

# 考 虑 消 除 阻 塞 的 分 段 竞 价 电 力 市 场 出 清 算 法

李林川,顾丽梅,赵森林

(天津大学 电气与自动化工程学院,天津 300072)

**摘要:** 研究了在发电侧开放的电力市场下,作为电网公司,在保证电网运行的安全性及电能质量的前提下,如何购买各发电厂的电力,使得既满足用户的需要又实现安全性和经济性。提出了一种用灵敏度方法消除阻塞的分段竞价电力市场的出清算法,先在不考虑支路过载的情况下,按各发电机的报价进行竞价,依次安排基荷、腰荷和峰荷段的出力;再选取负荷最大时刻对网络进行阻塞管理,以阻塞调整的费用最小为目标,根据各发电机相对阻塞支路的灵敏度调整各发电机的功率,根据此阻塞管理结果对整体竞价过程进行调整并考虑爬坡约束,通过优化腰、峰荷的分界点,得到考虑消除阻塞的分段竞价电力市场的各发电机出力。这种考虑消除阻塞的分段竞价电力市场的出清算法不仅满足电能生产的连续性,区分了电能质量,体现了市场公平性,而且消除了阻塞,因此其结果更具有实用价值。以 IEEE 30 节点系统为例,证明了算法的可行性。

**关键词:** 电力市场; 分段竞价; 阻塞管理; 灵敏度

**中图分类号:** TM 73;F 123.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)04-0001-05

## 0 引言

目前,世界各国的电力市场都是建立在实时电价理论基础上的,对于如何形成实时电价,如何竞价与结算,普遍采用分时竞价方式<sup>[1]</sup>,但是分时竞价电力市场有如下弊端<sup>[2-4]</sup>:发电厂商报价及系统确定运行方式比较困难;没有体现电能同质同价的公平原则,导致市场效率低下。为克服这些弊端,文献<sup>[2,5-8]</sup>提出一种分段竞价的电力市场模型,并介绍了分段竞价电力市场的运营方式规则、模型以及出清算法,这种算法便于发电商确定机组运行方式和制定报价决策,区分了电能质量,市场出清简单透明,利润分配相对合理,市场效率比分时竞价高;但这种算法并没有考虑网络约束,当网络中某些支路出现阻塞时,这种出清算法不可行。因此,在分段竞价的算法中必须考虑消除阻塞。

目前,消除阻塞的算法主要有基于灵敏度分析的调整类算法<sup>[9-11]</sup>和基于最优潮流计算的优化规划类算法<sup>[12-13]</sup>。灵敏度类算法一般是首先找到过载最严重的支路,并按发电机对此支路的灵敏度大小修正发电机的功率,直到没有支路过载达到消除阻塞的目的,灵敏度类方法计算量少,无收敛性问题。优化类算法把支路约束作为一个不等式约束加入到最优潮流<sup>[14]</sup>中,直接按最优化方法求解,由于是非线性优化问题,算法计算复杂,有收敛性问题。

现提出一种用灵敏度方法消除阻塞的分段竞价

电力市场的出清算法,先在不考虑支路过载的情况下按各发电机报价进行竞价;然后选取负荷最大时刻对网络进行阻塞管理;再根据此结果对初步竞价过程进行调整并考虑爬坡约束;最后通过优化腰、峰荷的分界点,得到考虑消除阻塞的分段竞价电力市场的各发电机出力。

## 1 不考虑消除阻塞的分段竞价市场出清算法

分段竞价是直接根据日负荷曲线安排出力,在不考虑阻塞情况下,其出清算法的基本原则有 6 点。

**a.** 分段竞价从原理上而言,段分得越多,竞争越公平,市场效率越高<sup>[2]</sup>,但段分得过细时,实际中有时无法确定某机组真正运行于哪一段,这给各个竞价成功的发电机的发电量计量造成困难。本算法提出分为 3 段,即基荷段、腰荷段和峰荷段,既可以区分一天中的电能质量,又从电能计量上可以实现,同时与常规的调度概念相近,易被接受。

**b.** 为了体现公正、公平的原则,应按照报价由低到高的顺序给各机组分配负荷,但在腰荷和峰荷段,应考虑机组的爬坡能力,当一台机组不能满足爬坡约束时,可把报价紧邻的后续机组提前一起安排,也就是说,为了解决爬坡速度问题,可以把几台机组混合安排在一起,而报价低的机组没有安排的剩余容量仍按原报价在其后的负荷安排中优先。这样既可以保证机组的爬坡约束,又体现了报价低的先上网的优先顺序。

