

# 虑及现货市场不确定性的发电集团燃煤优化

陶文斌<sup>1</sup>, 张粒子<sup>1</sup>, 舒隽<sup>1</sup>, 黄弦超<sup>1</sup>, 周明<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学(北京)电力工程系, 北京 102206; 2. 华能国际电力股份有限公司, 北京 100031)

**摘要:** 燃料成本占发电总成本的比重极大。电力工业市场化改革使得发电企业面临的不确定性增加。如何应对市场不确定性, 优化燃料配给, 最大化自身利益是发电集团亟待解决的问题。建立了发电集团参与多个市场(或同一市场不同价区)竞争时, 以集团利润期望最大为目标, 虑及现货市场电价和上网电量不确定性的燃料配置优化的随机期望值模型, 并以随机模拟、神经网络和遗传算法相结合的混合智能算法进行求解。实践和算例分析表明, 该模型和算法能有效地解决市场环境发电集团燃料的优化配置。

**关键词:** 电力市场; 不确定性; 燃料优化; 随机期望值; 混合智能

## Fuel distribution optimization of the generation group considering the uncertainty of the spot market

TAO Wen-bin<sup>1</sup>, ZHANG Li-zi<sup>1</sup>, SHU Juan<sup>1</sup>, HUANG Xian-chao<sup>1</sup>, ZHOU Ming<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Huaneng Power International, Inc, Beijing 100031, China)

**Abstract:** The fuel cost is a large proportion of the generation cost. Because of the electricity market, the uncertainty which the power enterprises faced increased. How to deal with the uncertainty and to optimize the fuel distribution to maximize the profit is an urgent problem. In this paper, a random expected value model is proposed to optimize the fuel distribution. In this model, a generator corporation took part in several competed markets (or different price zones in the same market), and the goal is maximizing the expectation of the whole corporation's profit under the uncertainty of the spot market. A mixed intelligent algorithm which combines random simulation, nerve network and genetic algorithm is used to solve the model. By the practice and the case, the model and the algorithm can optimize the fuel distribution of the generation enterprises under the electricity market effectively.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577022).

**Key words:** electricity market; uncertainty; fuel distribution optimization; random expected value; mixed intelligent

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0035-05

## 0 引言

电力工业市场化改革从根本上改变了传统的电力生产决策模式, 发电企业在影响企业收益的每一个环节精打细算, 以节约成本, 最大化利润, 增强自己在市场的竞争力。

对一个燃煤电厂而言, 其燃煤支出约占总发电成本的 60%~70%<sup>[1,2]</sup>。有效地降低燃煤成本, 提高单位燃煤的产出, 对燃煤电厂提高经济效益, 更有利地参与市场竞争至关重要。

此外, 日益高涨的煤炭价格和紧张的煤炭资源供给、尖锐的“电煤”矛盾也使得让有限的燃煤发挥最大的效益成为利国利民的大事。

## 1 市场条件下燃煤优化存在的问题

传统的燃煤配给建立在负荷经济调度的基础上, 在常规的等耗量微增率准则的基础上发展起多种模型和算法<sup>[3,4]</sup>。市场化竞争使得这些模型显得不合时宜。其中, 最为突出的是, 这些模型忽视了电能市场价格的波动及其不确定性。

此外, 开放的市场使得发电集团可同时参与多个市场的竞争, 谋求集团整体利益的最大化。此时, 燃煤资源在集团内部不同发电厂之间的再分配需要考虑众多因素, 例如: 燃煤到不同市场的运输成本各不相同; 不同的市场结构和不同市场的电能价格差异导致相同的燃煤产生不同的收益期望<sup>[5~7]</sup>, 等等。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50577022)

因此, 本论文考虑电能现货市场价格的不确定

性, 建立一个全新的、适应以集团身份参与多个市场竞争、以整体利益最优为目标的燃煤优化模型。

## 2 市场条件下燃煤优化模型

### 2.1 成本模型

论文中考虑的燃煤成本主要包括两部分: 购煤成本和运输成本。忽略存储成本的差异。此外, 下文中涉及燃煤数量、价格等的论述均是指换算成标准煤后的数值, 不再一一重复。

某电厂  $i$  的燃煤购买成本模型可表示如下:

$$C_{1i} = \sum_{j=1}^M D_j L_{ij} \quad (1)$$

式中:  $D_j$  为煤产地  $j$  的燃煤单价;  $L_{ij}$  为电厂  $i$  购产地  $j$  煤的数量; 由  $M$  个煤产地购煤。

