进去, 这正是本文研究的出发点和归宿。

研究的前提是在发电侧实行竞价上网形成边际电价, 基于当量电价的竞价上网的模式和实行电力库是理想的前提条件, 主要因为当量电价法是在缺电情况下也具备优良市场特性的、能够给出市场化的电力供应商的真实成本的交易模式, 它有效地控制了市场力<sup>[2-3]</sup>。而发电侧市场和供用电市场又是密切衔接的。另外要求市场具备一定信息化水平。

## 2 电力远期—期权合约的设计思路

复杂和庞大的电力系统从来就是运行在严格的计划之下。只是电力市场条件下的计划更具科学性, 因它克服了电力垄断体制下的盲目性和不经济性。科学的计划源于市场参与各方在交易中规避价

格风险和追逐利润的天然动机,这主要以事先签订的远期、期货<sup>[4]</sup>、或是期权合约的形式加以实现。期货合约实际上就是标准化的远期合约;期权合约则是对选择权的交易,因它提供了对风险和收益的不对称配置而具有高度的灵活性和嫁接性。在初级电力市场中,尽管它们可能缺少规范的交易平台和严格标准的合约设计,并不见得是那种真正意义上的避险衍生产品,但这也只是限制了其流动性而不影响其实质<sup>[5]</sup>,因而有很高的应用价值:在电力市场环境下,随着按细分时段运行的电力现货市场的出现,传统负荷中断控制的非市场化手段如切断负荷终结于现货市场给出的价格信号,但同时也带来了价格风险。而以此价格信号为基础的期权合约合并远期合约,被认为具备既可使供电方和用户通过计划性来锁定成本,又通过供用电灵活性来获利的优越性。近几年来,对电力远期、期货、期权交易模型的研究不断深入,相关主要论著可见于文献[6-9]。

作为迄今为止在这方面较为深入的研究,文献[9]提出了双边可选的内含期权合约的交易模型,交易双方在时刻  $t$  就未来时段  $T$  的合约电价的确定遵循风险中性的期望值定价

$$f = E(p | H_t) - E(\max(0, p - k_1) | H_t) + E(\max(0, k_2 - p) | H_t) = k_1 - \int_{k_2}^{k_1} Q_p(x) dx$$

式中  $f$  为远期合约电价;  $E$  为数学期望符号;  $H_t$  为签约的  $t$  时点时的信息条件;  $Q_p(x)$  为未来某时段  $T$  的电价  $p$  这个随机变量的概率累积函数;  $k_1, k_2$  分别被解释为卖方的中断供电价格和买方的中断用电价格。

由于未来电价  $p$  的随机性带来的可能套利机会提供了把期权合约捆绑在远期合同上的可能性,这样,  $k_1, k_2$  就分别被设计成买电方卖给卖电方和卖电方卖给买电方的期权合约的协定价格。并有

$$B_b = (k_1 - f)(1 - Q_p(k_1)) + (V - f)(Q_p(k_1) - Q_p(k_2)) + \int_0^{k_2} (V + k_2 - f - x) q_p(x) dx = (V - k_1) Q_p(k_1) + \int_0^{k_1} Q_p(x) dx$$

$$B_s = (f - k_2) Q_p(k_2) + (f - W)(Q_p(k_1) - Q_p(k_2)) + \int_{k_1}^{\infty} (f - k_1 - W + x) q_p(x) dx =$$

$$E(p | H_t) - W + (W - k_2) Q_p(k_1) + \int_0^{k_2} Q_p(x) dx$$

式中  $B_b$  和  $B_s$  分别为买方和卖方在此合同关系下

的期望报酬(收益)函数;  $V$  和  $W$  分别为买方的单位电量价值和卖方的单位电量成本;  $q_p(x)$  是  $Q_p(x)$  的导函数,即随机变量  $p$  的概率密度函数。

