

文章编号: 1005-0523(2008)03-0090-05

# 基于改进粒子群算法的机组经济运行的博弈

仲晓春 彭春华 陈佳琰

(华东交通大学 电气与电子工程学院 江西 南昌 330013)

摘要: 在电力市场下如果能够根据实时电价求出在该电价下机组经济运行状况, 可以给发电公司权衡报价风险和企业利润提供极大的帮助. 如果发电公司仅依据发电成本报价, 在参与竞价上网时会因缺乏灵活性而造成机组被迫频繁停机和利润空间的浪费. 为此, 根据企业利润最大化原则建立机组经济运行数学模型, 并用改进粒子群算法对模型优化求解. 通过实例分析与传统方案的预测结果进行比较, 说明其效果的优劣. 其给发电公司决策提供更为灵活、有效的方法.

关键词: 电力市场; 粒子群算法; 利润最大化; 机组

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

在电力市场体制下, 如何获得最大的经济效益, 如何在激励的竞争中立于不败之地, 这已成为发电公司关注的焦点. 在目前电力市场运行机制下, 不同的发电公司实行竞争发电. 电力公司作为独立实体参加电价控制, 输电与发电分离, 独立经营管理, 为发电公司和用户提供转送电能服务<sup>[1][2]</sup>. 而发电公司往往要通过竞价上网来获得利益. 目前在发电公司所提出的报价方法主要是按发电成本报价. 通常实时地采集与发电生产成本有关的各种数据, 确定机组运行工况与发电成本的关系, 最终发电公司通过预测未来一天的成本趋势及电价来制定上报电价. 但在电力市场条件下, 一天内的市场电价会波动很大, 不可能与某一个发电公司的发电成本始终保持一致. 因此发电公司若单纯以内部机组的发电成本报价常常会严重偏离外部的市场电价, 当成本报价高于市场电价时会导致机组落选而被迫停机, 当成本报价大大低于市场电价时则会造成利润空间浪费而无法得到最大发电利润. 为了保证成功竞价上网并能够获得较大利益, 本文提出发电公司应该基于企业利润最大化的原则, 综合考虑市场电价和自身发电成本的发电报价模型. 根据市场电价的波动变化对机组的各个时段的计划出力以及启停状况, 进行优化调整, 协调好企业售电量和市场电价之间的平衡关系, 制定出市场体制下发电机组经济运行调度的优化方案, 最终实现企业利润最大化.

## 1 目标函数的建立

### 1.1 成本分析机组运行约束条件

首先发电公司对本公司的成本充分地了解, 因为发电利润取决与市场电价与发电成本的差额. 差额越大, 最终获得利润也随之越高. 因此发电公司在竞价上网时要对本公司的发电成本做充分地分析, 并结合发电机组的运行特性才能够制定出有效的报价策略.

因为电力市场中一般是分时段进行报价, 因此需要对发电成本分时段进行计算. 将固定成本分摊到每小时得到平均固定成本以  $f_{cap}$  表示.

#### 1) 机组的耗能成本及机组的启运成本<sup>[3-8]</sup>

收稿日期: 2008-04-08

作者简介: 仲晓春(1981-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事电力市场、电力系统优化方面研究.

$$(1) \text{ 耗能成本} \quad V_t = aBw^2 + bBw + cB \quad (1)$$

$$(2) \text{ 熄火方式启动成本} \quad S_u = K_0 + K_1(1 - e^{-t_i/\tau}) \quad (2)$$

$$(3) \text{ 压火运行方式的启动成本} \quad S_u = K_0 + K_2t_i \quad (3)$$

式中  $a$   $b$   $c$  为运行耗能特性参数,  $B$  为煤价格(可以通过预测求得),  $K_0$  为汽机启动成本,  $K_1$  为锅炉冷却后的启动成本,  $K_2$  压火运行时单位时间耗煤成本,  $\tau$  为锅炉冷却系数,  $t_i$  代表停机时间.