设该发电集团下共有  $N$  个发电厂, 则集团总的购煤成本可表示为:

$$C_1 = \sum_{i=1}^N C_{1i} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_j L_{ij} \quad (2)$$

某电厂  $i$  的燃煤运输成本模型可表述为:

$$C_{2i} = \sum_{j=1}^M B_{ij} L_{ij} \quad (3)$$

式中:  $B_{ij}$  为电厂  $i$  至煤产地  $j$  之间的单位煤炭运输价格。

则集团总的燃煤运输成本可表示为:

$$C_2 = \sum_{i=1}^N C_{2i} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M B_{ij} L_{ij} \quad (4)$$

电厂  $i$  的燃煤成本模型为:

$$C_i = C_{1i} + C_{2i} = \sum_{j=1}^M D_j L_{ij} + \sum_{j=1}^M B_{ij} L_{ij} = \sum_{j=1}^M (D_j + B_{ij}) L_{ij} = \sum_{j=1}^M O_{ij} L_{ij} \quad (5)$$

式中:  $O_{ij} = D_j + B_{ij}$  为电厂  $i$  由煤产地  $j$  供煤的单位总成本; 定义:  $O_i$  为电厂  $i$  的平均单位燃料成本,

$L_i = \sum_{j=1}^M L_{ij}$  为电厂  $i$  的总的供煤量。则:

$$C_i = O_i L_i \quad (6)$$

集团总燃煤成本为:

$$C = C_1 + C_2 = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N O_i L_i \quad (7)$$

### 2.2 利润模型

电厂  $i$  的收益可表示为:

$$H_i = P_{1i} \times Q_{1i} + P_{2i} \times Q_{2i} \quad (8)$$

式中:  $P_{1i}$  为合约电量价格,  $Q_{1i}$  为合约电量,  $P_{2i}$  为现货市场价格,  $Q_{2i}$  为现货市场竞价成功电量。本文以部分电量竞争市场为基础, 模型假设仅存在合约市场和现货市场<sup>[8,9]</sup>。依据实际市场模式、结构和结算方式的不同, 利润模型表达式可作相应的改变。

电厂  $i$  利润:

$$K_i = H_i - C_i \quad (9)$$

公司总利润:  $K = \sum_{i=1}^N K_i$

由于优化变量仅为煤的供给量, 所以式中, 发电成本仅考虑燃料成本。

发电量和煤耗量之间的关系可表示为:

$$L = g(Q), Q = g^{-1}(L) \quad (10)$$

其中:  $L$  为煤耗量,  $Q$  为电量。

### 2.3 目标函数

#### 2.3.1 不考虑市场不确定性的优化模型

若不考虑市场的不确定性, 此时, 各市场上网电量及其价格为定值, 则目标函数为:

$$F = \max f(L_{ij}) = \max \left( \sum_{i=1}^N (H_i - C_i(L_{ij})) \right) \quad (11)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^N L_{ij} \leq L_{j0} \quad j=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M O_{ij} L_{ij} \leq C_0 \quad (13)$$

式 (12) 为各煤产地可购煤量约束,  $L_{j0}$  为煤产地  $j$  的最大供煤量; 式 (13) 为公司总燃料成本约束。其余约束如: 各电厂最大最小发电量等不再累述。

该模型为一线性或非线性 (取决于  $g(Q)$ ) 规划问题, 通过单纯性法或拉格朗日松弛即可求解。

#### 2.3.2 考虑现货市场不确定性的优化模型

考虑现货市场价格的不确定性, 从而导致现货电量的不确定性, 电厂  $i$  的利润模型式 (9) 可表示为:

$$K_i = H_i - C_i =$$

$$\begin{cases} P_{1i} \times Q_{1i} + P_{2i} \times (Q_i - Q_{1i}) - C_i \\ Q_{1i} + Q_{2i} \geq Q_i \end{cases} \quad (14-1)$$

$$\begin{cases} P_{1i} \times Q_{1i} + P_{2i} \times Q_{2i} - C_i \\ Q_i > Q_{1i} + Q_{2i} \end{cases} \quad (14-2)$$

$$(14)$$

式中:  $Q_i = g^{-1}(L_i)$ , 为电厂  $i$  配给的燃煤量  $L_i$  可发电量;  $Q_{2i}$  此时为表示现货电量的随机变量; 模型假设结算顺序<sup>[10]</sup>为先合约电量, 再进行现货电量的结算, 即在合约电量完成的基础上方可进行现货交易。因此, 模型中仅现货市场的价格和电量存在不确定性。并且, 为突出重点, 简化问题的讨论, 模型假设市场能够保证合约电量的完成。式(14-1)、(14-2)分别表示当可发电量  $Q_i$  小于合约电量与现货需求量之和以及大于合约电量与现货需求量之和时电厂  $i$  的利润。

