

文章编号:1000-582X(2009)12-1461-05

## 计及输电阻塞的发电公司最优竞价模型

张 谦, 俞集辉, 李春燕

(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)

**摘 要:**为了实现电力市场环境下发电公司最优竞价,根据对市场内其他机组报价系数的预测,建立计及竞争对手报价的发电公司竞价模型,求取未计及输电容量约束时的最优竞价系数。建立市场出清模型,计算各机组出力期望值,根据上述期望值进行潮流计算。当预测有输电阻塞发生时,将输电阻塞对电力公司竞价策略的影响引入竞价模型中,并基于灵敏度分析以阻塞费用最小为目标确定发电公司出力调整量。通过 Matlab 仿真分析表明,采取上述方法得到的最优竞价系数进行报价时,能实现发电公司利润最大化的目标。

**关键词:**发电公司;竞价模型;输电网络计算;输电阻塞;灵敏度分析

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

## Optimal bidding models of power plants considering transmission congestion

ZHANG Qian, YU Ji-hui, LI Chun-yan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** In order to achieve optimal bidding strategy of power plants in electricity market, the authors build optimal bidding model by predicting the bidding coefficients of competitors, and the optimal bidding coefficient without considering transmission capacity is achieved. Based on the bidding coefficients, the market clearing model is built, and the expected market clearing price is achieved. According to the expected values, the authors calculate the power flow. When forecasting the transmission congestion, this paper presents an optimal bidding model taking transmission congestion into account. Based on sensitivity analysis, the output regulation of power plants with minimum cost of eliminating congestion is achieved. Simulation results demonstrate that the proposed method can help power plants achieve the optimal profit.

**Key words:** power plants; bidding model; transmission network calculations; transmission congestion; sensitivity analysis

随着电力市场改革的推进,如何建立最优的竞价策略已经成为各个发电公司最为关心的问题。因此,电力市场环境下,发电公司的最优竞价策略已成

为近几年来国内外研究热点之一。文献[1]对此做了比较详细的综述。目前,对发电公司竞价策略的研究成果已有很多,大体可以分为 3 个方面:(1)基

收稿日期:2009-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777067)

作者简介:张 谦(1980-),女,重庆大学讲师,博士研究生,主要从事电力市场、电力工程与优化技术方向研究,  
(E-mail)zhangq411@163.com。

于博弈论的方法。从博弈论的角度,可分为完全信息下和不完全信息下的发电公司最优竞价策略。文献[2-4]在完全信息条件下,采用静态博弈的方法分析市场的纳什均衡点,从而获得发电公司的最优竞价策略。文献[5-8]在不完全信息条件下,采用预期市场出清价和贝叶斯博弈结合的方法,对发电公司竞价策略进行研究。文献[9]在此基础上,分析了机组利润、上网电量与竞价系数之间的相互联系,得出单机机组的竞价策略和组合竞价策略。(2)基于概率论的方法。文献[10-12]采用概率论分析发电竞价与市场出清价之间的大小关系,得出发电公司竞价成功或竞价失败的概率,并构建基于博弈论和概率论相结合的发电机组竞价模型和求解算法,从而得出最优竞价策略。(3)基于最优化的方法<sup>[13-14]</sup>。最优化方法考虑机组特性以及网络特性来研究竞价策略,是与传统经济调度联系最为紧密的方法,也是最容易被接受的方法之一。但是,由于该方法考虑的因素多且复杂,大多数文献都只是把输电阻塞作为一个限制条件进行研究,或者是在竞价过程中忽略了输电阻塞的影响。但在某些情况下,输电阻塞会起到分割市场的作用,形成 2 个甚至多个子市场,明显改变发电公司在电力市场中所处的竞争位置<sup>[15-16]</sup>。文献[17]和[18]论证了输电阻塞起到分割市场的作用,但没有详细说明如何得到阻塞情况下发电公司的最优竞价系数。基于此,本文将发电机组的最优售电策略分为 3 步进行:一是在不完全信息的市场环境下,根据对市场内其他机组的竞价系数的估计,建立市场出清模型,计算市场出清价的期望值;二是建立计及竞争对手竞价的发电公司竞价模型,求取考虑竞争对手竞价的发电公司竞价系数。三是通过对输电阻塞的预测,计算考虑输电阻塞后发电公司竞价策略的调整系数,得到阻塞情况下发电公司的最优竞价系数。

