

# 电力市场环境下独立发电商的机组优化调度

常文平<sup>1,2</sup>, 罗先觉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 河南机电高等专科学校, 河南 新乡 453002)

**摘要:** 针对火电机组的煤耗特性随着发电机的运行状况不断变化的特点, 在满足发电运行的各种约束条件下, 综合考虑发电会计成本, 提出了电力市场环境下基于两部制电价成本的优化调度模型。根据独立发电商发电机数量较少和实际运行的特点, 利用改进动态规划法, 通过减少机组运行状态组合对其快速求解。采用上述模型对采用两部制电价的某电厂进行了仿真计算, 结果表明该模型可明显提高大功率发电机组利用率, 对节能减排和高效设备投资具有引导作用。

**关键词:** 优化调度; 电力市场; 独立发电商; 两部制电价; 节能减排

## Optimal dispatching model of independent power producer units in electricity markets

CHANG Wen-ping<sup>1,2</sup>, LUO Xian-jue<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** As to the character of coal consumption of coal-burning units varying with running state, on condition that kinds of constraint of generating operation are contented, this paper presents an optimal dispatching model based on two-part electricity price cost under electricity market, in which accountant cost of power plant operation is considered. According to the feature of independent power producer and its actual running state, an improved dynamic programming method which reduces the combined conditions is adopted. Simulation is made using the above model on an actual power plant which adopts two-part electricity price cost. It is shown that the model can increase the operation rate of high-power generator and has a leading role in energy-saving, reducing pollutant emission and investment of highly-efficient equipment.

**Key words:** optimal dispatching; electricity market; independent power producer; two-part electricity price; energy-saving and reducing pollutant emission

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0102-05

## 0 引言

在增加很少投资的条件下, 机组优化调度就能获得较大的经济效益和社会效益, 根据相关资料和 华北、东北等电网的实际测算, 通过优化调度节省能源可达总耗量的0.5%~1.5%<sup>[1-2]</sup>。文献[3-4]介绍了集中调度下电力系统机组组合和优化调度的数学模型和方法, 其中的目标函数为机组的燃料费用, 随着电力工业市场化的改革, 这已经不能适应电力市场的要求<sup>[5]</sup>, 目标函数更多转变为购电成本或社会总收益<sup>[6-9]</sup>。在诸多方法中, 对于给定的发电机组, 发电机的燃料消耗或燃料费用函数方程采用固定的二次曲线表示, 这不符合生产实际情况, 事实上, 随着发电机运行年限的增加和维修效果的不同, 发

电机的耗量特性参数也逐渐变化, 同时, 由于大量的发电机的实际运行范围比较小, 使得测试发电机变化后的耗量特性参数非常困难, 导致按照发电机的固定耗量特性参数计算最优解偏离实际最优解较大, 从而影响发电机组的优化调度效果。针对这种情况, 本文使用生产实际中经常测试的发电量费用、空载旋转费用(对应容量费用)以及机组启动费用, 建立基于两部制电价的数学模型, 在独立发电商通过竞价获得日前发电计划后, 使得该目标函数最小。由于独立发电商的发电机数量比较少, 并根据实际发电机组运行的特点, 采用改进的动态规划法, 通过大量减少机组运行状态的组合快速求解。最后对使用两部制电价的某电厂试验, 并与该厂实际运行结果对比, 取得了满意的效果, 表明本文提出的方法具有可行性和有效性。

基金项目: 河南省中青年骨干教师资助项目(2009GGJS-134)

## 1 机组组合的数学模型

### 1.1 独立发电商日前发电计划的获得

在电力市场环境中, 发电商首先要采用多种方法预测次日各时段市场实时电价<sup>[10-14]</sup>, 在尽可能准确预测电价的基础上, 发电商制定自己总的电量-价格竞价曲线, 并提交电力交易中心, 如图1所示。

电力交易中心将发电商的竞价曲线和用户的需求曲线进行匹配, 形成各独立发电商次日各时段的发电量, 假设实时电价按小时出清, 并且获得的出清电量在数值上等于发电功率, 形成独立发电商的发电计划, 发电商根据自己机组的状况进行机组组合和负荷优化分配。