对合约电价和期望报酬函数的求导分析表明  $f$  分别是  $k_1, k_2$  的增函数,若追求期望报酬最大化则必有  $k_1=V$  以及  $k_2=W$ 。这被解释为当  $p$  大于买方单位电量价值  $V$  时卖方将以此为协议价向买方执行看涨期权并中断供电,而当  $p$  小于卖方的供电成本  $W$  时卖方就将被买方以此为协议价履行其买入的看跌期权,并被买方中止用电。并且,任何一方执行期权都意味着其同时可以通过  $T$  时段现货市场的交易实现无风险套利,即卖方可高价卖电给现货市场和买方可低价从现货市场买电,与执行合约电价相比,该套利行为能获得额外受益。

### 3 考虑系统稳定性的供用电交易模型

#### 3.1 对上述远期—期权交易模型的深入分析

上述双边合约交易模型实际上是设计了均衡的中断电价并将其嵌入到了远期合同的定价中,同时给予买卖双方根据  $T$  时的实时价格进行套利的灵活性:以此获得与以合约电价  $f$  供用电相比更大的收益,但存在若干问题限制了其可应用性。

首先,存在对  $p>V$  及对  $p<W$  的存在可能性的怀疑。

对卖电方,在发电侧竞价上网形成实时电价和 POOL 体系下,电价虽然可能受初级能源如煤、油价格变动的影 响,但通常认为这些因素是外生的,真正值得注意的是电力市场内部的供求关系。上网电价尚未计入各种输配电损耗和服务成本,包括管理服务费、输送服务费和辅助服务费,这样,供电者的单位电量成本实际上是依赖于上网电价和市场供求的变量,且须借助复杂的潮流模型计算来量化<sup>[10]</sup>,在电力市场初级阶段也可以把这一部分边际成本长期化和平均化,不管怎样,如果是发电企业对(终端)用户,则  $p<W$  和  $p>W$  均为可能,但如果是供电网络公司对终端用户,则除非在相当成熟和开放的市场,  $p<W$  一般是不会出现的。而这意味着针对看跌期权的买卖无效。

针对买方的  $p>V$  更是如此,如引言中所述,电力商品是社会基础能源,基本上不存在可替代性,故存在很高的缺电成本:假设  $V_1$  是消费电量为  $X$  时单位用电量给买方带来的直接价值,  $V_2$  是缺电量为  $X_0$  时单位缺电量的损失。以生产领域为例,考虑

到  $V_2$  主要应来自于合同违约的成本, 并可用负荷中断量  $X_0$  的二次函数来近似, 可有  $V=V(X, X^0)=V_1(X)+V_2(X_0^2)$  且有  $V_2 \gg V_1; V > W$  (但  $V_2$  一般只可估计), 故大多情况下  $p > V$  是不会出现的。这意味着针对看涨期权的买卖无效。

其二, 套利难以实行。

套利交易存在交易成本。在电力系统中, 技术约束所致的复杂性更可能增大这种套利成本使之达到无利可图的程度, 至少在初级电力市场阶段, 难以想象买方将如何在接受一个大于  $f$  的  $k_2$  后在现货市场以  $p$  购电, 或卖方付出小于  $f$  的  $k_1$  并中断给买方的供电后如何在现货市场实时供电给新的买家。由此, 远期合约应该被从结算意义上而非物理意义上实行。

其三, 交易参数选择的灵活性。

首先  $t$  时对  $q_p(x)$  的估计是很难精确的<sup>[11-12]</sup>, 而且高报  $k_1$  直至  $V$  即提高  $f$  的策略或低报  $k_2$  直至  $W$  即降低  $f$  对于买方和卖方分别意味着风险, 该风险来自于电价的窄幅波动。有鉴于此, 面临极大不确定性的买卖双方分别适当 (后面的算例中将说明这种策略性的估报是有约束的) 低估 (报)  $V$  和高估 (报)  $W$ , 以使得  $f$  对自己有利是满足激励原理的<sup>[13]</sup>。这时合约交易的风险来自于电价的宽幅波动。此间原理如下式所示:

$$\max U = E(\pi) - A \times \text{VAR}(\pi)$$

$U$  是经济当事人的效用,  $E(\pi)$  和  $\text{VAR}(\pi)$  是其预期收益和风险,  $A$  是对风险的惩罚因子, 体现风险偏好。显然, 不一定最大效用对应于最大期望收益, 市场参与各方的效用不仅取决于某策略下的预期收益, 也取决于与该策略相关的风险及交易者的风险偏好。