## 1 市场背景

本文以单一购电市场运营模式为背景,在该模式下,多个卖方(发电公司)竞争售电给单一购买者(电网经营企业)。电力交易与调度中心负责发电市场的运营管理和电力系统的调度运行。现货市场按交易日运作。要求发电公司提前上报交易日内 48 个交易时段的可供电量和报价。假设市场规则要求发电机组的报价函数为线性函数,单一购买者(电网经营企业)根据预测的系统负荷优先安排报价低的发电公司上网发电,并采用统一市场出清价结算。

## 2 数学模型

### 2.1 发电上网出清价计算模型

为便于描述,假设电力市场中有  $N$  个注册发电

公司,且每个发电公司拥有 1 台注册机组。发电公司根据负荷预测、对其他发电公司报价行为的估计、自己的生产成本、对风险的偏好等因素确定自己的报价。市场规则要求发电公司的报价函数为线性函数,则第  $i$  个发电公司的报价函数为:

$$p_i = \alpha_i + \beta_i \leq P_{Gi} \quad (1)$$

$$P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max} \quad (2)$$

式中,  $p_i$  为第  $i$  个发电公司在有功出力为  $P_{Gi}$  时的报价,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  均为报价系数,  $P_{Gi, \min}$  和  $P_{Gi, \max}$  分别为机组有功出力的上下限。

发电机组生产成本函数常用式(3)所示二次函数表示为:

$$C_i(P_i) = c_{ik} + \alpha_{ik} \cdot P_{Gi} + \frac{1}{2} \cdot \beta_{ik} \cdot P_{Gi}^2 \quad (3)$$

式中,  $c_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$  和  $\beta_{ik}$  是发电机组生产成本函数的相关系数。

假定报价系数  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  与机组生产成本之间的关系为:

$$k_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_{ik}} = \frac{\beta_i}{\beta_{ik}} \quad (4)$$

因此,报价参数  $k_i$  表示的是第  $i$  个发电机组高于或低于边际成本的比例。只要计算出最优的  $k_i$ , 则发电公司  $i$  的最优报价即可得到。

电力调度交易中心收到各发电公司的报价曲线后,根据预测的系统负荷(不计负荷需求对价格的弹性)以购电费用最小为目标安排市场出清,即:

$$\lambda = \alpha_i + \beta_i \cdot P_{Gi} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} = P_D \quad (6)$$

式中,  $P_D$  为系统负荷。  $P_{Gi}$  应满足发电出力的上下限约束,如式(2)所示。

市场出清电价(和总有功负荷  $P_D$  的关系表示为如下函数(不考虑网损):

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\beta_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\beta_i}} \quad (7)$$

### 2.2 计及竞争对手报价时发电公司报价模型

本文旨在研究输电阻塞对发电公司竞价策略的影响,为了简化描述,假设发电公司  $i$  通过历史数据已经预测得到竞争对手报价系数的估计值。则发电公司  $i$  可根据式(7)模拟市场出清,得到各发电公司的出力。

$$P_{Gi} = \frac{\lambda - \alpha_i}{\beta_i} = \frac{\lambda - k_i \alpha_{ik}}{k_i \beta_{ik}} = \frac{\lambda}{k_i \beta_{ik}} - \frac{\alpha_{ik}}{\beta_{ik}} \quad (8)$$

当  $P_{Gi} < P_{Gi, \min}$  时,令  $P_{Gi} = 0$ , 将该发电机组从调度中排除;当  $P_{Gi} > P_{Gi, \max}$  时,令  $P_{Gi} = P_{Gi, \max}$ , 即将该发电机组设置为满负荷发电,将其容量从总负荷