**c.** 对于竞价某段负荷成功的所有发电机,由于

生产的电能质量一样,为保证公平,必须体现电能同质同价的原则,对于各段竞价成功的发电机,按统一出清价即竞价成功的发电机的最高报价结算,因而得到 3 个分别对应于基荷段、腰荷段、峰荷段的结算电价  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\rho_3$ 。

d. 对于承担了基本负荷的火电机组,则还可能承担腰荷,而具有技术最小出力的火电机组若在基荷段竞价失败,在初步安排时则不能参与腰荷段的竞价,当初步安排满足不了负荷需求,在市场管理员公布剩余负荷段的情况后,该机组再按断续运行情况,给出报价曲线,参与竞价。

e. 系统追求的是总购电费用最小,即基荷段、腰荷段和峰荷段购电费用累加和最小,而不是各段购电费用最小。

f. 对于水电机组,应从全局效益考虑,尽量利用水电,以降低发电成本和节约燃料,为此在文中水电不参加竞价,直接按其强迫容量、可调容量和可调电量进行日负荷曲线上的安排<sup>[8]</sup>,其价格采用相邻火电厂的结算价格。

## 2 消除阻塞的方法

根据竞价确定的各发电机组出力很可能导致传输阻塞,为保证系统的稳定性和供电可靠性,在分段竞价的电力市场环境下,也必须消除阻塞。分段竞价是对持续的负荷进行拍卖,而阻塞是针对某一时刻,严格而言,阻塞管理必须对每日各时段的阻塞进行消除,假若一日分 24 个时段,则阻塞管理需进行 24 次,这可能耗费大量的时间。考虑到阻塞一般出现在负荷较大的情况下,因此可以对一日中最大负荷时刻进行阻塞管理,调整各发电机的出力安排,使得在最大负荷方式下不出现阻塞现象;同时按此调整安排推广到整个负荷曲线上,由于其他时段的负荷都小于最大负荷,假设各节点负荷变化规律与总负荷变化规律基本一致,当最大负荷已不存在阻塞情况,可以预计其他时段也不会出现阻塞情况。为此,阻塞管理首先针对最大负荷,然后再把最大负荷时的调整结果推广到整个日负荷曲线上。

### 2.1 最大负荷时消除阻塞的算法

消除阻塞的目标函数采用购电费用增量最小:

$$\min \Delta F = \sum_{i=1}^G (C_{omll} P_{li} - C_{oml} P_{li}) = C_{omll} (P_{li} + \Delta P_i) - C_{oml} P_{li} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_L < P_{Lmax} = \sqrt{S_{ijmax}^2 - Q_{ij}^2} \quad (2)$$

式中  $C_{oml}$ 、 $C_{omll}$  分别为消除阻塞前、后的边际电价;  $P_{li}$ 、 $P_{lli}$  和  $\Delta P_i$  分别为第  $i$  台发电机消除阻塞前、后的出力以及各发电机的调整量;  $P_L$ 、 $P_{Lmax}$ 、 $S_{ijmax}$  和  $Q_{ij}$  分别为支路传输的有功功率、允许有功最大值、传输的最大视在功率和实际已传输的无功功率。

对此模型求解,采用灵敏度分析的方法,灵敏度的计算采用  $P-Q$  分解法的  $B'$  矩阵和直流潮流的计算公式。根据灵敏度数值全为正、全为负和有正有负 3 种情况,分别对发电机功率进行调整,调整时各发电机的出力以及调整量应满足:

$$P_{imin} - P_i \leq \Delta P_i \leq P_{imax} - P_i \quad i=1, 2, \dots, G \quad (3)$$

