

# 合同和电力拍卖市场购电量分配问题的研究

王海欢, 邹斌

(江南大学通信与控制工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 基于机会约束规划提出一种新的计及风险的供电公司购电模型, 给出了将带随机约束条件的决策优化模型转换为确定模型的方法, 并针对该模型给出了基于随机模拟的遗传算法进行求解的方法。通过求解该优化模型, 能够较好地协调方案购电费用和 risk 这两个指标。论文最后运用实际市场数据进行了数值仿真, 通过仿真可以清楚显示出购电商最优市场分配策略, 结果表明本研究有助于购电商在电力市场中寻求最优投资策略。

**关键词:** 电力市场; 购电分配; 机会约束规划; 遗传算法; 风险分析

## Electricity purchasing allocation research between the contract and power auction markets

WANG Hai-huan, ZOU Bin

(School of Communication and Control Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Based on the chance-constraint programming, this paper proposes a new bidding strategy considering risks of the electricity purchaser, and simplifies it into a decision-making optimization model with stochastic constraint. The solution to this model is genetic algorithm based on stochastic simulation. After settlement to the optimization model, two indexes, purchase cost and risk, can be coordinated successfully. Finally, the paper gives us a numerical simulation using factual market data. The simulation demonstrates optimal market distribution strategy of the electricity purchaser clearly. Results of this study indicate that it is helpful for electricity purchaser to seek optimal investment strategy in the electricity market.

**Key words:** electricity market; electricity purchaser allocation; opportunity constrained programming; genetic algorithms; risk analysis

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)05-0040-05

## 0 引言

电力市场环境下, 电力交易通常具有多种不同的形式<sup>[1~5]</sup>, 其中最主要的形式就是合同与拍卖市场的方式。在合同交易中, 交易量与交易价格由买卖双方通过面对面的谈判确定, 而在拍卖市场则是通过竞价的方式, 按照市场出清规则进行。市场成员可以利用交易方式的不同组合获得最为有效的交易方案<sup>[6,7]</sup>。对于单一买主的市场而言, 确定其利用合同与拍卖市场交易购买电量的比例是购电决策的典型问题。

在购电商购电决策的风险管理中, 刘亚安等人研究了在日前、时前和实时三个顺序市场中的购电分配问题, 并讨论了其中风险的描述及其影响<sup>[8,9]</sup>。文献[10]根据投资风险的 Markowitz 理论建立了最大化利润的目标模型, 把利润的方差作为度量风险的指标。文中引入  $\beta$  (供电公司对风险的重视程度)

将一个双目标规划转换成了单目标规划, 那么  $\beta$  的值很大程度上决定着购电的分配, 该模型应用的关键是正确评估  $\beta$ 。文献[11]分别用成本揭示及 VAR 对购电成本的风险进行风险评估, VAR 把对预期的未来损失大小和该损失发生的可能性结合起来, 不仅让供电公司知道发生损失的规模, 而且知道其发生的可能性。文献[12]运用 Monte Carlo 仿真手段来寻求合同分配问题的最优解。Monte Carlo 方法收敛速度与问题的维数无关, 而且理解容易, 容易编制程序, 但是 Monte Carlo 方法也有其弱点, 其计算量非常大, 若想增加一位精度, 需要增加 100 倍的计算量, 而且其收敛速度比较慢。

本文利用机会约束规划理论将两个交易市场购电量分配的问题用一个机会约束规划模型表示, 并利用模型变换将其变换成确定性的可求解模型。利用该模型, 本文还进一步讨论了合同市场与电力拍卖市场即现货市场之间的相互影响的关系。

## 1 模型的建立

### 1.1 合同与现货市场的特点

我们的模型建立在这样的市场规则之下: 购电者可以从合同市场与现货市场(电力拍卖市场)上购买需要的电量。合同市场中购买的电量与电价由买卖双方通过协商确定, 而电力拍卖市场的电量以及电价则是由拍卖市场规则确定, 这里我们设定按照统一出清的电价规则确定。

市场价格不是任何市场成员可以控制的, 而且目前的市场价格波动很大, 这使得合同购买及其比例成为规避风险的重要内容。考虑供电公司的费用和风险时既要考虑需求量的不确定性, 又要考虑合同市场与现货市场的价格及其风险。因为市场参与者的任何一方都不能完全控制市场, 所以两市场的电价都是随机变量, 并且具有正相关性<sup>[10]</sup>。