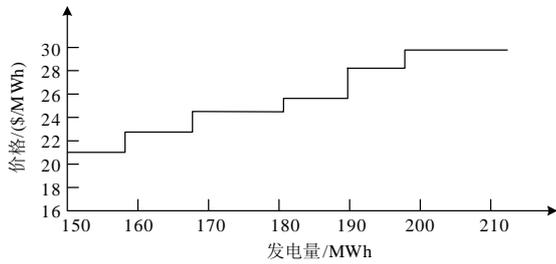


图1 独立发电商竞价曲线

Fig.1 Bid curve of independent power producer

### 1.2 目标函数

在两部制电价环境下, 独立发电商通过竞价获得日前发电计划后再进行机组组合, 其目标是使发电费用、空载旋转费用(对应容量费用)以及机组启动费用最小。设研究的总时段数为 $T$ , 机组数量为 $N$ , 则机组组合问题的目标函数为:

$$\min J = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_i(t)C_{ig}P_i(t) + u_i(t)C_{is} + u_i(t)(1 - u_i(t-1))S_i] \quad (1)$$

式中:  $P_i(t)$ 是机组 $i$ 在时段 $t$ 的出力;  $u_i(t)$ 为机组 $i$ 的工作状态,  $u_i(t)=1$ 表示机组 $i$ 在时段 $t$ 处于运行状态,  $u_i(t)=0$ 表示机组 $i$ 在时段 $t$ 处于停机状态;  $C_{ig}$ 为机组 $i$ 的每MWh的发电费用;  $C_{is}$ 为机组 $i$ 的空载旋转费用;  $S_i$ 为机组 $i$ 启动费用。

### 1.3 约束条件

#### 1) 系统负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = P_d(t) \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (2)$$

式中,  $P_d(t)$ 为发电集团或独立发电商在电力市场通过竞价获得的发电功率, 其获得方法如前所述。

#### 2) 系统备用约束

$$\sum_{i=1}^N (P_{imax}(t)u_i(t)) - P_d(t) - P_r(t) \geq 0 \quad (3)$$

$$\forall t=1,2,\dots,T$$

式中:  $P_{imax}(t)$ 为发电机组 $i$ 在第 $t$ 小时的最大输出功率;  $P_r(t)$ 为电力系统在第 $t$ 小时的备用容量。

#### 3) 发电机组的输出功率限制

$$P_{imin} \leq P_i(t) \leq P_{imax} \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (4)$$

式中:  $P_{imax}$ 为发电机组 $i$ 的最大输出功率;  $P_{imin}$ 为发电机组 $i$ 的最小输出功率。

#### 4) 发电机组的最小启停时间限制

$$1 \leq X_i(t) \leq T_{upi}, \quad u_i(t)=1 \quad (5)$$

式中:  $X_i(t)$ 为发电机组 $i$ 在第 $t$ 小时的状态变量, 为正值表示该机组目前处于开启状态, 并且已经运行了 $X_i(t)$ 小时;  $T_{upi}$ 为发电机组 $i$ 的启动时间, 在此段时间内不能停机。

$$-T_{dni} \leq X_i(t) \leq -1, \quad u_i(t)=0 \quad (6)$$

式中:  $X_i(t)$ 为负值表示该机组目前处于关闭状态, 并且已经关闭了 $-X_i(t)$ 小时;  $T_{dni}$ 为发电机组 $i$ 的关闭时间, 在此段时间内不能开机。

#### 5) 机组爬坡约束限制

这里假设机组出力增加速度和减少速度相同。

$$|P_{it} - P_{i,t-1}| \leq \Delta_{Ri} \quad (7)$$

式中:  $\Delta_{Ri}$ 为机组 $i$ 的出力爬坡限制。

## 2 求解算法

机组优化调度的算法有启发式方法、优先顺序法、整数规划和混合整数规划法、动态规划法、分支定界法、拉格朗日松弛法、专家系统法、模拟退火算法、人工神经网络法、遗传算法等<sup>[15-16]</sup>, 考虑到动态规划法对目标函数没有特殊的要求, 能求得全局最优解, 同时, 对于独立发电商的发电机组数量较少的特点, 本文采用改进的动态规划算法。

