

文章编号:1000-582X(2009)03-0273-06

## 撮合交易机制下的阻塞管理模型与算法

张 谦<sup>1</sup>, 俞集辉<sup>1</sup>, 李春燕<sup>1</sup>, 张森林<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:**针对撮合交易运行规则的电力市场,建立了撮合交易机制下的阻塞管理模型。该模型以安全再调度调整购电费用最小为目标函数,以各发电机组对过载支路的灵敏度和功率修正量组成约束条件,利用拉格朗日乘子和松弛因子建立增广目标函数,把有约束非线性规划问题转化为无约束非线性规划问题。在求解方法上采用了拉格朗日求极值的方法。通过 6 节点系统分析计算,验证了所提算法的正确性和有效性。

**关键词:**电力市场;撮合交易机制;结算方式;阻塞管理

中图分类号:TM732

文献标志码:A

### Model and algorithm of transmission congestion management based on matchmaking tradeoff competition mechanism settlement

ZHANG Qian<sup>1</sup>, YU Ji-hui<sup>1</sup>, LI Chun-yan<sup>1</sup>, ZHANG Sen-lin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

**Abstract:** A new congestion management model based on high-low settlement is proposed for the electricity market. The model combines the transaction mechanism and congestion management to eliminate congestion in branches with the minimum equivalent increase in the system regulating fee. The equality constraints are the branch overloads, the generator sensitivities, and the corresponding adjustments, respectively. By introducing the Lagrange multiplier and a relaxation factor, the nonlinear programming problem with constraints can be translated into an unconstrained nonlinear programming problem. The regulating values of the generators thus can be obtained. The proposed algorithm is verified by a 6-bus system.

**Key words:** electricity market; high-low match mechanism; settlement; congestion management

随着输电网络市场化改革的不断深入,市场参与者将系统运行点推向稳定边界的可能性越来越大,因此易导致网络的阻塞及系统的不稳定性。尤其在中国电网网架相对较弱和负荷较重的情况下,

系统的安全性问题将变得更加突出。在传统的垂直管理模式下,当电网发生阻塞时往往由调度中心依据一定的原则进行自主调度。在电力市场条件下,为保证各电厂的公平竞争,必须按照各电厂的竞价

收稿日期:2008-10-09

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2006BB3213)

作者简介:张谦(1980-),女,重庆大学博士研究生,主要从事电力市场、电力工程与优化技术的研究。

俞集辉(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)yujihui@cqu.edu.cn。

曲线合理分配各电厂的发电功率。但是根据竞价确定的各发电机组出力很可能导致传输阻塞(线路或者变压器过负荷)。为了保证系统安全运行,必须消除这种阻塞情况。阻塞管理的目标一般是阻塞管理的费用最小,不同的竞价机制其结算规则不同,则必然导致阻塞管理的费用不同。因此,只有使竞价机制与阻塞管理相结合,所得结果才具有实用价值。

在电力市场竞价中,目前主要有 3 种结算方法,一种是按统一的边际价格结算方式,即 MCP 结算方式;一种是按照发电企业的实际报价进行结算,即 PAB 结算方式;还有一种是按照卖方报价和买方报价的平均值进行结算,即基于撮合交易机制的结算方式。目前,这 3 种结算方式在电力市场中都存在,其中,撮合交易机制的结算方式已在华东和南方电力市场的设计中得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。

按照统一边际电价结算、按照实际报价结算,以及基于撮合交易机制的结算,是 3 种完全不同的结算方法,导致了总的购电费用不同。文献[5-6]研究了按统一边际价格结算的电力市场下考虑消除阻塞费用最小的竞价算法。文献[7]提出了在电力市场下按实际报价结算时以购电费用最小来消除阻塞的竞价算法。目前,大多阻塞管理的研究都是针对前两种结算方式下的电力市场进行的<sup>[8-12]</sup>,而对于撮合交易机制下进行阻塞管理的研究还比较少。基于此,笔者在研究竞价规则的基础上,以安全再调度调整购电费用最小为目标函数,以各发电机组对过载支路的灵敏度和功率修正量组成约束条件,提出了撮合交易机制下消除阻塞的模型与算法。在研究交易机制时,讨论的是省内交易,故对撮合交易机制的交易规则进行了一定的简化,不考虑购、售电方所在两省间的省间输电价格,简化结果不影响该机制下建立的阻塞管理模型。