根据文献[13]对电力拍卖市场的实证分析, 电力拍卖市场的电价可以看成是条件于负荷的随机变量, 而且服从对数正态分布。在预测到未来一个时期的负荷情况下, 可以确定其电价的基本分布。文献[14]给出了具体的推导, 本文引用该结果, 电力拍卖市场的电价表示为服从对数正态分布, 所谓对数正态分布就是将实际电价取对数以后为正态分布。即假设  $\lambda_2$  为电力拍卖市场电价, 则  $\ln \lambda_2$  服从期望为  $\mu_2$ , 方差为  $\sigma_2^2$  的正态分布。电力拍卖市场基于预测负荷的电价概率密度函数为:

$$f(\lambda_2 | L) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2\lambda_2} e^{-\frac{(\ln \lambda_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}, & \text{若 } \lambda_2 > 0 \\ 0 & \text{若 } \lambda_2 \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_2$  表示电力拍卖市场电价, 是随机变量;  $L$  表示负荷需求电量;  $\mu$  和  $\sigma$  分别称为对数正态分布的“对数均值”和“对数标准差”。则供电公司在电力拍卖市场购买电量的费用可表示为:

$$R_A = \lambda_2 \times Q_A \quad (2)$$

其中:  $A$  是拍卖 Auction 的缩写。  $Q_A$  是在电力拍卖市场购买的电量。

合同市场是双边协商的结果, 根据以前的经验, 进行电量分配的时候通常并不能够确定其交易的电价。一般可以设合同电价为  $\lambda_1$ , 服从期望为  $\mu_1$ , 方差为  $\sigma_1^2$  的正态分布。而此时在合同市场的购买费用为:

$$R_C = \lambda_1 \times Q_C \quad (3)$$

式中:  $C$  是合同 Contract 的缩写。  $\lambda_1$  是合同的电

价, 随机变量, 服从正态分布。  $Q_C$  是合同市场的交易量。

设供电公司在未来一个时期的总的电量需求为  $Q$ , 显然有

$$Q = Q_A + Q_C \quad (4)$$

### 1.2 电量购买分配模型

供电公司的电量购买分配模型的目标是使得总的购电费用最小化。也即为如下模型:

$$\begin{aligned} \min_q \quad & f = q\lambda_1 + (Q - q)\lambda_2 \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq q \leq Q \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_1$  是合同市场的电价, 随机变量;  $\lambda_2$  是电力拍卖市场的电价, 随机变量;  $Q$  为供电公司购买的总电量, 确定值;  $q$  是合同市场的购买电量, 模型的决策变量。

由于电价都是随机变量, 这个模型中的购电费用也是一个随机变量。这种模型不能够求解。通常的方法是将目标函数变为求其期望最小。本文则进一步构造成一个随机约束规划。具体模型如下:

$$\begin{aligned} \min_q \quad & \bar{f} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \Pr\{f \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ 0 \leq q \leq Q \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\bar{f}$  是式(5)确定的购买费用函数, 随机变量;  $f$  是一个确定量, 其意义是一个指定的购买费用水平;  $\beta$  是一指定的概率, 表示购买费用不大于指定值的置信水平; 其它符号如前。

上述模型的含义是选择合同购买量, 使得购买费用最小的同时还要保证其实现的概率达到要求的置信水平。这个模型是一个典型的机会约束的模型。

## 2 模型求解

### 2.1 基于机会约束规划模型的转换

根据文献[17], 可以将模型(6)转换为下述的模型:

$$\begin{aligned} \min_q \quad & \bar{f} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \bar{f} \geq \sup\{K | K = F_f^{-1}(\beta)\} \\ 0 \leq q \leq Q \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

$F_f$  为  $f = q\lambda_1 + (Q - q)\lambda_2$  的分布函数。

因为  $\lambda_2$  服从对数正态分布, 由文献[14]可以推出

$$\mu_2 = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}, \sigma_2^2 = e^{2\mu + 2\sigma^2} - e^{2\mu + \sigma^2}$$

符号定义同前。  $f \sim N(\bar{\mu}, \bar{\sigma}^2)$  即  $f$  服从正态分布

其中:  $\bar{\mu} = q\mu_1 + (Q - q)\mu_2$

$$\bar{\sigma}^2 = q^2\sigma_1^2 + (Q - q)^2\sigma_2^2 + 2\rho q\sigma_1\sigma_2(Q - q)$$

式 (7) 可以进一步化简为标准正态分布的形式:

$$\begin{aligned} \min_q \quad & \bar{f} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \bar{f} \geq \bar{u} + \bar{\sigma}\Phi^{-1}(\beta) \\ 0 \leq q \leq Q \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $\Phi$  为标准正态分布函数。上述模型 (7) 是一个确定性的模型。只是由于  $F_f$  与  $q$  的关系是一个非线性关系, 则这个模型是一个典型的非线性有约束的优化问题。针对这种优化问题, 遗传算法是一种优良的求解方法。