## 2) 机组运行的相关约束条件<sup>[5,6,7]</sup>

$$\text{机组输出功率的上下限约束} \quad w_{\min} \leq w_t \leq w_{\max} \quad (4)$$

$$\text{机组的爬坡约束} \quad -R_d\Delta t \leq w_t - w_{t-1} \leq R_u\Delta t \quad t=1, 2, \dots, 24 \quad (5)$$

$$\text{机组启动过程输出功率的变化约束} \quad w_t - w_{t-1} \leq k_u\Delta t \quad (6)$$

$$\text{机组停机过程输出功率的变化约束} \quad w_{t-1} - w_t \leq k_d\Delta t \quad (7)$$

$$\text{机组的最小开机时间} \quad (rr_{t-1} - M_u)(I_{t-1} - I_t) \geq 0 \quad (8)$$

$$\text{机组的最小停机时间} \quad (zz_{t-1} - M_d)(I_t - I_{t-1}) \geq 0 \quad (9)$$

$w_{\min}$  和  $w_{\max}$  为机组输出功率的上、下限,  $R_d$  和  $R_u$  分别为机组容许输出功率的最大下降速度和上升速度,  $\Delta t$  为单位时间,  $k_u$  和  $k_d$  分别为启动、停止过程中机组输出功率的最大上升速度和最大下降速度,  $rr_{t-1}$  和  $zz_{t-1}$  为机组在  $t-1$  时段连续的运行时间和停机时间,  $M_u$  和  $M_d$  分别为机组的最小运行时间和最小停机时间,  $I_t$  为机组  $t$  时的运行状态.

## 1.2 目标函数的建立及对约束条件的处理

所谓机组的经济运行就是指能够使机组根据电价及其机组自身状况来确定 24 小时内的运行状态, 并使其在该状态下机组所获得利润是最大的. 其电价预测可以通过一些较准确的方法获得. 在电力市场下, 发电公司作为一个竞争实体, 发电公司的机组出力不再受上级部门的约束. 因此发电公司的各台机组可以分开独自竞价上网, 而不再互相影响, 也不再需要考虑传统的机组优化组合问题<sup>[4]</sup>, 使得模型简单化.

根据单台机组在一天 24 个小时段内的运行状态及各个时段内的实时电价得出单台机组经济利益最优的数学模型

$$\text{Max: } P(I, w) = \sum_{t=1}^{24} [w_t p_t + I_t (w_{\max} - w_t) r_t - I_t V_t - f_{cap} - u_{t-1} (1 - I_t) Z - u_t (1 - I_{t-1}) S] \quad (10)$$

式中  $Z$  为停机成本(约为常数),  $S$  为启动成本,  $r_t$  为旋转备用容量的价格,  $f_{cap}$  为固定成本,  $p_t$  为实时电价,  $w_t$  为实时发电功率.

由于机组的出力与报价是分时段, 所以要求出  $w_t$  的平均值, 根据文献[9]中的方法, 可以得  $t$  时段内的平均出力为

$$w_{ta} = w_{te} - (w_{te} - w_{tb}) / (2R) \quad (11)$$

$w_{tb}$  和  $w_{te}$  分别为  $t$  时段开始和  $t$  时段末机组出力,  $R$  为爬坡速度. 将机组的出力约束(4)代入上式, 并将  $w_{ta}$  取代(10)中的实时发电功率  $w_t$ , 得单台机组在一天内经济利益最优的数学模型为

$$\text{Max: } P(I, w) = \sum_{t=1}^{24} [w_{ta} p_t + I_t (w_{\max} - w_t) r_t - aBw_{ta}^2 I_t - bBw_{ta} I_t - cB I_t - f_{cap} - I_{t-1} (1 - I_t) Z - I_t (1 - I_{t-1}) S] \quad (12)$$

## 2 改进粒子群算法对数学模型的求解

### 2.1 粒子群优化算法原理

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法最初是由 Kennedy 和 Eberhart 博士于 1995 年受人工生命研究结果启发, 在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群体智能的演化计算技术. 该算法具有并行处理、鲁棒性好等特点, 能以较大概率找到问题的全局最优解, 且计算效率比传统随机方法高. 其最大的优势在于简单易实现、收敛速度快, 而且有深刻的智能背景, 既适合科学研究, 又适合工程应用.

将群体中的每个个体视为多维搜索空间中一个没有质量和体积的粒子(点), 这些粒子在搜索空间中以

一定的速度飞行,并根据粒子本身的飞行经验以及同伴的飞行经验对自己的飞行速度进行动态调整,即每个粒子通过统计迭代过程中自身的最优值和群体的最优值来不断地修正自己的前进方向和速度大小,从而形成群体寻优的正反馈机制。PSO算法就是这样依据每个粒子对环境的适应度将个体逐步移到较优的区域,并最终搜索、找到问题的最优解。

在找到两个最优值时,每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置

$$v_{k+1} = c_0 v_k + c_1 (pbest_k - x_k) + c_2 (gbest_k - x_k) \quad (13)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_{k+1} \quad (14)$$