### 2.1 删除不可能存在的机组组合状态

如果使用完全状态的动态规划法, 对于 $N$ 台机组、 $T$ 个时段的机组组合, 总的机组状态组合数量可

以达到  $(2^N - 1)^T$ , 当  $N$  和  $T$  增大时, 计算量急剧增加, 形成所谓“维数灾”问题。为了克服“维数灾”问题, 根据机组组合的实际情况, 除掉不可能的组合状态。

1) 删除发电功率不符合要求的组合状态

根据发电功率平衡要求, 删除每一个时段处于“运行”状态的机组的最小功率之和仍大于负荷需求功率的组合; 删除每一个时段处于“运行”状态的机组的最大功率之和仍小于负荷需求功率的组合。

2) 删除机组启停费用高于发电收益的组合状态

在满足机组发电的物理约束条件下, 删除机组启停费用高于发电收益的组合状态。

3) 删除机组启停时间不符合要求的组合状态

以拥有4台机组10个小时机组调度为例, 假定调度周期内旋转备用容量为50 MW, 说明删除不符合要求的机组组合方式。表1、表2分别为发电机和负荷的参数, 表3为机组组合状态表。在表3中, 折线下面为功率不符合要求的组合状态; 椭圆内部的两种组合状态中, #3和#4发电机的停机时间为1 h, 不满足最小停机时间要求, 应当去掉。

通过删除不符合功率要求的组合状态, 没有运行效益甚至运行效益为负的组合状态, 以及启停时间不符合要求的组合状态, 可以使组合状态明显减少, 从而提高计算效率。

表1 机组参数  
Tab.1 The parameters of four units

Unit No.	1	2	3	4
$P_{max}/MW$	300	200	135	55
$P_{min}/MW$	180	120	80	30
$T_{up}/h$	6	5	5	3
$T_{dn}/h$	4	3.5	3	2

表2 负荷数据  
Tab.2 Load demand for four 10 hours

Hour	1	2	3	4	5
Load/MW	390	450	500	550	620
Hour	6	7	8	9	10
Load/MW	600	540	480	510	520

2.2 递推公式

动态规划计算过程分为正序造表和逆序查表两大步。在计算过程中, 一般选取时段  $t$  为阶段变量, 第  $t+1$  时段的机组组合号  $J$  为状态变量, 第  $t$  时段的机组组合号  $j$  为决策变量, 状态转移方程为  $f(t,j)=J^*$ , 则动态规划最优化递推计算式为:

$$J^*(t,k) = \min \{d_i(t,k) + S_i(j,k) + J^*(t+1,k)\} \quad (8)$$

$$s.t \quad f(t,j) = J^* \quad (9)$$

式中:  $J^*(t,k)$  为  $t$  时段  $k$  号组合下从  $t$  时段到末时段  $T$  最小总发电运行费用;  $d_i(t,k)$  为  $t$  时段  $k$  号组合下发电运行费用;  $S_i(j,k)$  为  $t+1$  时段  $j$  号组合转移到  $t$  时段  $k$  号组合的机组启动费用。

表3 机组组合状态曲线  
Tab.3 The trajectories for unit status

编号	机组组合	最大功率/MW	时间/h											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
15	1111	690	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
14	1110	635	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13	1101	555	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	1100	500	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
11	1011	490	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	1010	435	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	0111	390	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
8	1001	355	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
7	0110	335	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
6	1000	300	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
5	0101	255	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0100	200	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0011	190	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	0010	135	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1	0001	55	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0	0000	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