## 1 交易机制和竞价算法

### 1.1 撮合交易机制的基本原理

撮合交易机制是按照“高低匹配”的原则<sup>[13-15]</sup>,首先撮合优先级最高的买家和卖家的交易,交易的成交价格为卖方报价和买方报价的平均值,然后撮合优先级次高的市场成员的交易,以此类推。具体的无约束交易计算方法如下。

1) 计算所有购、售电方之间每笔申报价折算后的价差,计算公式为

$$p_d = p_p - p_s, \quad (1)$$

式中: $p_d$  为价差; $p_p$  为购电方的原始申报价格; $p_s$

为售电方的原始申报价格。

2) 按价差从大到小排序。价差小于零的不能成交,不参与排序。

3) 按照排序从价差最大的一笔交易开始,计算购、售双方每笔交易的成交电量和电价,成交电价为售电方原始申报价格与购电方原始申报价格的算术平均值,即

$$p_b = \frac{p_s + p_p}{2}. \quad (2)$$

4) 按照价差排序计算下一笔的成交价格 and 成交量。如果同一组价、量在不同笔交易中同时出现,则应从该组的待成交量中先扣减该笔之前已成交部分的电量,再成交;如果某一组价、量的待成交量为零,则该组价、量成交完毕。

5) 价差相同时,环保机组优先成交;如环保情况也相同,则同省(区)购、售电方优先成交;如环保情况相同且购、售电方所在省(区)情况也相同,则按待成交电量的比例分配。

高低匹配的撮合过程使得交易量可达到市场均衡时所能成交的最大量,且每单位交易量都尽可能分配给效用最大的交易双方<sup>[1]</sup>。

### 1.2 竞价算法

电力市场运行规则规定注册机组报价必须包括多个容量段,每个容量段对应一个段价格和段容量,每一段容量必须非负且每一交易时段的段容量之和等于该机组的注册容量,即机组出力上限。机组报价在一个段到下一个段的价格必须单调增加。

#### 1.2.1 目标函数

按撮合交易机制结算的目标函数为

$$\min F = \min \sum_{i=1}^N p_{bi} q_i, \quad (3)$$

其中, $p_{bi} = \frac{p_{si} + p_{pi}}{2}$ 。

式中: $i$  为机组序列, $I=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为机组总数; $p_{bi}$  为机组  $i$  出力为  $q_i$  时的结算价格, $q_i$  为第  $i$  个发电机组(或者发电公司)竞价获得的发电量,在单位时间内即为发电功率; $p_{pi}$  为第  $i$  个购电方的原始申报价格; $p_{si}$  第  $i$  个发电机组(或者发电公司)的原始申报价格。

#### 1.2.2 约束条件

1) 由于电力系统从生产到使用的发、输、配、用四大环节是同时完成的,因此要受到系统平衡的约束:

$$\sum_{i=1}^N q_i - q_t = 0, \quad (4)$$

式中  $q_t$  为电网总负荷功率(各节点负荷之和)。

2) 机组功率限制约束:

$$q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

式中  $q_{i\min}$ 、 $q_{i\max}$  分别为机组功率的上下限。

3) 发电机组升降功率速度约束:

$$\left. \begin{aligned} q_i(t) - q_i(t-1) &\leq \Delta q_{i,\max,u}(t), \\ q_i(t-1) - q_i(t) &\leq \Delta q_{i,\max,d}(t), \\ i &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $q_i(t)$ 、 $\Delta q_{i,\max,u}(t)$ 、 $\Delta q_{i,\max,d}(t)$  分别是发电机组在  $t$  时段的发电功率、最大上升功率和最大下降功率。