由于现货价格  $P_{2i}$  存在不确定性, 导致现货电量的不确定, 此时  $P_{2i}$ 、 $Q_{2i}$  为两随机变量, 目标函数转变为期望收益最大。而事实上,  $P_{2i}$ 、 $Q_{2i}$  并非彼此独立的随机变量, 而是互相影响关联的, 因此, 通过对历史数据的观测, 可建立现货电量与价格之间的函数关系:

$$\begin{cases} P_{2i} = M(Q_{2i}) \\ Q_{2i} = M^{-1}(P_{2i}) \end{cases} \quad (15)$$

由此, 目标函数可表示为:

$$F = \max E(K) \quad (16)$$

$$E(K) = \sum_{i=1}^N E(K_i) = \sum_{i=1}^N E(K_i(Q_i, Q_{2i})) = \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{Q_i - Q_{2i}} [P_{1i} \times Q_{1i} + P_{2i} \times (Q_i - Q_{1i}) - C_i(Q_i)] d\phi(Q_{2i}) + \int_0^{Q_i - Q_{2i}} [P_{1i} \times Q_{1i} + P_{2i} \times Q_{2i} - C_i(Q_i)] d\phi(Q_{2i}) \right\} \quad (17)$$

约束条件同模型 1。

式中:  $E$  为期望值算子,  $\phi(Q_{2i})$  为  $Q_{2i}$  的分布函数,

待决策变量为  $Q_i = g_i^{-1}(L_i) = g_i^{-1}(\sum_{j=1}^M L_{ij})$ 。

### 3 市场条件下燃煤优化模型的求解

本文所建立的目标函数为一随机期望值模型, 由于积分的存在, 用常规的优化算法求解较为困难。可采用随机模拟、神经网络和遗传算法结合而成的混合智能算法<sup>[11]</sup>来求解该模型, 其基本思想是通过随机模拟生成输入输出样本数据, 并以此训练逼近不确定性函数的神经网络, 将该网络作为适应值函数融入遗传算法进行寻优。

具体的求解步骤如下:

1) 依据  $\phi(Q_{2i})$  的分布函数形式, 通过随机模

拟为不确定函数  $E(K)$  产生输入输出数据 (即训练样本)。在市场信息充分的情况下也可以直接用实际数据作为训练样本, 通常训练样本对应至少在 200 个以上。

2) 根据产生的训练样本训练一神经网络 NET 以逼近不确定函数  $E(K)$ 。本文选用一个具有 6 个隐层神经元的 BP 网络, 具体如何选择神经网络及确定相应参数多有文献述及, 本文不再累述。

3) 以神经网络 NET 的输出和依据式 (12)、(13) 的约束条件构造的罚函数之和作为适应值函数  $Fitness$ 。

4) 初始产生  $pop\_size$  个染色体, 并用训练好的神经网络 NET (即  $E(K)$  的逼近形式) 检验染色体的可行性。

5) 对染色体进行交叉和变异运算, 并用训练好的神经网络 NET 检验后代的可行性。

6) 根据适应值函数  $Fitness$  计算每个染色体的适应度。

7) 通过旋转赌轮选择染色体。

8) 重复步骤 4) 至步骤 7), 直到完成给定的循环次数。

9) 找出最好的染色体作为最优解。

### 4 算例仿真

本节以一个拥有两个电厂, 由 a、b、c 3 个产煤地购煤的发电集团进行算例仿真。算例 1 仿真的是不考虑现货市场不确定性的情况; 算例 2 仿真的是计及现货市场不确定性的情况。

#### 4.1 算例 1

基础参数如表 1。

表 1 基础参数表

Tab.1 Basic data

|      | D (元/吨) |     |     | B (元/吨) |    |    | 上网电价 (元/MWh) |     |
|------|---------|-----|-----|---------|----|----|--------------|-----|
|      | a       | b   | c   | a       | b  | c  | P1           | P2  |
| 电厂 1 | 400     | 380 | 390 | 50      | 60 | 80 | 300          | 350 |
| 电厂 2 | 400     | 380 | 390 | 60      | 50 | 90 | 290          | 360 |

为简化问题, 其余参数设定为: 两电厂装机容量均为 600 MW, 煤耗为 0.36 吨/MWh。a,b 最大产煤量 1.1E+6 吨, c 最大煤产量 8.5E+5 吨。