3 算例

以实际电网中某发电公司有关机组的参数为基础, 对具有6台火电机组的系统进行机组组合的优化计算。该发电公司装有6台发电机, 某典型日各发电机的参数见表4, 其中#1、#2发电机没有安装脱硫装置, #3、#4发电机采用配套的高压再热循环硫化床(CFB)锅炉, #5、#6发电机配套有烟气脱硫装置。

通过集中竞价, 电厂内部优化次日24 h各时段的发电功率如表5所示。

分两种情况优化各机组的发电负荷。

Case1. 不考虑排污收费

在6台发电机中, #1、#2发电机没有安装脱硫设备, 在不考虑排污收费的情况下, 优化调度结果如表5所示, 发电费用为573.4万元, 比典型日对应财务成本低3.2万元, 节约费用约0.56%, 经济效益明显。

表4 机组的特性参数  
Tab.4 The parameters of unit

机组	$P_{\min}/$ MW	$P_{\max}/$ MW	$S/$ (万元)	$C_s/$ (元/h)	$C_g/$ (元/MWh)	$T_{\text{dni}}/$ h	$T_{\text{upi}}/$ h	$P_R/$ (MW/m)
#1	100	220	20	2 600	126	8.5	10	3
#2	100	220	20.3	2 500	124	8.5	10	3
#3	70	135	11	1 900	130	12	12	2
#4	70	135	11	1 800	129	12	12	2
#5	150	320	27.5	3 000	114	24	16	5
#6	150	320	27.5	3 000	112	24	16	5

#### Case2. 考虑排污收费

考虑对#1、#2 发电机污染物排放收费, 假设收费标准为 20 元/MWh, 这种情况下的优化调度结果如表 5 所示, 从优化结果可以看出#1、#2 发电机

出力和发电量明显下降, 从 6 440 MWh 下降到 5 155 MWh, 下降约 20%, 这有利于减少硫化物和氮化物的排放。

表 5 两种情况的优化调度结果对比

Tab.5 Comparison of optimal dispatch results between in case 1 and case 2

时 段	负荷/ MW	#1 机功率/MW		#2 机功率/MW		#3 机功率/MW		#4 机功率/MW		#5 机功率/MW		#6 机功率/MW	
		Case1	Case 2										
1	870	100	100	100	100	70	70	70	70	210	210	320	320
2	890	100	100	100	100	70	70	70	70	230	230	320	320
3	880	100	100	100	100	70	70	70	70	220	220	320	320
4	870	100	100	100	100	70	70	70	70	210	210	320	320
5	870	100	100	100	100	70	70	70	70	210	210	320	320
6	870	100	100	100	100	70	70	70	70	210	210	320	320
7	1 000	100	100	150	100	70	93	70	97	290	290	320	320
8	1 050	100	100	170	100	70	83	70	127	320	320	320	320
9	1 250	170	170	220	170	110	133	110	137	320	320	320	320
10	1 100	100	100	220	100	70	123	70	137	320	320	320	320
11	1 100	100	100	220	100	70	123	70	137	320	320	320	320
12	1 080	100	100	200	100	70	103	70	137	320	320	320	320
13	1 080	100	100	200	100	70	103	70	137	320	320	320	320
14	1 100	100	100	220	100	70	123	70	137	320	320	320	320
15	1 070	100	100	190	100	70	93	70	137	320	320	320	320
16	1 060	100	100	180	100	70	83	70	137	320	320	320	320
17	1 050	100	100	170	100	70	73	70	137	320	320	320	320
18	900	100	100	100	100	70	70	70	97	240	213	320	320
19	1 200	170	143	170	170	110	110	110	137	320	320	320	320
20	1 180	180	100	220	166	70	137	70	137	320	320	320	320
21	1 150	150	100	220	136	70	137	70	137	320	320	320	320
22	1 000	100	100	120	100	70	70	70	90	320	320	320	320
23	910	100	100	100	100	70	70	70	70	250	250	320	320
24	950	100	100	100	100	70	70	70	70	290	290	320	320

## 4 结论

1) 在两部制电价环境中, 独立发电商在获得竞价发电量后进行机组组合和优化调度, 由于机组组合的约束特征, 能够明显减少机组组合的状态, 并且其目标函数为最小的两部制成本, 因此与生产实际更加接近。