## 2 阻塞管理的数学模型

电力市场中阻塞管理主要有两类目标:一是以发电机的出力及负荷的调整容量总和最少为目标;二是以发电机的出力及负荷的调整费用总和最少为目标<sup>[13-16]</sup>。笔者着重研究以调整费用最小为目标建立阻塞管理模型。

### 2.1 目标函数

在电力市场中,当检测到线路发生阻塞或者运行点越出系统安全域时,在线计算机系统将计算输出发电机组出力的调整量以消除阻塞和保证系统的安全运行。一般输出的再调度将会增加系统的购电费用。以安全再调度调整购电费用增量最小为目标函数的系统再调度模型为

$$\begin{aligned} \min \Delta F &= \min \sum_{i=1}^N (p'_{bi} q'_i - p_{bi} q_i) = \\ &= \min \sum_{i=1}^N \{ p'_{bi} (q_i + \Delta q_i) - p_{bi} q_i \}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $q'_i$ 、 $\Delta q_i$  分别为机组  $i$  调整后的发电机出力和出力增量;  $p'_{bi}$  机组  $i$  出力为  $q'_i$  时的结算价格。

由于  $p_{bi} q_i$  为定值,故式(7)可以简化为

$$\begin{aligned} \min \Delta F' &= \min \sum_{i=1}^N p'_{bi} q'_i = \\ &= \min \sum_{i=1}^N p'_{bi} (q_i + \Delta q_i). \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.2 约束条件

$$\sum_{i=1}^N \beta_i \Delta q_i = 0, \quad (9)$$

$$\Delta L_{k,\min} \leq \mathbf{A}_k \Delta \mathbf{q} \leq \Delta L_{k,\max}, \quad (10)$$

$$\mathbf{q}_{\min} - \mathbf{q} \leq \Delta \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max} - \mathbf{q}. \quad (11)$$

式中:  $\beta_i$  为对应机组的网损修正系数,不考虑网损变化时  $\beta = 1$ ;  $k$  为输电线路数;  $\mathbf{q}$  为有功功率组成的列向量;  $\Delta \mathbf{q}$  为有功增量组成的列向量;  $\mathbf{q}_{\min}$ 、 $\mathbf{q}_{\max}$  分

别为机组有功功率最大限值和最小限值组成的列向量;  $\mathbf{A}_k$  为支路对机组的灵敏度矩阵;  $\Delta L_{k,\min}$ 、 $\Delta L_{k,\max}$  分别为支路调整量的最大限值和最小限值。

## 3 模型求解

在上述阻塞管理模型中,由于  $p'_{bi}$  的值与各个发电机组的有功出力增量有关,在有功出力增量未算出来以前,它是不确定的,又由于希望目标函数最小,这又反过来影响各个发电机组的有功出力的增量,所以这个模型的目标函数是非线性的,因而使用非线性方法求解。

采用非线性规划方法求解的基本思想是利用拉格朗日乘子和松弛因子建立增广目标函数,把有约束非线性规划问题转化为无约束非线性规划问题,然后利用拉格朗日求极值的方法求解。

将目标函数式和约束条件一起写成拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L &= \Delta F' - \lambda \sum_{i=1}^N \beta_i \Delta q_i - \lambda_1 (\mathbf{A}_k \Delta \mathbf{q} - \Delta L_{k,\max} + \mathbf{S}_1^+) - \\ &= \lambda'_1 (\mathbf{A}_k \Delta \mathbf{q} - \Delta L_{k,\min} - \mathbf{S}_1^-) - \lambda_2 (\Delta \mathbf{P} + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{\max} + \\ &= \mathbf{S}_2^+) - \lambda'_2 (\Delta \mathbf{P} + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{\min} - \mathbf{S}_2^-), \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为拉格朗日乘子,  $\lambda_1$ 、 $\lambda'_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda'_2$  分别为拉格朗日乘子组成的向量;  $\mathbf{S}_1^+$ 、 $\mathbf{S}_1^-$  分别为引入不等式(10)的松弛因子列向量;  $\mathbf{S}_2^+$ 、 $\mathbf{S}_2^-$  分别为引入不等式(11)的松弛因子列向量。这里,引入不等式的各松弛因子均大于等于0。

