

文章编号:1000-582X(2005)01-0045-04

## 市场环境下计及竞价机组整体特性的机组组合\*

周平<sup>1,2</sup>, 陈其<sup>2</sup>, 周家启<sup>1</sup>, 马玲<sup>1</sup>, 徐明<sup>3</sup>

(1. 重庆大学电力系统研究所, 重庆 400030; 2. 重庆电力超高压局, 重庆 400030;  
3. 重庆电力高等专科学校 电力工程系, 重庆 400053)

**摘要:**以价值工程和电力系统可靠性理论为指导, 针对目前发电市场中机组组合问题研究存在的未充分协调机组经济性和可靠性不足, 提出了一种基于竞价机组运行价值的新模型, 该模型以系统竞价机组的运行价值之和最大为优化目标, 兼顾了各竞价机组运行的经济性和可靠性, 其结果可为公平合理的发电计划制定, 提供量化决策依据。通过算例分析, 表明文中提出的方法比其他方法更全面、更合理。

**关键词:**电力市场; 机组组合; 可靠性; 经济性; 运行价值

**中图分类号:** TM732

**文献标识码:** A

在电力系统各环节中引入竞争、增强活力、优化资源配置, 已成为世界各国电力工业发展的趋势。如何确保市场化后的供电可靠性问题曾引起相当广泛的讨论, 相关文献对此也做过一些专题研究<sup>[1]</sup>。

机组组合问题是高维数、非凸、离散、非线性的, 很难找出理论上的最优解, 但由于它能带来显著的经济效益, 人们不断地探索新的方法来解决它, 文献[2-3]对机组组合问题的各种解法和相关参考文献进行了专门论述。

传统电力体制下, 发电公司和购电方属同一经济实体, 辅助服务费用由系统调度人员统一获取、统一结算, 发电公司在提交机组组合时不必考虑这部分费用, 机组组合问题的目标函数只需使电量总的生产成本最小化。随着电力市场的建立, 情况发生了很大的改变。发电公司和购电方各自成为独立的经济实体, 独立追求着自己最大的经济利益, 它们之间转变为纯粹的卖方和买方的商业关系。与传统的电力体制相比, 解除管制电力市场的运营将更加强调经济性和可靠性相协调。一方面, 由于发电公司和购电方各自独立, 都有自己的决策权, 发电公司有权决定是否投入 AGC 等旋转备用和发电机组计划出力多少, 而购电方按照市场“公平”原则, 依据经济性标准可以决定购买多少电

量、辅助服务以及向哪家发电公司购买。如果发电公司上报的电量和辅助服务因自身原因不能实现, 则发电公司就要向购电方进行经济赔偿; 同样, 如果购电方不能兑现它的预调度实时计划, 则它也要向遭受损失的发电公司赔偿。但实际系统中存在许多偶然因素, 当预测得到的负荷和实际负荷存在偏差, 如果购电方没有 AGC 等辅助服务时, 购电方就必须让某些发电公司调整机组的出力以满足实际负荷, 这必然会损害发电公司的利益, 购电方就必须向发电公司支付经济损失。为了防止类似情况发生, 购电方在购买电量时, 必须购买相应的 AGC 等辅助服务, 虽然这种购买不可能完全避免用户的供电中断, 但可以很大程度地减小事件发生概率。另一方面, AGC 等辅助服务的购买将取决于发电主市场的竞争结果, 相对于发电主市场而言, AGC 等辅助服务的购买与支付费用是低效、高成本的, 然而又是必需的。同时, 由于竞价机组具有运行可靠性和经济性双重特性, 为了避免新(有还贷任务)旧(无还贷任务)机组在竞价中“享受”不同的待遇, 防止一些低价、低可靠性投运机组停运(或降额)导致系统可靠性的降低, 故系统调度人员在确定机组组合时必须综合考虑所提交出力机组的运行可靠性和经济性, 以更公平合理地分配预定发电计划, 保持系统可靠性

\* 收稿日期: 2004-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助(50307015); 重庆市科委资助(2003-7951)

作者简介: 周平(1970-), 男, 重庆人, 重庆大学博士研究生, 主要从事电力系统规划与可靠性、电力市场环境下的优化运行方向研究。

与经济性的平衡。

简单地说,发电公司希望通过出售电能和相关辅助服务使自己的收益最大化,而购电方则想以最少费用购买所需的电能和服务,两者之间形成了一种此消彼长的矛盾。如果从整个社会角度看,则是希望以最小的生产成本满足社会需求,使社会效益达到最大化。因此,购电方的目标和社会效益目标相吻合,购电方不仅要购买所需的电能,还要购买其它相应的辅助服务,即辅助服务这部分费用也应作为购电方进行机组组合的费用目标函数中的一项,以满足系统稳定性的需要,这和传统机组组合问题有了明显的区别。