### 2.2 遗传算法求解目标函数

遗传算法<sup>[18]</sup>流程图如图 1 所示。

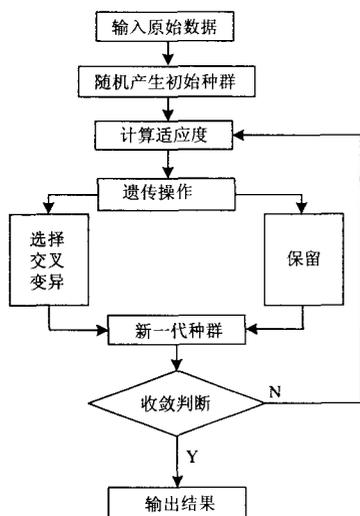


图 1 遗传算法流程图

Fig.1 Genetic algorithm flow chart

在这里编码的选取采用长度  $l = 10$  的二进制编码符号串来表示现货、合同市场的电量  $q_1, q_2$ 。整个染色体表示为  $[q_1 | q_2]$ , 染色体长度为 20 位, 前 10 位表示  $q_1$ , 后 10 位表示  $q_2$ 。

适应度函数采用目标函数为最小问题时的适应度函数,  $C_{\max}$  为一固定值, 为了保证适应度非负,  $C_{\max}$  要取的足够大。为求购电费用最小, 在总需求电量确定, 并且知道历史电价时, 总的购电费用可以很容易地大概预测出来, 所以界限值  $C_{\max}$  也很容易确定, 本文取  $C_{\max} = 10000000\$$ 。

$$Fitness(x) = \begin{cases} C_{\max} - f(x) & f(x) < C_{\max} \\ 0 & f(x) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

把模型 8 中求目标值  $\bar{f}$  最小代入到公式 (9), 假设  $f_t = u + \bar{\sigma}\Phi^{-1}(\beta)$ , 我们可以得到遗传算法的目标函数模型:

$$\begin{aligned} \min_q \quad & Fitness(q) = \begin{cases} C_{\max} - f_t & f_t < C_{\max} \\ 0 & f_t \geq C_{\max} \end{cases} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq q \leq Q \end{aligned} \quad (10)$$

其中: 决策变量是  $q$ 。

### 3 算例分析

根据某地区供电公司对历史数据<sup>[19]</sup>分析的基础上, 估计合同市场和现货市场电价分布及其相关系数、负荷预测分布如表 1 所示。

表 1 变量统计特征

Tab.1 Statistical features of variable

	符号表示	分布
合同电价	$\lambda_1$	$N(55, 189)$
现货电价	$\ln \lambda_2$	$N(72, 1122)$
负荷预测	$Q$	$N(1800, 2803)$
相关系数	$\rho$	0.1

其中  $\lambda_1$  和  $\ln \lambda_2$  的单位为  $\$/MWh$ ,  $Q$  的单位为  $MWh$

分别取目标函数的置信水平  $\beta$  为 0.95、0.9、0.85、0.8, 得到在不同置信水平下的合同市场购电量  $q$ , 现货市场购电量  $Q - q$ , 购电分配比率  $\gamma = q/Q$ , 购电费用期望值  $\bar{u}$  如表 2:

表 2 不同的  $\beta$  所产生的变化情况

Tab.2 Changes produced by different  $\beta$

$\beta$	0.99	0.95	0.90	0.85
$q$	1733.4	1785.6	1798.2	1798.2
$Q - q$	66.6	14.4	1.8	1.8
$\gamma$	0.963	0.992	0.999	0.999
$\bar{u}$	100132	99244	99030	99030
$\Phi^{-1}(\beta)$	2.33	1.745	1.28	1.14

其中  $q$  和  $Q - q$  单位为  $MWh$ ,  $\bar{u}$  单位为  $\$$

由此, 可以看出模型的最后求解结果, 当  $\beta$  取 0.90 时, 合同市场的分配电量  $q$  为 1798.2  $MWh$ , 现货市场的分配电量为  $Q - q$  为 1.8  $MWh$ , 购电分配比率  $\gamma$  为 0.999, 即购电者选择在相对稳定的合同市场来购买大部分电量。

为了更好地阐述两市场的电价均值与标准方差对购电分配策略的影响, 在保持  $\beta = 0.95$ , 其它

量不变的情况下,通过改变 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 来分析购电策略的变化状况。

首先,分别改变合同市场和现货市场的标准方差 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ ,结果如表3、4所示:

表3 不同的 $\sigma_1$ 所产生的变化情况  
Tab.3 Changes produced by different  $\sigma_1$

$\sigma_1$ 变化 $\beta = 0.95$				
$\sigma_1$	$q$	$Q-q$	$\gamma$	$\bar{u}$
11	1798.2	1.8	0.999	99030
13	1798.2	1.8	0.999	99030
15	1755	45	0.975	99765
17	1699.2	100.8	0.944	100713
19	1636.2	163.8	0.909	101784

其中 $q$ 和 $Q-q$ 单位为MWh,  $\bar{u}$ 单位为\$

表4 不同的 $\sigma_2$ 所产生的变化情况  
Tab.4 Changes produced by different  $\sigma_2$

$\sigma_2$ 变化 $\beta = 0.95$				
$\sigma_2$	$q$	$Q-q$	$\gamma$	$\bar{u}$
33	1783.8	16.2	0.991	99275
35	1789.2	10.8	0.994	99183
37	1794.6	5.4	0.997	99091
39	1798.2	1.8	0.999	99030
41	1798.2	1.8	0.999	99030

其中 $q$ 和 $Q-q$ 单位为MWh,  $\bar{u}$ 单位为\$

当合同市场的标准方差 $\sigma_1$ 降低,则合同市场购电量增多,但最多为1798.2MWh,现货市场的购电量减少,购电分配比升高,期望购电总费用减少。当 $\sigma_1=15$ 时,购电商在合同市场的购电量为1755MWh,在现货市场的购电量为45MWh,此时的购电分配比为0.975,期望购电总费用为99765\$。

同理可得现货市场的标准方差变化结果。这个结论说明,当一个市场的标准方差增大时,代表此市场风险增大,则购电商将减少在此市场的购电量,而增加另一市场的购电量。当增加在现货市场的购电量时,会导致期望总购电费用的增加。

那么,分别改变合同市场和现货市场的均值 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ ,结果如表5、6。

当现货市场的电价均值 $\mu_2$ 升高,则此市场的购电量较少,合同市场的购电量增多,最多至1798.2MWh,购电分配比升高,期望购电总费用降低。当现货市场的电价均值为70\$/MWh,则购电商将在合同市场购得1760.4MWh,现货市场39.6MWh,购电分配比为0.978,期望购电总费用为99594。这个结论证明,当一个市场电价的升高,购电商将减少

在此市场的购电量而增加另一市场的购电量,当减少了现货市场的购电量时,会使得总体购电费用的降低。

表5 不同的 $\mu_1$ 所产生的变化情况  
Tab.5 Changes produced by different  $\mu_1$

$\mu_1$ 变化 $\beta = 0.95$				
$\mu_1$	$q$	$Q-q$	$\gamma$	$\bar{u}$
51	1798.2	1.8	0.999	91837
53	1798.2	1.8	0.999	95434
55	1785.6	14.4	0.992	99244
57	1760.4	39.6	0.978	103194
59	1737	63	0.965	107019

其中 $q$ 和 $Q-q$ 单位为MWh,  $\bar{u}$ 单位为\$

表6 不同的 $\mu_2$ 所产生的变化情况  
Tab.6 Changes produced by different  $\mu_2$

$\mu_2$ 变化 $\beta = 0.95$				
$\mu_2$	$q$	$Q-q$	$\gamma$	$\bar{u}$
68	1737	63	0.965	99819
70	1760.4	39.6	0.978	99594
72	1785.6	14.4	0.992	99244
74	1798.2	1.8	0.999	99034
76	1798.2	1.8	0.999	99037

其中 $q$ 和 $Q-q$ 单位为MWh,  $\bar{u}$ 单位为\$

综上所述,一个市场风险的增大,导致购电商选择另一个相对稳定的市场;一个市场电价的升高,导致另一市场购电量的增多。这个结论证明了合同市场和现货市场具有相关性。

#### 4 结论与展望

电力市场中供电公司如何寻求在两个市场中最优的购电分配问题,以使得购电费用能够在一定风险时达到最小。本文给出了该模型转换为确定的有约束优化模型的方法以及基于遗传算法的求解算法。基于实际数据的计算表明,该方法可以为用户提供在一定可信度下的最大收益的电量购买分配决策。

进一步的工作将围绕如何提高模型的求解效率、完整考虑各种约束条件等方面展开。

#### 参考文献

- [1] CHAO Hung-po. Global Electricity Transformation: The Critical Need for Integrated Market Design and Risk Management Research[J]. Energy, 2006, 31: 923-939.
- [2] Deng S J, Oren S S. Electricity Derivatives and Risk Management[J]. Energy, 2006, 31: 940-953.
- [3] MA Xin-shun, WEN Fu-shuan, NIA Yi-xin, LIU Jian-xin. Towards the Development of Risk-constrained Optimal