式中  $P_i$ 、 $\Delta P_i$ 、 $P_{imin}$  和  $P_{imax}$  分别为发电机的当前功率、功率增量、最小和最大功率。

为充分利用水电,在调整过程中不考虑水电机组的调整,下文中机组的灵敏度和调整量都是指火电机组,下面简述具体的调整方法。

#### 2.1.1 发电机灵敏度计算值均为负值

灵敏度为负的机组应该增加出力,减出力的为平衡机。

a. 计算出各发电机单独调整时的调整量。若过载支路的过载量为  $\Delta P_L$ ,则各发电机单独调整时的调整量为

$$\Delta P_i = -\Delta P_L / S_{L,i} \quad (4)$$

式中  $S_{L,i}$  为各机组相对于平衡机的灵敏度(平衡机的灵敏度为 0);  $i=1, 2, \dots, G$ , 且  $i$  不是电压功角平衡节点;下标  $L$  代表支路。

b. 给定一个结算价格的增量  $\Delta \rho$ ,由报价曲线计算出各机组的出力增量:  $\Delta P'_1$ 、 $\Delta P'_2$ 、 $\dots$ 、 $\Delta P'_G$  (没有平衡机和水电机组),通过修正  $\Delta \rho$ ,直到满足

$$\frac{\Delta P'_1}{\Delta P_1} + \frac{\Delta P'_2}{\Delta P_2} + \dots + \frac{\Delta P'_G}{\Delta P_G} = 1 \quad (5)$$

得出各发电机组应加的出力。这时减出力的机组即为平衡机,其减出力的多少由潮流计算决定。

#### 2.1.2 发电机组灵敏度计算值均为正值

发电机组灵敏度计算值均为正值情况下,加出力的机组即为平衡机,为了保证增加的购电费用最小,则减出力的机组应选灵敏度最大的发电机,这样调整功率的增量最小,即所增加的购电费用最小,两者是统一的。减出力的计算如下:若支路的过载量为  $\Delta P_L$ ,灵敏度最大的火电机组的灵敏度为  $S_{L,k}$ ,则该机组的减出力为

$$\Delta P_k = \Delta P_L / S_{L,k} \quad (6)$$

则该机组的出力减去  $\Delta P_k$ ,然后进行潮流计算,得出平衡机的加出力。

#### 2.1.3 发电机组灵敏度计算值有正有负

发电机组灵敏度计算值有正有负情况下,灵敏度为负机组增加出力,为保证增加的购电费用最小,减出力机组仍选灵敏度为正的最大的值的机组。这时的计算方法与 2.1.1 节情况有所区别。

a. 计算发电机单独调整时的调整量公式为

$$\Delta P_i = -\frac{\Delta P_L}{S_{L,i} - S_{L,j}} \quad (7)$$

式中  $i=1, 2, \dots, G$  为灵敏度为负的机组;  $j$  为灵敏度最大的机组。

b. 按照 2.1.1 节情况的 b 算出增加出力机组的功率增量。减出力机组  $j$  的减出力量为增出力机组的功率和。

2.2 阻塞的整体消除

通过上述阻塞管理,所求得各发电机的调整量是针对最大负荷消除阻塞的结果,为了避免相邻区域出现阻塞情况,必须把这个结果推广到日负荷的整个竞价段上,调整过程中应进行爬坡约束的检验。因为在负荷最大的时刻已经消除了阻塞,根据前述理由,调整以后在其他时刻一般也不会发生阻塞,这样可整体消除阻塞。

3 考虑消除阻塞的分段竞价电力市场算法

3.1 算法模型

3.1.1 目标函数

$$\min F=E_1\rho_1+E_2\rho_2+E_3\rho_3 \tag{8}$$

式中  $E_1、E_2、E_3$  和  $\rho_1、\rho_2、\rho_3$  分别为基荷段、腰荷段和峰荷段的发电量和结算电价; $F$  为包括水电的总购电费用。

3.1.2 约束条件

a. 竞价基荷成功的各机组的最小出力约束为

$$\sum_{i=1}^{G_1} P_{i\min} \leq P_{\min} \tag{9}$$

式中  $P_{i\min}$  为竞价基荷成功的各机组的技术最小出力; $P_{\min}$  为一天中负荷曲线的最小值; $G_1$  为竞价基荷成功机组的个数。

b. 组合进去的发电机组能带腰荷和峰荷的容量应大于系统一天中最大负荷减去最小负荷的功率。

$$\sum_{i=1}^{G_1} (P_{imax} - P_{imin}) + \sum_{j=1}^{G_2} P_j > P_{\max} - P_{\min} \tag{10}$$

式中  $P_j$  为峰荷电厂的出力; $P_{\max}$  为日负荷曲线最大值; $G_2$  为系统中峰荷电厂个数。

c. 机组功率限值约束为

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad i=1,2,\cdots,G_1+G_2 \tag{11}$$