基于此,文中以价值工程<sup>[4-5]</sup>和电力系统可靠性理论为指导<sup>[6]</sup>,充分计及新旧竞价机组的整体特性,对市场环境下的机组组合问题进行深入研究,并提出一种新的机组组合模型,使系统可靠性与经济性更加协调。

## 1 价值工程理论

### 1.1 价值工程理论

价值工程(value engineering, VE),又称价值分析(value analysis, VA),起源于20世纪40年代的美国。其主要思想是以最低的寿命周期成本,可靠地实现产品或作业的必要功能,以提高其价值。它包括功能(Function)、成本(Cost)、价值(Value)等3个要素,三者之间关系如下:

$$\text{价值}(V) = \frac{\text{功能}(F)}{\text{成本}(C)} \quad (1)$$

式中,功能是指产品的用途或作用;成本是指用户为了得到产品的功能所愿支付的总费用(购置费用和使用费用);价值则是指产品给企业和用户双方带来经济效益的评价。总体上讲,价值工程理论并不单纯地强调降低成本,也不片面地追求提高功能,而是要求提高功能与成本之间的比值,以寻求功能和成本之间的平衡。

### 1.2 价值工程与电力系统可靠性的关系

功能分析是价值工程的核心,用户对产品的需求实质上是对产品功能的需求,价值工程正是基于这一点,着重于产品功能分析以及对用户所需要功能的分析,以实现最低寿命周期成本,满足用户功能需求,获取最佳的综合效益。

在电力市场中,用户不仅关心电力产品功能,而且更关心系统完成电力产品功能的能力。电力系统可靠性就是衡量这一能力的。电力系统可靠性的定义是:“电力系统按可接受的质量标准和所需数量,不间断地向电力用户供应电力的能力的量度”。这一能力取决于电力产品的生产和传输,而用户正确合理的使用又是维护这一能力的重要环节。因此,用价值工程的

方法来分析电力系统可靠性,是优化电力系统设计的一种科学方法。

在价值工程中,如果用可靠性分析代替功能分析,二者的内涵是一致的,这是由于可靠性与功能是密不可分的,可靠性是相对于一定功能而言的,可靠性分析是功能分析的拓展之一。

### 1.3 电力商品的价值工程定义

电力市场中,电力是商品,以价值工程观点,电力商品也应具有价值工程的基本三要素。文中约定电力商品的功能是连续而充足地供给用户具有正常电压和频率的电力,即表现为供电可靠性。电力商品的成本包括生产成本和使用成本,生产成本定义为发电市场为达到用户需求的供电可靠性而产生的成本,主要由竞价机组的发电成本决定;使用成本定义为用户缺电成本(停电损失),亦即由于系统电力供给不足或中断引起用户缺电、停电而造成的经济损失。电力商品的价值则是其给发电厂商和用户带来经济效益的评价。

## 2 基于价值工程的机组组合模型

### 2.1 机组运行价值概念的提出

国际上对发电系统可靠性常用系统失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和系统电量不足期望(expected energy of not supplied, EENS)2个指标衡量。通常,发电市场中的竞价机组具有经济性和可靠性双重特性。经济性是机组竞价的根本,主要由机组的发电成本(报价)决定;可靠性则是机组保证连续完成所分配发电计划出力的能力,主要受机组的故障率、维修率和爬坡速率等技术参数影响。

限于篇幅,文中仅以火电系统为例讨论机组组合模型,且假定火电厂(一个发电系统)为独立竞价单位,为延续前面叙述,仍将竞价电厂用竞价机组表示(等效竞价机组)。

为评估竞价机组的运行可靠性,笔者借鉴电力系统可靠性理论<sup>[6]</sup>系统风险度评估思想,将传统发电系统失效事件概念进行拓展以适应市场发展的需要,即发电系统失效事件重新定义为竞价机组不能提供某种出力的事件,则竞价机组提供该出力的运行概率可定义为该竞价机组运行在小于或等于该出力状态的各单独概率之和,逐步形成竞价机组容量运行概率表,进而得到竞价机组运行可靠性 $R_{UOR}$ 。

另外,从1.3节可知,电力商品具有价值工程的基本三要素,而竞价机组是提供电力的载体,相应地,它也继承了电力商品的价值工程特性,因此,文中提出竞价机组运行价值(Unit Operation Value, UOV)的概念,