对拉格朗日函数求极值得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \Delta q_i} &= p'_{bi} - \lambda \beta_i - \lambda_{1i} - \lambda'_{1i} - \lambda_2 - \lambda'_2 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \sum_{i=1}^N \beta_i \Delta q_i = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_{1i}} &= A_{k,i} \Delta q_i - \Delta L_{k,\max} + S_{1i}^+ = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda'_{1i}} &= A_{k,i} \Delta q_i - \Delta L_{k,\min} - S_{1i}^- = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_{2i}} &= \Delta q_i + q_i - q_{i\max} + S_{2i}^+ = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda'_{2i}} &= \Delta q_i + q_i - q_{i\min} - S_{2i}^- = 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

此方程组为一个线性方程组,可以通过求解此线性方程组得出  $\Delta \mathbf{q}$ 。

## 4 算法流程

算法流程如图1所示。

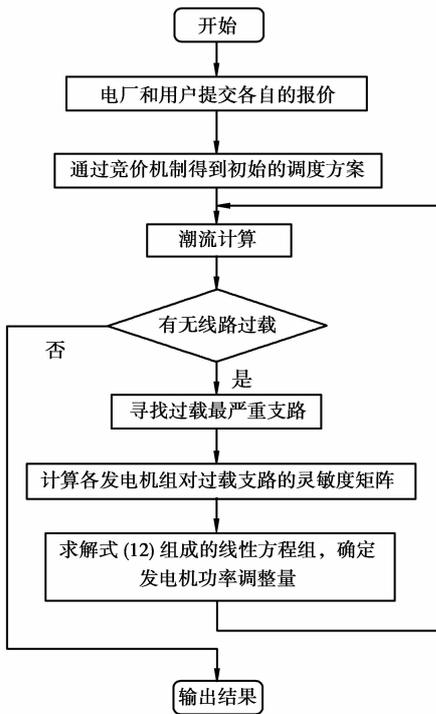


图 1 算法流程

### 5 算例及其分析

笔者以图 2 所示的 6 节点系统为例。变压器和线路参数见表 1, 负荷参数报价见表 2。在计算中使用标么值, 基准功率为 100 MV·A。5 号节点为平衡机节点。

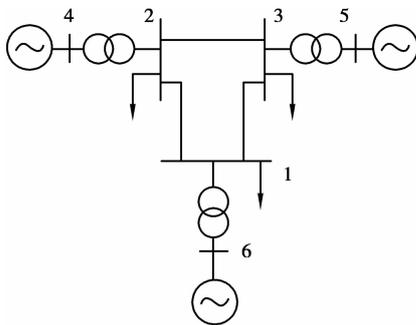


图 2 6 节点系统图

表 1 6 节点系统变压器和线路参数

支路号	首末端节点号	支路电阻	支路电抗	变比
1	1-2	0.082 05	0.192 07	0
2	1-3	0.037 00	0.084 50	0
3	1-6	0.059 03	0.213 04	1.03

续表 1

支路号	首末端节点号	支路电阻	支路电抗	变比
4	2-3	0.054 03	0.223 04	0
5	2-4	0.019 38	0.059 17	1.03
6	3-5	0.056 95	0.173 88	1.03

表 2 6 节点系统的负荷报价参数

节点号	负荷有功	负荷无功	$p_{pi} / (\text{千元}(\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$
1	-3.30	-1.20	0.23
2	-2.30	-1.00	0.25
3	-1.70	-0.60	0.26