式中  $P_{imax}、P_i、P_{imin}$  分别为各机组的功率上限、各段分配功率之和、功率下限。

d. 机组的升降功率速度约束为

$$P_{i(t)} - P_{i(t-1)} \leq \Delta P_{imax,u(t)} \quad i=1,2,\cdots,G_1+G_2 \tag{12}$$

$$P_{i(t-1)} - P_{i(t)} \leq \Delta P_{imax,d(t)} \quad i=1,2,\cdots,G_1+G_2 \tag{13}$$

式中  $P_{i(t)}、P_{i(t-1)}$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻发电机组  $i$  的发电功率; $\Delta P_{imax,u(t)}、\Delta P_{imax,d(t)}$  分别为  $t-1$  时刻至  $t$  时刻发电机组  $i$  的最大上升和下降功率,它是机组本身的升降速度和机组距上限  $P_{imax}$  和下限  $P_{imin}$  功率之中的较小者。

e. 支路功率约束为

$$P_{Li} < P_{Li,max} \quad i=1,2,\cdots,l \tag{14}$$

式中  $P_{Li}$  和  $P_{Li,max}$  分别为支路  $i$  的有功功率传输容量和限值。

3.2 计算流程

计算流程图如图 1 所示。

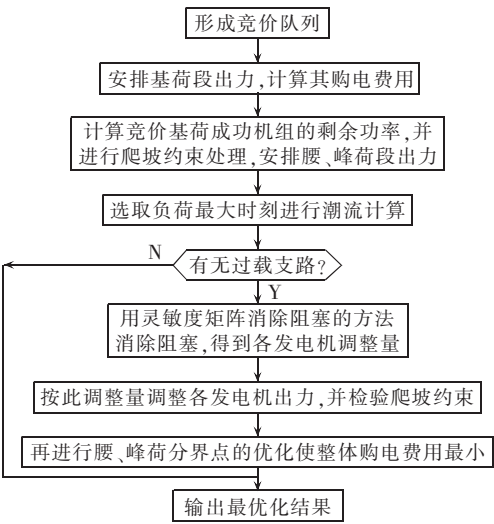


图 1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of algorithm

4 算例及其分析

4.1 原始数据

以 IEEE 30 节点系统为例,给出一天各时刻的总负荷如表 1 所示,最大负荷时各节点的负荷数据如表 2 所示,系统中有 6 台发电机,其中 1、2、8、11、13 为火电机组,其报价如表 3 所示。表中,  $P_{load}、Q_{load}$  为负荷有功、无功功率。5 号为水电机组,水电机组

表 1 系统的日负荷

Tab.1 Daily load distribution of network

| $t$<br>/h | $P_{load}$<br>/MW | $t$<br>/h | $P_{load}$<br>/MW | $t$<br>/h | $P_{load}$<br>/MW | $t$<br>/h | $P_{load}$<br>/MW |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| 0.0       | 220               | 6.0       | 220               | 12.0      | 250               | 18.0      | 263               |
| 0.5       | 215               | 6.5       | 220               | 12.5      | 247               | 18.5      | 270               |
| 1.0       | 206               | 7.0       | 224               | 13.0      | 246               | 19.0      | 280               |
| 1.5       | 199               | 7.5       | 228               | 13.5      | 245               | 19.5      | 276               |
| 2.0       | 192               | 8.0       | 232               | 14.0      | 248               | 20.0      | 273               |
| 2.5       | 185               | 8.5       | 235               | 14.5      | 250               | 20.5      | 272               |
| 3.0       | 180               | 9.0       | 240               | 15.0      | 253               | 21.0      | 270               |
| 3.5       | 182               | 9.5       | 250               | 15.5      | 248               | 21.5      | 268               |
| 4.0       | 187               | 10.0      | 252               | 16.0      | 249               | 22.0      | 259               |
| 4.5       | 195               | 10.5      | 253               | 16.5      | 255               | 22.5      | 250               |
| 5.0       | 200               | 11.0      | 254               | 17.0      | 258               | 23.0      | 240               |
| 5.5       | 205               | 11.5      | 251               | 17.5      | 260               | 23.5      | 230               |