以评估竞价机组的整体竞争特性,其数学表达式如下:

$$V_{UOV} = \frac{R_{UOR}}{E_{UOC}} \quad (2)$$

式中,  $V_{UOV}$  表示竞价机组的运行价值;  $R_{UOR}$  表示竞价机组的运行可靠性(即竞价机组提供一定有功出力的运行能力);  $E_{UOC}$  表示竞价机组的运行经济性,通常用竞价机组的发电报价表示。为统一各变量量纲,进行如下处理:

$$V_{UOV-i}(P_i) = \frac{R_{UOR-i}/R_{UOR-av}}{E_{UOC-i}/E_{UOC-av}} \quad (3)$$

其中:

$$R_{UOR-av} = \sum_{i=1}^n (R_{UOR-i}(P_{imax}) \times \frac{P_{imax}}{\sum_{i=1}^n P_{imax}})$$

$$E_{UOR-av} = \sum_{i=1}^n (E_{UOR-i}(P_{imax}) \times \frac{P_{imax}}{\sum_{i=1}^n P_{imax}})$$

式(3)中,  $E_{UOC-av}$  为系统内所有竞价机组最大有功出力报价的加权平均;  $R_{UOR-av}$  为系统内所有竞价机组最大有功出力运行概率的加权平均;  $V_{UOV-i}(P_i)$  表示竞价机组  $i$  承诺提供有功出力  $P_i$  时该机组的运行价值;  $i$  为竞价机组号,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为竞价机组数。

### 2.2 计及竞价机组整体特性的机组组合模型

$$\max \sum_{i=1}^n V_{UOV-i} \quad (4)$$

$$s. t. \quad \sum_{i=1}^n P_i(t) - \sum_{j=1}^m P_{L_j}(t) = 0 \quad (5)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{imax} \quad (6)$$

式(4)为系统内所有竞价机组运行价值之和最大目标函数。式(5)为系统有功功率平衡约束;式(6)为竞价机组运行约束(未计及机组启停费用和爬坡限制)。

## 3 算例分析

为验证文中机组组合模型,基于文献[6]假设一个 6 节点 3 个竞价机组(电厂)系统进行分析,各竞价机组所属机组类型均为 20 MW、30 MW 和 50 MW,具体机组类型分配如下:

1) 竞价机组 1(240 MW):  $4 \times 20 \text{ MW} + 2 \times 30 \text{ MW} + 2 \times 50 \text{ MW}$ ;

2) 竞价机组 2(350 MW):  $3 \times 20 \text{ MW} + 3 \times 30 \text{ MW} + 4 \times 50 \text{ MW}$ ;

3) 竞价机组 3(310 MW):  $2 \times 20 \text{ MW} + 4 \times 30 \text{ MW} + 3 \times 50 \text{ MW}$ 。

通常,火电厂的发电成本曲线为二次曲线,则基于发电成本的报价曲线可表示为线性曲线,因此,3 个竞

价机组的发电报价曲线分别假设为:

$$C_{01} = 0.0004P_1 + 0.14$$

$$C_{02} = 0.0003P_2 + 0.16$$

$$C_{03} = 0.0002P_3 + 0.17$$

式中,  $C_{01}$ 、 $C_{02}$  和  $C_{03}$  的单位为千元/MW·h,系统某时段有功负荷为 800 MW。设系统单位电量停电损失  $\alpha = 10$  元/kW·h,发电系统可靠性评估中电厂随机故障考虑到 2 阶。

表 1 机组故障率和 ORR

机组容量 /MW	$\lambda$ (次/年)	1 小时前导时间相应的 ORR
20	3	0.000342
30	4	0.000457
50	6	0.000684

由原始数据可直接得到系统经济性和可靠性加权平均值:  $E_{UOC-av} = 0.2459$ ;  $R_{UOR-av} = 0.995468$ ,利用它,进而得到 3 个竞价机组的运行价值如表 2 - 表 4 所示。理论上,机组运行可靠性表应包括机组全部容量的组合,但实际上为节约计算时间,常略去机组运行可靠性大于某一规定值(如:0.9999999)的全部容量运行状态而将运行可靠性表截尾,因此,文中表 2、表 3、表 4 也采取了这种处理。

表 2 竞价机组 1 的运行价值

运行容量 /MW	运行可靠性	发电报价	运行价值 /标么值
240	0.99635575	0.236	1.042878
220	0.99771923	0.228	1.080948
210	0.99863031	0.224	1.101255
200	0.99863101	0.220	1.121279
190	0.99999621	0.216	1.143604
180	0.99999641	0.212	1.165182
170	0.99999828	0.208	1.187592
160	0.99999953	0.204	1.210879
150	0.99999953	0.200	1.235097
140	1.0	0.196	1.260304