### 3.2 考虑系统稳定性的供用电交易模型

#### (1) 结算电价的定义

为了建立考虑系统稳定性的交易模型, 首先定义一个替代  $p$  的结算电价  $p_c$

$$p_c = p \times \left( 1 + \left| \frac{p - p_0}{p_0} + \frac{L - L_0}{L_0} \right| \right)$$

式中  $p$  可以是  $T$  时段竞价所决定的某时段实时电价, 也可以是在更长的结算期内以实时电价为基础的时间加权电价, 它主要反映了区域内的电力供求情况;  $p_0$  则对应于  $p$  的预测值(数学期望), 该定义式绝对值符号内第一项为正, 则电力出现了预期外的供不应求, 否则供大于求;  $L$  是结算期内买方实

际用电量,  $L_0$  是买方签约时申报的计划用电量。

#### (2) 考虑系统稳定性的供用电交易模型

在上述基础上, 本文给出考虑系统稳定性的供用电交易模型。其实现过程见图 1。

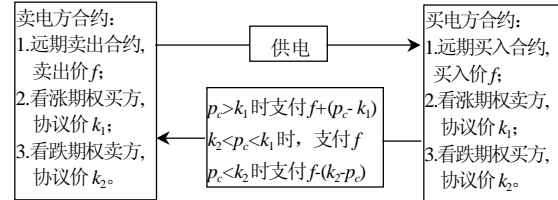


图 1 交易模型的实现过程示意图

Fig. 1 Illustration figure on choices and payments by participants

该模型的特点:

1)  $f$  的计算方法不变, 但以  $p_c$  替代原双边合约模型中的  $p$ ;

2) 具有弹性的  $k_1, k_2$  值最终取决于不同买卖双方各自对  $V$  和  $W$  的估计, 但是可能分别在不同风险偏好下被低报和高报, 这对应于他们所愿意接受的  $f$  值, 这一点使更多的交易者得以灵活参与这一交易模式。

3) 直接用现金结算来等价期权被实际执行情况下所获得的收益, 从这一点上看, 类似于以往的差价合同。当出现  $p_c > k_1$  时, 卖方无法在支付给买方  $k_1$  后中断供电, 再到现货市场以  $p_c$  卖电, 而只能继续向买方供电, 但买方需补偿卖方理论上的套利收益  $p_c - k_1$ ; 相反, 当  $p_c < k_2$  时卖方需补偿买方理论上的套利收益  $k_2 - p_c$ 。

4) 在该模型下买卖双方的报酬函数与其在  $T$  时的行为相关, 可参见前文文献[9]的结论。

#### (3) 模型有利于系统稳定性的特性分析

可以看出, 一方面, 买方虽可能持有不同  $f$  值的远期合约, 但  $p_c > k_1$  总是意味着买电方有意愿外的新增支出。买方虽然不能控制现货电价, 但它可以影响结算电价, 这将使其倾向于减负荷以使  $p_c$  不至于升得过高。在负荷紧张时, 越来越多买方的这种节电行为将最终有利于  $p$  的下降; 另一方面,  $p_c < k_2$  总是意味着买电方有利可图, 其将倾向于增加负荷使  $p_c$  不至于升得过高以期维持这一利益, 但在负荷不足时越来越多买方的这种行为将有利于  $p$  的增加。上述诸行为又能使  $p_c$  最终上升到计划内区域, 这有利于买方稳定其购电成本。另一方面, 买方行为对  $p$  值的这种敏感使卖方对  $p$  可能的操纵变得无利可图<sup>[14]</sup>。总之, 该交易模型正如一支“看不见的手”, 其指导下的交易和用电策略的实施过程总是使