表 2 IEEE 30 节点系统最大负荷参数

Tab.2 Peak bus loads of IEEE 30-bus system

| 节点号 | $P_{load}/MW$ | $Q_{load}/Mvar$ | 节点号 | $P_{load}/MW$ | $Q_{load}/Mvar$ |
|-----|---------------|-----------------|-----|---------------|-----------------|
| 2   | 12.00         | 7.07            | 17  | 9.00          | 5.80            |
| 3   | 32.70         | 1.20            | 18  | 3.20          | 0.90            |
| 4   | 7.60          | 1.60            | 19  | 9.50          | 3.40            |
| 5   | 50.00         | 23.58           | 20  | 2.20          | 0.70            |
| 7   | 22.80         | 10.90           | 21  | 17.50         | 11.20           |
| 8   | 47.50         | 17.50           | 23  | 3.20          | 1.60            |
| 10  | 5.80          | 2.00            | 24  | 8.70          | 6.70            |
| 12  | 11.20         | 7.50            | 26  | 3.50          | 2.30            |
| 14  | 6.20          | 1.60            | 29  | 2.40          | 0.90            |
| 15  | 8.20          | 2.50            | 30  | 10.60         | 1.90            |
| 16  | 3.50          | 1.80            |     |               |                 |

表 3 火电机组的报价  
Tab.3 Bidding prices of units

| 报价<br>段 | 机组 1  |          | 机组 2  |          | 机组 8  |          | 机组 11 |          | 机组 13 |          |
|---------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
|         | $P_i$ | $C_{oi}$ | $P_i$ | $C_{oi}$ | $P_i$ | $C_{oi}$ | $P_i$ | $C_{oi}$ | $P_i$ | $C_{oi}$ |
| 1       | 35    | 0.16     | 35    | 0.16     | 25    | 0.17     | 25    | 0.14     | 35    | 0.15     |
| 2       | 45    | 0.18     | 50    | 0.19     | 35    | 0.19     | 35    | 0.17     | 45    | 0.18     |
| 3       | 55    | 0.20     | 55    | 0.23     | 45    | 0.22     | 45    | 0.20     | 50    | 0.21     |
| 4       | 65    | 0.24     | 60    | 0.26     | 55    | 0.25     | 55    | 0.24     | 60    | 0.24     |

注: $C_{oi}$ 为报价,单位为 $10^3$ 元/(MW·h); $P_i$ 为机组出力,单位为 MW。

的强迫容量、最大可调节容量和最大可调节电量分别为 20 MW、15 MW 和 45 MW·h。火电机组的爬坡能力为 20 MW/h,1 号节点为平衡节点。

4.2 计算结果及其分析

先根据日负荷曲线安排水电机组的出力,然后根据各火电厂的报价依次安排各机组的出力,并检验发电机组升降速率约束。需要说明的是,若只按报价从低到高安排,则机组 2 将在  $t=5.5\sim 6.0$  h 时间段内承担 15 MW 的上升功率,那么机组 2 的爬坡速度应达到 30 MW/h,从而超过给定的爬坡速度 20 MW/h,按此约束确定机组 2 在该段的所能安排的容量为 10 MW,然后后续机组 8 的容量为 5 MW,它们共同承担爬坡任务。再次校验满足了升降速度约束,可得调整后的结果如表 4 所示,基荷的结算价格为  $0.17\times 10^3$  元/(MW·h),腰荷、峰荷分界点为 250 MW,腰荷的结算价格为  $0.20\times 10^3$  元/(MW·h),峰荷的结算价格为  $0.22\times 10^3$  元/(MW·h),腰荷、峰荷总费用为  $27.687\times 10^4$  元。

表 4 基荷和腰荷段机组初始竞价结果  
Tab.4 Primary bidding results of units for basic and intermediate load blocks

| 负荷 序号 | 发电机号 | 出力/MW | 负荷 序号 | 发电机号 | 出力/MW |    |   |
|-------|------|-------|-------|------|-------|----|---|
| 基荷段   | 1    | 5     | 20    | 10   | 2     | 10 |   |
|       | 2    | 11    | 30    | 11   | 8     | 5  |   |
|       | 3    | 13    | 35    | 腰荷段  | 12    | 2  | 5 |
|       | 4    | 1     | 35    | 13   | 8     | 5  |   |
|       | 5    | 2     | 35    | 14   | 1     | 10 |   |
|       | 6    | 8     | 25    | 15   | 11    | 10 |   |
| 腰荷段   | 7    | 11    | 5     | 峰荷段  | 16    | 13 | 5 |
|       | 8    | 1     | 10    | 17   | 5     | 15 |   |
|       | 9    | 13    | 10    | 18   | 8     | 10 |   |