表 2 优化方案 1

Tab.2 Optimization result 1

(吨)

|      | a   | b   | c     |
|------|-----|-----|-------|
| 电厂 1 | 1.1 | 0   | 0.222 |
| 电厂 2 | 0   | 1.1 | 0.628 |

由单纯形法可得优化的燃煤分配方案如表 2。此时，集团利润为：1.28E9 元。

4.2 算例 2

基础参数和算例 1 相同。

文献[12~14]讨论了现货市场电价分布的概率模型；文献[15]提出了求取不同市场现货价格概率分布的方法，以此为参考结合所处现货市场的历史数据可获得现货价格的概率分布。

本文以澳大利亚 South Australia 市场 2004 年 5 月份现货市场数据为基础，其价格分布直方图如图 1 所示，中间频段存在极窄的“尖峰”<sup>[13]</sup>，个别时段价格的非正常飞升产生“胖尾”<sup>[13]</sup>，其余部分基本满足正态分布。

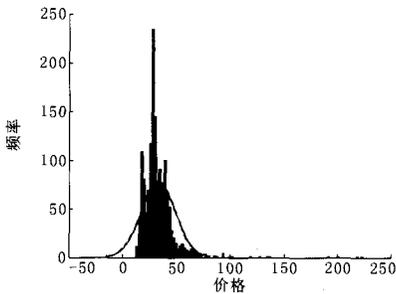


图 1 South Australia 市场 2004 年 5 月份现货价格分布直方图

Fig.1 Spot price distribution histogram of South Australia market in May, 2004

故本算例假设电厂 1 和电厂 2 所在市场现货价格分别满足正态分布  $N(350,113), N(360,169)$ ，电厂  $i$  所发现货电量为所处市场现货价格的线性函数和一个服从均匀分布  $\mu(-0.216,0.216)$  的随机噪音的叠加。电厂 1 所处现货市场价格和所发现货电量曲线如图 2 所示。

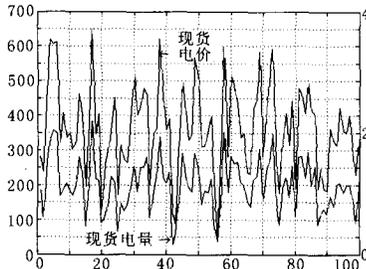


图 2 电厂 1 现货市场价格和现货电量曲线图

Fig.2 The curve of the spot price and the spot energy of power plant 1

随机模拟生成满足上述分布的 2 000 组价格与电量的随机序列，同时产生 200 组输入样本数据  $I^k = (L_{1a}^k, L_{1b}^k, L_{1c}^k, L_{2a}^k, L_{2b}^k, L_{2c}^k)$ ，依据公式 (17)

计算相应的输出  $O^k = (E^k(K))$ ，组成 200 组输入输出样本  $S$ ，训练 BP 神经网络以逼近不确定函数  $E(K)$ 。将训练好的神经网络作为适应值函数嵌套入遗传算法，经 1 000 次遗传迭代后，可求得最优解如表 3 所示。

表 3 优化方案 2

| Tab.3 Optimization result 2 (吨) |         |         |         |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
|                                 | a       | b       | c       |
| 电厂 1                            | 0.036 1 | 0.818 2 | 0.589 6 |
| 电厂 2                            | 1.063 9 | 0.281 8 | 0.260 4 |

此时，集团利润为：1.19E9 元。

寻优过程曲线如图 3 所示。

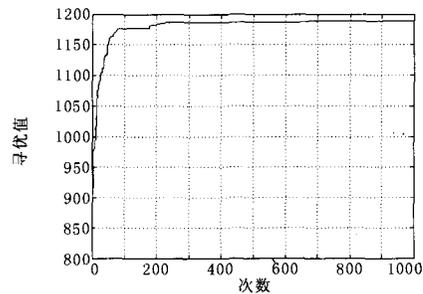


图 3 遗传算法寻优过程

Fig.3 The optimization process of GA

4.3 分析

由以上两个算例分析可以看出，当不计及市场的不确定性（如：发电侧未开展市场化竞争）时，发电集团燃煤配给相对容易，可简单归纳成上网电价高的电厂（机组）优先选择综合价格水平（燃料单价和运输价格之和）低的燃煤；当市场存在不确定性并必须被计及的时候，情况要复杂得多，不但与上网电价水平有关，而且与价格的分布及其上网电量的分布有关，必须针对具体的市场建立随机优化模型加以求解。