有利于在系统运行中平滑预期外的价格波动,使供求关系始终向着有利于电价收敛的方向转化。交易者在避免价格风险的同时提高了系统运行的计划性、稳定性和经济性<sup>[15]</sup>。

注意到原双边模型不具有这种对用电量的调整功能:一方面,当 $p > V > f$ 时卖方将支付 $V-f$ 而中止供电,但一个具有 $V$ 的买方显然会继续从现货市场购电一直到 $p > V + (V-f)$ ,因此卖方执行期权套利的同时并未能真正减少用电方的负荷;同样,当买方执行期权时由于卖方获得了补偿 $f-W$ ,他会继续以低价售电直至 $p < 2W-f$ 。另一方面,原双边电力远期合约模型中交易双方的期望与现模型刚好相反,他们只有在现货电价出现宽幅波动时才有利可图,电价的窄幅波动对双方都带来合约定价意义上的风

险,而这一交易取向引起的可能的供用电行为取向显然不利于系统的稳定。

#### (4) 算例与说明

设 $T$ 时段电价 $p$ 服从梯形概率分布如图2。

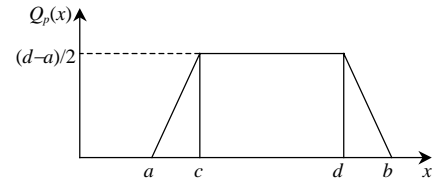


图2  $T$ 时段现货电价概率密度函数示意图

Fig. 2 Probability density function of the price  $p$  in period  $T$

取 $a = 0.3$ ,  $b = 1.0$ ,  $c = 0.4$ ,  $d = 0.9$ 。这相当于标准差 $\sigma = 0.1756$ ,数学期望为 $p_0 = 0.650$ 。表1列出用MATLAB编程计算得到的数值计算结果(精确到小数点后3位)。

表1 可选的合约电价 $f$

Tab. 1 Optional contract prices $f$

买方单位电量价值 $V$ (\$/kW·h)	卖方单位电量成本 $W$ (\$/kW·h)										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
0.3	0.300	0.300	0.300								
0.4	0.397	0.397	0.397	0.400							
0.5	0.481	0.481	0.481	0.483	0.500						
0.6	0.547	0.547	0.547	0.550	0.567	0.600					
0.7	0.597	0.597	0.597	0.600	0.617	0.650	0.700				
0.8	0.631	0.631	0.631	0.633	0.650	0.683	0.733	0.800			
0.9	0.647	0.647	0.647	0.650	0.667	0.700	0.750	0.817	0.900		
1.0	0.650	0.650	0.650	0.653	0.669	0.703	0.753	0.819	0.903	1.000	
1.1	0.650	0.650	0.650	0.653	0.669	0.703	0.753	0.819	0.903	1.000	
1.2	0.650	0.650	0.650	0.653	0.669	0.703	0.753	0.819	0.903	1.000	
$\geq 1.2$	0.650	0.650	0.650	0.653	0.669	0.703	0.753	0.819	0.903	1.000	

表中可能的卖方单位电量成本 $W$ 介于0.1~1.0之间(考虑卖方可能为发电商)。可能的买方单位电量价值为 $V \geq 0.3$ 。

单位电量价值高于预测的电价高限1.0的买方可以不拘泥于不变的 $f$ (见 $V \geq 1.0$ 以下各列的 $f$ 值)而偏低选择其上方的合约,这对其他买方也可行;同样,单位电量成本低于预测的电价高限的供电者(见 $W \leq 0.3$ 以左各行的 $f$ 值)也可以偏高选择其右方的合约,这对其他卖方也适用。但卖方上述选择会减少交易对手(例如真实电量价值不大于0.5的买方肯定不会选择 $V \geq 0.6$ 下方的任何合约),表中的空白格反映了这种效应。