各发电机报价如表 3 所示。

表 3 6 节点系统各发电机报价参数

$i$	报价段数	$q_i$	$p_{si} / (\text{千元}(\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$
4	$q_{\min}$	0.50	0.16
	1	1.00	0.16
	2	1.50	0.17
	3	2.00	0.21
5	$q_{\min}$	0.50	0.18
	1	1.50	0.18
	2	2.00	0.20
	3	2.50	0.21
6	$q_{\min}$	0.50	0.17
	1	1.00	0.17
	2	2.00	0.19
	3	2.50	0.22
6	$q_{\min}$	0.50	0.17
	1	1.00	0.17
	2	2.00	0.19
	3	2.50	0.22
6	$q_{\min}$	0.50	0.17
	1	1.00	0.17
	2	2.00	0.19
	3	2.50	0.22
6	$q_{\min}$	0.50	0.17
	1	1.00	0.17
	2	2.00	0.19
	3	2.50	0.22

由机组报价参数可得各机组的报价曲线如图 3 所示。

按照“高低匹配”的原则, 可得到无约束情况下的调度方案; 然后根据约束条件得到有约束情况下的调度方案; 根据上述初始方案, 进行潮流计算, 找

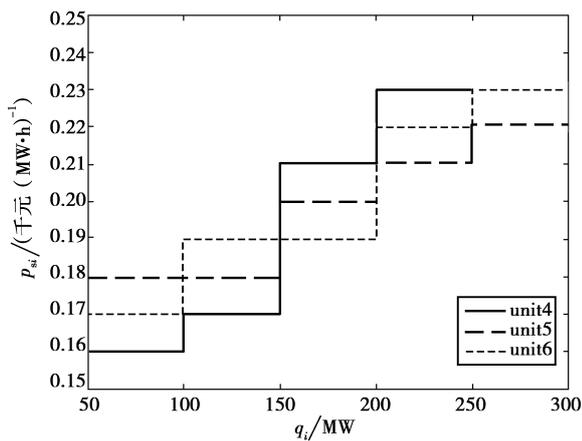


图 3 各发电机报价曲线

出发生阻塞的路径;以文中提出的调整购电费用增量最小为目标的算法进行计算,最后得到调整前后各支路功率变化情况、各发电机有功功率和结算价格如表 4、5 所示。

表 4 调整前后支路功率变化情况

支路	首末端 节点号	调整前	调整后	有功限值
		支路有功	支路有功	
1	1-2	0.272 5	0.135 0	0.28
2	1-3	-0.772 5	-0.462 5	0.60
3	1-6	-2.800 0	-2.972 5	3.00
4	2-3	-0.527 5	-0.291 6	0.40
5	2-4	-1.500 0	-1.873 4	2.50
6	3-5	-3.000 0	-2.454 1	3.00

表 5 调整前后各机组功率和结算价格

i	q_i		p_si / (千元 (MW·h)^-1)	
	调整前	调整后	调整前	调整后
4	1.500 0	1.873 4	0.215	0.235
			0.240	0.230*
5	3.000 0	2.454 1	0.235*	0.230
			0.225*	0.220*
6	2.800 0	2.972 5	0.230	0.230

说明: \* 表示一个发电机组可能与多个负荷相匹配,故其最终结算价格也相应有多多个价格。

由表 4 可知,调整前,有 2 条支路发生了阻塞,即支路 1-3 和支路 2-3。要消除支路 1-3 的阻塞,则应增加 6 号发电机的发电量或者减少 5 号发

电机的发电量。由报价曲线可知,6 号发电机在 250~300 MW 之间的价格较高,故调整时,应尽量减少 6 号发电机的发电量,5 号发电机的报价较低,通过减少 5 号发电机组的发电量来消除支路 1-3 的阻塞,在消除阻塞的同时,还可减少购电费用。在消除支路 2-3 的阻塞时则应增加 4 号机组的发电量或者减少 5 号机组的发电量。由于在考虑消除支路 1-3 的阻塞时已经减少了 5 号发电机的发电容量,故为了保证功率平衡,此时应适当增加 4 号发电机的发电容量。由表 5 可知,通过文中提出的方法得到的调整结果和笔者分析的结果是一致的。