- Bidding Strategies for Generation Companies in Electricity Markets[J]. Electric Power Systems Research, 2005,73: 305-312.
- [4] Vehrilainen I, Keppo J. Managing Electricity Market Price Risk[J]. Eur J Res, 2003,145(1):136-147.
- [5] LIU Min, Wu F F. Managing Price Risk in a Multimarket Environment[J]. IEEE PWS 2006,21(4):1512-1519.
- [6] CHEN Xiao-ling, He Y, Song Y H, et al. Study of Impacts of Physical Contracts and Financial Contracts on Bidding Strategies of GENCOs[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2004,26: 715-723.
- [7] Tanlapco E, Lawarre J, Liu C C. Hedging with Futures Contracts in a Deregulated Electricity Industry[J]. IEEE PWS, 2006,17(3):577-582.
- [8] 刘亚安, 管晓宏. 电力市场中购电商的市场分配问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(10):20-23.  
LIU Ya-an, GUAN Xiao-hong. Market Allocation Problem for Energy Demander in Power Market[J]. Proceedings of CSEE, 2001,21(10):20-23.
- [9] 刘亚安, 管晓宏. 考虑风险因素的两市场购电优化分配问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 41-44.  
LIU Ya-an, GUAN Xiao-hong. Optimization of Purchase Allocation in Dual Electric Power Markets with Risk Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9):41-44.
- [10] 郭金, 江伟, 谭忠富. 风险条件下供电公司最优购电问题研究[J]. 电网技术, 2004,28(11):18-22.  
GUO Jin, JIANG Wei, TAN Zhong-fu. Research on Optimized Power Purchasing of Power Suppliers under Risk Condition[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 18-22.
- [11] Woo Chi-Keung, Karimov R I, Ira Horowitz. Managing Electricity Procurement Cost and Risk by a Local Distribution Company[J]. Energy Policy, 2004,32: 635-645.
- [12] Vehrilainen I, Keppo J. Managing Electricity Market Price Risk[J]. Eur J Res, 2003, 145(1):136-147.
- [13] 朱兆霞, 邹斌. 市场环境下配电公司的风险模型及负荷率的影响分析[J]. 继电器, 2007, 35(12):63-67.  
ZHU Zhao-xia, ZOU Bin. The Risk Model of Distribution Utilities and Analyzing the Infection[J]. Relay, 2007, 35(12):63-67.
- [14] 朱兆霞, 邹斌. PJM 日前市场的电价统计分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 53-57.  
ZHU Zhao-xia, ZOU Bin. Statistical Analysis of Day-ahead Prices in PJM Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(23):53-57.
- [15] 王健, 文福栓, 杨仁刚. 基于机会约束规划的发电公司最优检修策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 27-31.  
WANG Jian, WEN Fu-shuan, YANG Ren-gang. Optimal Maintenance Strategy for Generation Companies Based on Chance-constrained Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(19): 27-31.
- [16] 李益国, 沈炯, 刘西陞. 基于机会约束规划的发电公司竞标策略[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(10): 120-123.  
LI Yi-guo, SHEN Jiong, LI Xi-chui. A New Bidding Strategy for Power Plants Based on Chance-constrained Programming[J]. Proceedings of CSEE, 2006,26(10): 120-123.
- [17] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
LIU Bao-ding, ZHAO Rui-qing. Stochastic Programming and Fuzzy Programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [18] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithm Theory and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [19] <http://www.pjm-cem.com/markets/energy-market/day-ahead.html>[EB/OL].

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-11-02

作者简介:

王海欢(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: haihuangirl@yahoo.com.cn

邹斌(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力市场和自动化。

(上接第 39 页 continued from page 39)

- [9] 邹红波. 电力负荷预测的无偏灰色预测模型研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2004.  
ZOU Hong-bo. Research on Unbiased Grey-forecasting Model of Power Load Forecasting[D]. Yichang: Three Gorges University, 2004.
- [10] 柴学俊. 太原市电力经济价值研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.  
CHAI Xue-jun. Study on the Economic Value of Electricity in Taiyuan City[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.

收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-08-31

作者简介:

郑文琛(1981-), 男, 硕士研究生, 研究领域为电力负荷预测; E-mail: zwc810324@yahoo.com.cn

吉培荣(1962-), 男, 教授, 研究领域为电力负荷预测、系统工程;

罗贤举(1982-), 男, 硕士研究生, 研究领域为电力负荷预测。