表 3 竞价机组 2 的运行价值

运行容量 /MW	运行可靠性	发电报价	运行价值 /标么值
350	0.99487873	0.265	0.927375
330	0.99589983	0.259	0.949833
320	0.99726443	0.256	0.962280
310	0.99726478	0.253	0.973691
300	0.99999003	0.250	0.988068
290	0.99999066	0.247	1.000070
280	0.99999345	0.244	1.012368
270	0.99999719	0.241	1.024974
260	0.99999719	0.238	1.037894
250	0.99999999	0.235	1.051147
240	0.99999999	0.232	1.064739
230	0.99999999	0.229	1.078688
220	1.0	0.226	1.093007

表4 竞价机组3的运行价值

运行容量 /MW	运行可靠性	发电报价	运行价值 /标么值
310	0.995 445 17	0.232	1.059 889
290	0.996 126 29	0.228	1.079 222
280	0.997 946 79	0.226	1.090 762
270	0.997 946 91	0.224	1.100 502
260	0.999 992 20	0.222	1.112 692
250	0.999 993 45	0.220	1.122 809
240	0.999 994 85	0.218	1.133 111
230	0.999 998 59	0.216	1.143 607
220	0.999 998 59	0.214	1.154 295
210	0.999 999 99	0.212	1.165 186
200	1.0	0.210	1.176 283

表5 文中模型与传统模型比较

	传统模型	新模型
竞价机组1有功出力/MW	204.176 214	0.000 0
竞价机组2有功出力/MW	285.823 835	0.000 0
竞价机组3有功出力/MW	310.000 031	0.000 0
系统总购电费用/千元	187.420 219	2.110 0
系统停电损失/千元	27.511 92	2.500 7
社会总费用/千元	214.932 121	4.610 7

说明:传统模型指以系统总购电费用最小为目标函数

从表5可以看出,传统模型仅能使系统总购电费用达到最小,不能最小化系统停电损失,以至社会总费用;而文中提出的以所有竞价机组运行价值之和最大为优化目标的新模型,不仅良好地计及了不同机组的整体特性,而且使系统总停电损失最小,达到社会总

费用最小的目标。因此,从社会角度考虑,新模型无疑是可行的,具有良好的应用前景。

## 4 结 论

文中提出了电力市场环境下机组组合的一种新模型。该模型能将竞价机组的运行经济性与可靠性良好地结合在一起,既计及了竞价新机组(存在还贷任务)运行可靠性高的特性,也考虑了竞价旧机组(无还贷任务)运行经济性好的特点,有效地使新旧机组在发电竞争中处于同一起跑线,避免了因片面追求经济效益而造成的系统可靠性降低,使系统的发电资源得到了合理的配置和利用,推动了发电企业的发展。

## 参考文献:

- [1] 文福拴, DAVID A K. 加州电力市场失败的教训[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5):1-5.
- [2] 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.
- [3] 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(5):51-56.
- [4] MILES L D. Techniques of Value Analysis and Engineering [M]. U. S. A: McGraw Hiu Text, 2nd Edition, 1972.
- [5] 李纯波. 价值工程新论[M]. 北京:北京经济学院出版社, 1991.
- [6] 周家启,任震. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社, 1984.
- [7] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2003.

## Unit Commitment fo Considering Bidding Units Integer Characteristic in Electricity Market Environment

ZHOU Ping<sup>1,2</sup>, CHEN Qi<sup>2</sup>, ZHOU Jia-qi<sup>1</sup>, MA Ling<sup>1</sup>, XU Ming<sup>3</sup>

(1. Power System Research Institute of Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Electric power Extra-Voltage Bureau, Chongqing 400030, China;

3. Department of Electrical Engineering, Chongqing College of Electric Power, Chongqing 400053, China)

**Abstract:** A novel model is on the basis of the comprehensive analysis of the operation model in generating power market, which is developed by the value engineering and the power system reliability theory. The authors try to solve the insufficiency of the unit commitment problem that didn't correspond fully unit economics and its reliability in generating power market. This model is described as an optimal plan model considering economics and reliability of units, which is the maximum of sum of operation value of the selected bidding units. The results of the model may contribute to making decision for drawing up a proper plan of generating power. Some examples show that the novel model is an efficient and convenient method.

**Key words:** electricity market; unit commitment; reliability; economics; operation value

(编辑 陈移峰)