由表 5 可以得出,由于消除阻塞而增加的总购电费用为  $\Delta F = 168.42 - 166.75 = 1.67$  (千元)。

## 6 结 语

笔者在研究竞价机制的基础上,针对撮合交易运行规则的电力市场,提出了基于撮合交易机制结算的阻塞管理模型,所得结果具有实用价值。该模型以安全再调度调整购电费用最小为目标函数,以各发电机组对过载最严重支路的灵敏度和功率修正量组成约束条件,利用拉格朗日乘子和松弛因子建立增广目标函数,把有约束非线性规划问题转化为无约束非线性规划问题。最后,通过 6 节点算例结果验证了文中方法的有效性。

### 参考文献:

[1] 朱峰,杨立兵,范斌,等. 华东电力市场建设和模拟运行[J]. 华东电力,2004,32(9): 1-6.  
 ZHU FENG, YANG LI-BING, FAN BIN, et al. Development and simulative operation of East China power market [J]. East China Electric Power, 2004, 32 (9): 1-6.  
 [2] ZHU F, YANG L B, FAN B, et al. East China power market development and trial operation [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco, California, USA. [S. l.]: IEEE inc., 2005: 2882-2889.  
 [3] 张森林. 南方电力市场建设和模拟运行[J]. 电网技术, 2008,32(10):28-32.  
 ZHANG SEN-LIN. Construction and simulative operation of south china electricity market [J]. Power System Technology, 2008,32(10):28-32.  
 [4] 张森林. 区域电力市场交易电量结算模式的实用化研究[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 56-61.  
 ZHANG SEN-LIN. Practical research on settlement mode of transacted electricity quantity in regional

- electricity market [J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 56-61.
- [5] 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.
- [6] 李林川, 黄海浪, 李俊元, 等. 基于统一边际价格结算的用线性规划法消除阻塞的算法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 47-51.  
LI LIN-CHUAN, HUANG HAI-LANG, LI JUN-YUAN, et al. Algorithm of eliminating congestion by linear programming technique based on uniform marginal price settlement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 47-51.
- [7] 李林川, 茅波, 郝建军, 等. 基于实际报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(12): 57-61.  
LI LIN-CHUAN, MAO BO, HAO JIAN-JUN, et al. A practical quoted price settlement based bidding algorithm with minimum cost of eliminating congestion in electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 57-61.
- [8] CHOMPOO-INWAI C, YINGVIVATANA PONG C, FUANGFOO P, et al. Transmission congestion management during transition period of electricity deregulation in Thailand[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1483-1490.
- [9] KUMAR A, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. Congestion management in competitive power market: a bibliographical survey[J]. Electric Power System Research, 2005, 76 (1/3): 153-164.
- [10] LIU M H, GROSS G. Framework for the design and analysis of congestion revenue rights[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 243-251.
- [11] KUMARA A, SRIVASTAVAB S C, SINGH S N. A zonal congestion management approach using ac transmission congestion distribution factors[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(1): 85-93.
- [12] 李林川, 顾丽梅, 赵森林. 考虑消除阻塞的分段竞价电力市场出清算法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 1-5.  
LI LIN-CHUAN, GU LI-MEI, ZHAO SEN-LIN. Electricity market clearing algorithm considering congestion elimination based on block bidding model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 1-5.
- [13] TALUKDAR B K, SINHA A K, MUKHOPADHYAY S, et al. A computationally simple method for cost-efficient generation rescheduling and load shedding for congestion management[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(5/6): 379-388.
- [14] HAMOUD G, BRADLEY I. Assessment of transmission congestion cost and locational marginal pricing in a competitive electricity market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (2) : 769-775.
- [15] 李春燕, 俞集辉, 张谦. 基于潮流影响系数的输电阻塞管理[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3): 31-35.  
LI CHUN-YAN, YU JI-HUI, ZHANG QIAN. Transmission congestion management based on power influence coefficient[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30 (3): 31-35.
- [16] KUMAR A, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A zonal congestion management approach using real and reactive power rescheduling[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19 (1): 554-562.

(编辑 张 苹)