2) 考虑污染物排放对发电成本的影响后, 发电出力明显向安装脱硫设备的机组转移, 说明该方法的实用性和有效性。

3) 采用基于两部制电价成本的机组优化调度模型, 可明显提高大功率发电机组利用率, 积极引导新建发电机组向大功率、高效率趋势发展, 符合国家节能发电调度改革的产业政策。

本文对于污染物排放,采用简化的和发电量相关的线性处理,对于污染物排放量特别是污染物排放浓度对机组调度的影响,有待进一步的研究。

### 参考文献

- [1] 蔡洋. 电网经济调度应立即开展起来[J]. 电网技术, 1994, 18(1): 44-48.  
CAI Yang. Economic load dispatching of power system must be carried out immediately[J]. Power System Technology, 1994, 18(1): 44-48.
- [2] Colien. Optimization-based methods for operations scheduling[J]. Proceedings of IEEE, 1987, 75(12): 1574-1591.
- [3] 于尔铿. 现代电力系统经济调度[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [4] 王剑奇, 张伯明, 赵子臣. 动态比较法确定机组的最优组合[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 254-256.  
WANG Jian-qi, ZHANG Bo-ming, ZHAO Zi-chen. Optimal generation unit commitment by dynamic comparing[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 254-256.
- [5] 杨梓俊, 丁明, 孙昕. 电力市场下综合考虑系统可靠性和旋转备用效益的机组组合[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 13-18.  
YANG Zi-jun, DING Ming, SUN Xin. Unit commitment problem under the condition of electricity market considering system reliability and benefit from spinning reserve[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 13-18.
- [6] CHAO An-li, Svoboda A J, GUAN Xiao-hong, et al. Revenue adequate bidding strategies in competitive electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 492-497.
- [7] 王喆, 余贻鑫, 张弘鹏. 社会演化算法在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 12-17.  
WANG Zhe, YU Yi-xin, ZHANG Hong-peng. Social evolutionary programming based unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 12-17.
- [8] 胡朝阳, 甘德强, 韩祯祥, 等. 市场机制下机组启动费用的分摊研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 1-11.  
HU Zhao-yang, GAN De-qiang, HAN Zhen-xiang, et al. Study on allocation of unit start-up costs under power market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 1-11.
- [9] 高鑫, 王秀丽, 雷兵. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 41-46.  
GAO Xin, WANG Xiu-li, LEI Bing, et al. Research on bidding strategy for an independent power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 41-46.
- [10] Schweppe F C, Caramanis M C, Tabors R D, et al. Spot pricing of electricity[M]. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [11] Szkuta B R, Sanabria L A, Dillon T S. Electric price short-term forecasting using artificial neural networks [J]. IEEE Trans on PWS, 1999, 14(3): 851-857.
- [12] 黄日星, 康重庆, 夏清. 电力市场中的边际电价预测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 9-12.  
HUANG Ri-xing, KANG Chong-qing, XIA Qing. System marginal price forecasting in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 9-12.
- [13] 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 Guang-jian, HU San-gao, DAI Jun-liang. Analysis on the chaotic character and forecast method of the marginal price in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 6-9.
- [14] 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 Yu-bo, LUO Xian-jue, ZOU Xiao-song, et al. Generation market power and the influence of bilateral trade on it[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 18-23.
- [15] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51-56.  
CHEN Hao-yong, WANG Xi-fan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(4): 51-56.
- [16] 吴玉生, 周京阳, 王功涛, 等. 发电竞价算法(三)——动态规划法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (6): 19-22.  
WU Yu-sheng, ZHOU Jing-yang, WANG Gong-tao, et al. The generation bidding algorithm tutorials part three dynamic programming method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (6): 19-22.

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-06-13

作者简介:

常文平(1970-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全与经济运行; E-mail: wpchang@163.com

罗先觉(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统安全经济运行、电力市场、电网规划优化。