其中  $v_k$  是粒子的速度向量;  $x_k$  是当前粒子的位置;  $pbest_k$  表示粒子本身所找到的最优解位置;  $gbest_k$  表示整个种群目前找到的最优解的位置;  $c_0, c_1, c_2$  表示群体认知系数。

## 2.2 改进粒子群算法求解模型

粒子群算法的本质是利用个体极值和全局极值两个信息,来指导粒子下一步迭代位置,考虑机组发电时段性,机组的每小段的运行状态为开机用 1 表示,停机用 0 表示。因此可以利用遗传算法的交叉变异思想<sup>[10]</sup>,让当前解与个体极值和全局极值分别做交叉操作,即  $c_1(pbest_k - x_k) + c_2(gbest_k - x_k)$  项相当于交叉操作。在交叉策略中,例如有两个粒子,随机产生  $k$  个随机数,从一个粒子选中这  $k$  位的值替换另一个粒子的相应位置,或者是随机选择一个区域进行替换。同样变异也可以选取  $k$  个位置或某个区域进行变异,然后计算变异后的粒子适应度与先前相比较。对于粒子  $a = 01110000111101011$  和粒子  $b = 11100100101111001$ ,用  $a$  的斜体部位取代  $b$  的相应位置。交叉后的新粒子  $b$  为 1110010111101001。同样变异也是如此,如将  $a$  的变异为新粒子后为 0111000100001011。

## 2.3 求解过程中对时间约束问题的处理

由于机组在运行过程中受到最小停机时间和最小运行时间的限制,这就要在进行优化的过程中对起停位置进行记录,并计算各段的运行状态是否满足最小的停机时间和最小运行时间的要求。对于首段状态并要根据前一天末段机组运行状态加以判断,如果最小停机时间为 5 小时,对与较小停机时间可以选择矫正操作来加以改进如 1111110000111100111100000 中斜体部分只有两位,矫正后得新粒子为 111111000011111111100000。在迭代后期效果更好,因为后期粒子趋于全局最优解,矫正操作相当于是对其局部的修补,对全局值不会有太大的影响。

## 2.4 算法流程设计

- (1) 确定种群大小、迭代次数,粒子初始解(随机)。
- (2) 根据式(11)求得粒子的适应度,确定初始值,并根据初始值和初始解确立全局极值,全局最优解。  
While(迭代次数 < 规定迭代次数) do  
For(j = 1: 种群数)  
(3) 当前粒子  $X_0$  与全局最优解进行交叉得  $X_0'$   
(4)  $X_0'$  与初始解交叉得  $X_1$   
(5) 对  $X_1$  进行变异操作,并计算当前位置适应值。  
(6) 如前解优于初始解更新当前解为初始解  
End  
(7) 找出全局极值,全局最优解。  
End  
(8) 输出全局极值和全局最优解。

## 3 算例结果及其分析

根据交易日的预测电价和机组的备用价格,发电公司便可以预测到交易日的最佳出力情况并指定报价,因为电价的不稳定因素所以预测中必定存在误差,而且报价也存在着风险,如果发电公司过于追求利润而报价过高,则会造成竞价上网失败而使得机组被迫停机而造成不必要的损失。因此本文所提出的方法可以给发

电公司权衡报价机组的利润情况来竞价上网,降低了报价风险并可获得相对较高的利润.

现以某发电公司的机组  $U_T$  为例来分析该机组在一天 24 小时的最佳运行状态及其利润情况. 机组的相关参数见表 1 表 2 部分数据参考了文献 [6, 8, 11].  $K_0$  为 0, 机组  $U_T$  的初始状态(前一天得末段状态)为连续运行 5 小时, 输出功率为 120 MW. 本文采用时间序列重构相空间混沌预测方法得到某个计划交易日市场边际电价和旋转备用电价的预测值, 计算出机组  $U_T$  的几种发电方案的利润水平.

表 1 机组的各项特性参数

机组	$aB/[\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$Bb/[\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$cB/(\text{元} \cdot \text{h})^{-1}$	$f_{cap}/(\text{元} \cdot \text{h})^{-1}$
$U_i$	0.4176	62.125	13680.0	12400.0
机组	$Z/\text{元}$	$\tau/h$	$K_1/\text{元}$	$K_2/(\text{元} \cdot \text{h})^{-1}$
$U_i$	960	8	46750.0	4150.0

表 2 机组的各项约束参数

机组	$q_{min}/\text{MW}$	$q_{max}/\text{MW}$	$\min M_d/h$	$\min M_U/h$
$U_i$	120	320	5	6
机组	$R_d/\text{元}$	$R_u/h$	$K_d/\text{元}$	$K_u/(\text{元} \cdot \text{h})^{-1}$
$U_i$	80	90	160	170

通过计算求得最佳的运行状态为 0000011111111111111100, 其利润值为 245 500 元, 迭代轨迹如图 1. 并且可求得机组  $U_T$  的 24 小时段的平均输出功率情况表 3 所示(MW, 保留整数位).