根据表 4 的安排,可得最大负荷时各发电机的出力如表 5 所示,然后根据各电厂的出力进行潮流计算,计算出各支路的潮流越限如表 6 所示。

表 5 最大负荷时刻各机组的有功出力  
Tab.5 Active power outputs of units at peak load

| 发电机号 | 出力/MW | 发电机号 | 出力/MW |
|------|-------|------|-------|
| 1    | 55    | 8    | 45    |
| 2    | 50    | 11   | 45    |
| 5    | 35    | 13   | 50    |

由表 6 可看出,越限支路最大的支路为 9-10,各机组对支路 9-10 的灵敏度如表 7 所示。

表 6 最大负荷时支路潮流越限情况  
Tab.6 Power flow violations of branches at peak load

| 支路   | 有功功率    | 功率限值 | 越限量    |
|------|---------|------|--------|
| 2-6  | 22.0171 | 20   | 2.0171 |
| 9-10 | 37.7767 | 35   | 2.7767 |

表 7 第 1 次运算时各机组灵敏度及调整量  
Tab.7 Sensitivities and adjustments of units for first calculation

| 发电机号 | 灵敏度/p.u.   | 机组调整量/MW   |
|------|------------|------------|
| 1    | 0          | 0          |
| 2    | -0.004 205 | 0.881 436  |
| 8    | -0.024 846 | 2.350 260  |
| 11   | 0.383 631  | -5.581 960 |
| 13   | -0.243 245 | 2.350 260  |

各机组的灵敏度有正有负,所有灵敏度为负的机组 2、8、13 应当加出力,机组 11 应当减出力,加、减出力值也如表 7 第 3 列所示。再根据各发电机的调整量调整各机组的出力,调用潮流计算程序,计算出平衡机的出力。然后重新找出过载最严重的支路,逐步消除阻塞。这样经过 2 次迭代之后,当过载支路的越限量已小于 0.00001 时,计算结束,得到最大时刻各机组的有功出力如表 8 所示。

表 8 最大负荷时阻塞调整后各机组的出力  
Tab.8 Outputs of units after congestion adjustment at peak load

| 发电机号 | 出力/MW | 发电机号 | 出力/MW |
|------|-------|------|-------|
| 1    | 55.00 | 8    | 49.79 |
| 2    | 44.17 | 11   | 41.25 |
| 5    | 35.00 | 13   | 54.79 |

根据最大负荷时刻的出力重新调整各机组在基荷、腰荷和峰荷段的出力,并检验各机组的爬坡约束,得到各机组的在各段的出力安排并进行腰、峰荷分界点的优化,结果如表 9 所示,此时腰荷的结算价格为  $0.20\times 10^3$  元/(MW·h),峰荷的结算价格为  $0.25\times 10^3$  元/(MW·h),腰、峰荷的总费用为  $28.617\times 10^4$  元。

表 9 调整后各段出力的安排  
Tab.9 Outputs of units for different blocks after congestion adjustment

| 负荷 序号 | 发电机号 | 出力/MW | 负荷 序号 | 发电机号 | 出力/MW |      |      |
|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 基荷段   | 1    | 5     | 20    | 10   | 2     | 9.17 |      |
|       | 2    | 11    | 30    | 腰荷段  | 11    | 8    | 10   |
|       | 3    | 13    | 35    |      | 12    | 1    | 10   |
|       | 4    | 1     | 35    |      | 13    | 11   | 6.25 |
|       | 5    | 2     | 35    |      | 峰荷段   | 14   | 13   |
|       | 6    | 8     | 25    | 15   |       | 8    | 10   |
| 腰荷段   | 7    | 11    | 5     | 16   |       | 5    | 15   |
|       | 8    | 1     | 10    | 17   |       | 8    | 4.97 |
|       | 9    | 13    | 10    | 18   |       | 13   | 4.97 |