在双方根据自身条件和偏好接受任意单元格的合约如( $W=0.6$ ,  $V=0.8$ ,  $f=0.683$ )后,则任何购电方都会主动调整实时用电量以使自己的 $p_c$ 尽量小,这将最终使 $p_c$ 倾向于回归区间(0.6, 0.8),这显然

有利于提高用户用电计划性、成本稳定性以及平抑电价的不利波动。

## 4 结论

本文在深入分析现有双边可选远期合同模型局限性的基础上提出了一种有利于通过交易方法而非技术方法维护系统稳定运行的交易模型及相应的交易策略。同时,对交易参数和合约电价的灵活选择也使之更具备弹性和可操作性。

本文集中于对供用电关系的交易模型的讨论。不难看出,讨论及其结论并不局限于高度开放的电力市场,在一定信息条件支持下也可适用于初期电力市场之中。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响. [J] 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6.  
Xue Yusheng. Interactions between power market stability and power

- system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6.
- [2] 言茂松. 当量电价与融资重组[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 张宇波, 罗先觉, 邹晓松, 等. 发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析.[J]中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23. Zhang Yubo, Luo Xianjue, Zou Xiaosong *et al.* Generation market power and the influence of bilateral trade on it[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 18-23.
- [4] 江健健, 夏清, 祁达才, 等. 基于期货的新型电力交易模式.[J]中国电机工程学报, 2003, 23(4): 31-37. Jiang Jianjian, Xia Qing, Qi Dacai *et al.* New mechanism of electricity trade based on futures[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 31-37.
- [5] 叶永刚. 金融工程学[M]大连: 东北财经大学出版社, 2002.
- [6] Gedra T W, Varaiya P P. Markets and pricing for interruptible electric power[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1993 8(1): 122-128.
- [7] Gedra T W. Optional forward contracts for electric power markets[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(4): 1766-1773.
- [8] David A K. Risk modeling in energy contracts between host utilities and BOT plant investors[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1996, 11(2): 359-365.
- [9] 张少华, 李翰曾, 王长军, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]电力系统自动化, 2001, 25(21): 28-32. Zhang Shaohua, Li Hanzeng, Wang Cagnjun *et al.* Trading model under bilateral option embedded forward contracts[J]. Automation of Electric Power systems, 2001, 25(21): 28-32.
- [10] 汤振飞, 唐国庆, 于尔铿, 等. 电力市场输电定价[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 91-95. Tang Zhenfei, Tang Gouqing, Yu erkeng *et al.* Power market transmission pricing[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 91-95.
- [11] 白利超, 康重庆, 夏清, 等. 不确定性电价分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 36-42. Bai L C, Kang C Q, Xia Q *et al.* Analysis on the uncertainty of electricity price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-42.
- [12] 刘广建, 胡三高, 戴俊良. 电力系统边际电价的混沌特性及预测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 6-9. Liu G J, Hu S G, Dai J L. Analyse on the chaotic character and forecast method of the marginal price in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 6-9.
- [13] 赵学顺, 黄民翔, 韩桢祥. 电力市场中风险规避问题的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 14-20. Zhao X S, Huang M X, Han Z X. Study on risk evasion in electricity market[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(7): 14-20.
- [14] 张少华, 方勇, 李翰曾. 电力市场中的激励性机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 56-57. Zhang Shaohua, Fang Yong, Li Hanzeng. Incentive mechanism in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 56-57.
- [15] 汤振飞, 唐国庆, 于尔铿, 等. 电力市场动态分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 88-93. Tang Z F, Tang G Q, Yu E K *et al.* Dynamic analyse on power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 88-93.

收稿日期: 2004-10-08。

作者简介:

乞建勋 (1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络优化理论、电力经济理论。