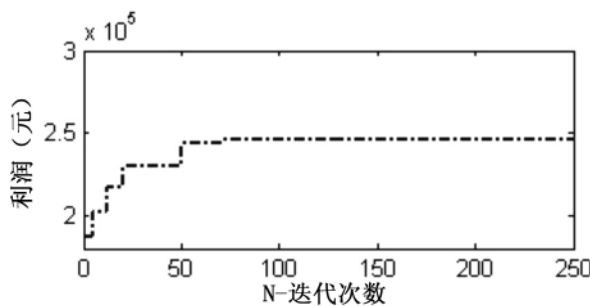


图 1  $U_T$  的迭代轨迹

表 3 机组  $U_T$  平均输出功率(MW)

时间	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
出力	45	0	0	0	0	85	210	248	307	292	315	320
时间	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
出力	289	237	179	151	124	165	255	318	320	318	238	0

与其他几种停机方案的机组利润比较:

表 4 机组不同方案下的利润

停机方案	利润(元)
0000011111111111111100	245 500
1111111111111111111111	187 250
1111111111111111111100	209 570
1000001111111111111100	214 060
0000011111111111111110	232 950
1000011111111111111110	191 740

因为公司报价总是尽可能接近市场电价,同时申报的发电量也是经过优化确定的,因此能获得理想的发电利润,从而在竞争中处于有利的位置.

## 4 结论

本文所提出的机组经济优化方案以企业利润最大化为目标,综合考虑了市场电价波动和机组发电成本。企业可以依此为依据来确定报价方案,并且能够清楚地了解公司所制定的报价方案下的利润情况。因此企业可以很好地权衡报价风险与利润之间的得失,制定出风险低、利润稳定的报价方案来。这个企业实例应用证明了其既具有科学性又具有灵活性。随着电力市场发展逐渐成熟以及电价短期预测水平的不断提高,发电机组的经济运行情况给发电公司编制上网报价计划以及机组发电计划提供有益的指导和借鉴。

### 参考文献:

- [1] 李 灿, 龚乐年, 宋燕敏, 等. Power Pool 中发电公司的竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 12-15.
- [2] 文福拴, David A K. 电力市场中的投标策略[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 1-6.
- [3] 于尔铿, 周京阳, 吴玉生. 发电报价曲线研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 23-26.
- [4] 陈皓勇, 张靠社, 王锡凡. 电力系统机组组合问题的系统进化算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 10-13.
- [5] 李文沅. 电力系统安全经济运行-模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [6] 韩学山, 柳 焯. 考虑发电机组输出功率速度限制的最优机组组合[J]. 电网技术, 1994, 18(6): 11-15.
- [7] Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [A]. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation [C]. IEEE: Service Center, 1999, 1957-1999.
- [8] 骆济寿, 张 川. 电力系统优化运行[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [9] 彭春华, 林中达. 电力市场下发电侧的发电与报价优化策略[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 1-5.
- [10] 高尚, 杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [11] ARROYO J M, CONEJO A J. Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(3): 1098-1104.

## A Game of Unit Economy Operation Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHONG Xiao - chun , PENG Chun - hua , CHEN Jia - yan

( School of Electrical and Electronic Engineering , East China Jiaotong University , Nanchang 330013 , China)

**Abstract:** In electricity market, if the state of unit economy operation is known, it can provide infinite help for generating corporation in balancing the risk of quoted price and profit. If the price bidding is only based on the generation cost, the unit will be compelled to shutdown frequently and the benefit space will be lost because of lacking of flexibility in price competing. In this paper, based on the principle of maximum profit, a mathematical model of unit which is unit economy operation is presented. An improved Particle Swarm Optimization algorithm is used in the model, which is proved to be excellent. It provides generating corporations with a more flexible and effective method when compared with analyzing and predicting results of traditional project.

**Key words:** electricity market; Particle Swarm Optimization algorithm; maximum profit; unit

(责任编辑:周尚超)