从计算结果可以看出,调整前后的分界点位置变化了,这是因为各发电机的出力发生了变化,调整后的费用增加了,这与实际情况相符合。

## 5 结论

所提出的消除阻塞的分段竞价电力市场的出清算法,不仅降低了购电费用,满足了电能生产的连续性,区分了电能质量,体现了市场公平性,而且考虑了阻塞的消除,使得计算结果具有实用价值。算例证明该算法是可行的。

## 参考文献:

- [1] ELMAGHRABY W J, OREN S S. The efficiency of multi-unit electricity auctions[J]. The Energy Journal, 1999, 20(4): 89-116.
- [2] 王锡凡. 分段竞价的电力市场 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 1-6.  
WANG Xi-fan. Block bidding model based power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 1-6.
- [3] GALIAMA M F, FINK L. Power system restructuring: engineering and economics[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [4] SINGH H, HAO Shang-you, PAPALEXOPOULOS A. Transmission congestion management in competitive electricity markets [J]. IEEE Trans on Power System, 1998, 13(2): 21-25.
- [5] 王锡凡, 耿建. 分段竞价与分时竞价的比较[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 22-26.  
WANG Xi-fan, GENG Jian. Comparisons between hourly bidding and block bidding rules[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 22-26.
- [6] 耿建, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 分段竞价电力市场的运营方式、规则和模型[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 599-603.  
GENG Jian, WANG Xi-fan, CHEN Hao-yong, et al. Market operation model, rules and models for block bidding power market[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 599-603.
- [7] 耿建, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 分段竞价电力市场的模拟、分析和比较[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(10): 1043-1047.  
GENG Jian, WANG Xi-fan, CHEN Hao-yong, et al. Simulation, analysis and comparison of block bidding power market [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(10): 1043-1047.
- [8] 肖鸣, 李林川, 孙伟, 等. 分段竞价电力市场的出清算法实现[J].

电力系统自动化, 2003, 27(23): 12-16.

- XIAO Ming, LI Lin-chuan, SUN Wei, et al. Realization of the clearing price calculation algorithm in block bidding electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 12-16.
- [9] 邓佑满, 黎辉, 张伯明, 等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 5-8.  
DENG You-man, LI Hui, ZHANG Bo-ming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.
- [10] 李林川, 茅波, 刘侠, 等. 基于统一边际电价结算的电力市场下考虑消除阻塞费用最小的竞价算法[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 40-44.  
LI Lin-chuan, MAO Bo, LIU Xia, et al. A unified marginal price settlement based bidding algorithm with minimum cost of eliminating congestion in electricity market [J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 40-44.
- [11] 王秀丽, 甘志, 王锡凡. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13.  
WANG Xiu-li, GAN Zhi, WANG Xi-fan. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 10-13.
- [12] WILLIAM H. Contract networks for electric power transmission [J]. Journal of Regulatory Economics, 1992, 4(9): 211-242.
- [13] DAVID A K. Dispatch methodologies for open access transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 46-53.
- [14] SCHWEPPE F C, CARAMANIS M C, TABORS R D, et al. Spot price of electricity [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1988.

(责任编辑: 李育燕)

## 作者简介:

李林川(1948-), 男, 陕西米脂人, 教授, 主要研究方向为电力系统优化和人工智能技术在电力系统中的应用及电力市场(E-mail: li\_linchuan@263.net);

顾丽梅(1982-), 女, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化及电力市场(E-mail: tippi222@126.com)。

## Electricity market clearing algorithm considering congestion elimination based on block bidding model

LI Lin-chuan, GU Li-mei, ZHAO Sen-lin

(School of Electrical Engineering and Automation,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In the electricity market with opened generation side, how to purchase electricity from power plants with minimal cost while satisfying security, economy and user requirements is studied for power grid company. A clearing algorithm based on the block bidding model is presented, which uses the sensitivity method to eliminate congestion. The basic load blocks, intermediate load blocks and peak load blocks of all generators are sorted in order first according to their bids without considering the congestion. The congestion management is then carried out for the maximum load while keeping the adjustment cost minimal. The active power of each unit is adjusted according to their sensitivity to the overload line, and the whole bidding is thus adjusted by the results of congestion management considering constraints. The output of each unit is then determined by optimizing the dividing point between intermediate load block and peak load block. The proposed algorithm satisfies product continuity, distinguishes power quality, shows market justice, and eliminates congestion, with more realistic value. The calculation on IEEE 30-bus system shows its feasibility.

**Key words:** electricity market; block bidding; congestion management; sensitivity