5 结论

电力工业市场化运作使得发电企业面临的不确定性急剧增加。合理应对不确定性，优化安排企业内部资源，将使发电企业在开放的市场中降低风险，提高竞争力，最大化自身利润。本文建立了顾及现货市场价格不确定性的燃煤配给优化的随机期望模型，并采用混合智能优化算法进行求解，对发电企业在市场条件下优化资源配置作了有益的探索。随着市场化改革的逐步深入，不确定性因素将进一步增多，如：燃料价格的随机波动等，可参照本文模型建立相应的优化模型进行求解。

参考文献

- [1] 彭全刚. 火力发电企业面临五大风险[J]. 中国电力企业管理, 2005, 10: 30-31.
- [2] 吴川, 郑秀萍, 柴天佑. 火电厂燃料管理系统的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 64-66.  
WU Chuan, ZHENG Xiu-ping, CHAI Tian-you. Research and Application of Fuel Management System in Thermal Power Plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 64-66.
- [3] 于尔铿, 周京阳, 张学松. 电力市场竞价模型与原理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 24-27.  
YU Er-keng, ZHOU Jing-yang, ZHANG Xue-song. Bidding Model and Bidding Principle for Power Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 24-27.
- [4] 于尔铿, 周京阳, 吴玉生, 等. 发电竞价算法(二)——等报价法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 10-13.  
YU Er-keng, ZHOU Jing-yang, WU Yu-sheng, et al. Generation Bidding Algorithm Tutorials, Part Two: the Equal Bidding Price Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 10-13.
- [5] 江健健, 康重庆, 夏清. 电力市场模拟中基于信念的发电商智能个体决策模型[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 4-9.  
JIANG Jian-jian, KANG Chong-qing, XIA Qing. A New Belief-based Bid Decision Model of Genco Agent in Electricity Market Simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 4-9.
- [6] 康重庆, 白利超, 夏清, 等. 电力市场中发电商的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 1-6.  
KANG Chong-qing, BAI Li-chao, XIA Qing, et al. Risk Decision-Making of Generators in Electricity Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 1-6.
- [7] 郭晨, 王锡凡, 张显. 基于效用函数的火电厂投资风险决策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 11-16.  
GUO Chen, WANG Xi-fan, ZHANG Xian. Risk Decision-making of Thermal Power Plant Investment Based on Utility Function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 11-16.
- [8] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 电力市场下长期购电方案及风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 116-122.  
ZHOU Ming, NIE Yan-li, LI Geng-yin, et al. Long-term Electricity Purchasing Scheme and Risk Assessment in Power Markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 116-122.
- [9] 王伟, 管毅平, 翟海青, 等. 电能现货拍卖交易中企业间默契合谋行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 15-18.  
WANG Wei, GUAN Yi-ping, ZHAI Hai-qing, et al. Analysis of Collusion Among Enterprises in the Spot Auction Transaction of Power Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 15-18.
- [10] 尚金成, 张兆峰, 韩刚, 等. 区域电力市场竞价交易模型与交易机制的研究(二) 电价机制及其稳定制度、市场风险及其规避、结算机制与市场盈余公平分配模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 5-12.  
SHANG Jin-cheng, ZHANG Zhao-feng, HAN Gang, et al. Study on Transaction Model and Mechanism of Competitive Regional Electricity Market, Part Two: Pricing Mechanism and Stabilization System, Market Risk and Evasion, Settlement Mechanism and Market Surplus Allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 5-12.
- [11] 刘宝碯, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] 郑华, 张粒子, 谢莉, 等. 关于电力市场下系统边际价格概率模型的新研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 74-79.  
ZHENG Hua, ZHANG Li-zi, XIE Li, et al. Study on the Probability Model of System Marginal Price in Electricity Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 74-79.
- [13] 郑华, 谢莉, 张粒子, 等. 系统边际价格概率分布的实证分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 43-47.  
ZHENG Hua, XIE Li, ZHANG Li-zi, et al. Positivism Analysis on the Probability Distribution of System Marginal Price[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 43-47.
- [14] 张富强, 周浩. 电力市场中的电价分布问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 22-28.  
ZHANG Fu-qiang, ZHOU Hao. Probability Distribution of Prices in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 22-28.
- [15] 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): 36-41.  
BAI Li-chao, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Analysis on the Uncertainty of Electricity Price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-41.

收稿日期: 2006-12-13; 修回日期: 2007-02-02

作者简介:

陶文斌(1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电网技术经济分析, 发电竞价, 电力市场模式;  
E-mail: twbest\_cn@163.com

张粒子(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析与电力市场方向研究工作;

舒隽(1974-), 男, 副教授, 从事电力系统优化研究工作。