中剔除,之后再重新确定其他发电机组的出力。因此,在不考虑容量约束时,发电公司  $i$  的最优报价模型可以表述为式(9)所示的优化问题:

$$\max \Omega_i = \lambda \cdot P_{Gi} - C_{ic}(P_{Gi}) \quad (9)$$

通过上述约束条件,可确定无输电容量约束时发电公司  $i$  的最优报价系数  $k_i^*$ 。

### 2.3 考虑阻塞的发电公司最优竞价模型

利用上述方法得到的发电公司最优竞价策略能否顺利实现还要受线路输电容量约束的限制。如果引起输电阻塞,电力交易与调度中心就需要进行阻塞管理,修改发电计划,即确定发电公司发电出力的调整量  $\Delta P_{Gi}$  以消除阻塞。本文以阻塞费用最小为目标进行阻塞管理。阻塞费用是调整发电公司出力后的购电费用与无约束调度时的购电费用之差。故阻塞管理模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min F &= \min \sum_{i=1}^N (\lambda' \cdot P'_{Gi} - \lambda \cdot P_{Gi}) = \\ &= \min \sum_{i=1}^N [\lambda' \cdot (P_{Gi} + \Delta P_{Gi}) - \lambda \cdot P_{Gi}] \quad (10) \end{aligned}$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^N \Delta P_{Gi} = 0 \quad (11)$$

$$\Delta L_{\min} \leq \mathbf{A} \Delta \mathbf{P} \leq \Delta L_{\max} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{G\min} - \mathbf{P}_G \leq \Delta \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_{G\max} - \mathbf{P}_G \quad (13)$$

式中,  $F$  为阻塞费用,  $\lambda'$  为发电公司出力调整后的出清电价。  $\mathbf{P}_G$  为机组有功出力组成的列向量;  $\Delta \mathbf{P}_G$  为机组有功增量组成的列向量;  $\Delta P_{Gi}$  为第  $i$  个机组有功功率的调整量;  $\mathbf{P}_{G\min}$  和  $\mathbf{P}_{G\max}$  分别为机组有功功率最大限值和最小限值组成的列向量;  $\Delta L_{\min}$  和  $\Delta L_{\max}$  分别为支路调整量的最大限值和最小限值组成的列向量;  $\mathbf{A}$  为支路对机组的灵敏度矩阵; 本文应用直流潮流的灵敏度方法计算灵敏度矩阵。

当发电公司预测到某些线路将发生输电阻塞时,将对 2.2 节得到的报价系数进行修正,以获得更大的利润。此时发电公司  $i$  的竞价模型可以如式(14)所示:

$$\begin{aligned} \max \Omega_i &= \lambda' \cdot (P_{Gi} + \Delta P_{Gi}) - \\ &= C_{ic}(P_{Gi} + \Delta P_{Gi}) + RC_i \quad (14) \end{aligned}$$

s. t.

$$\begin{aligned} P_{Gi, \min} &\leq P_{Gi} + \Delta P_{Gi} \leq P_{Gi, \max}, \\ \alpha_i + \beta_i \cdot (P_{Gi} + \Delta P_{Gi}) &\leq \lambda_{\max} \quad (15) \end{aligned}$$

式中,  $\lambda_{\max}$  为市场规则确定的发电公司的报价上限;  $RC_i$  为阻塞发生后,发电公司  $i$  因其发电量被调整而应获取的附加费,其大小为:

$$\begin{aligned} RC_i &= \Delta P_{Gi} \cdot (\lambda' - (\beta_i + \alpha_i \cdot P_{Gi} + \alpha_i \cdot \Delta P_{Gi})) \quad (16) \\ RC_i &= \Delta P_{Gi} \cdot [\lambda' - (\partial_i + \partial_i \cdot P_{Gi} + \beta_i \cdot \Delta P_{Gi})] \end{aligned}$$

由式(7)和式(8),上式可改写为:

$$\begin{aligned} RC_i &= -k_i \cdot \beta_{ik} \cdot \Delta P_{Gi}^2 \quad (17) \\ RC_i &= -k_i \cdot \beta_{ik} \cdot \Delta P_{Gi}^2 \end{aligned}$$

## 3 算法流程

算法流程图如图 1 所示。

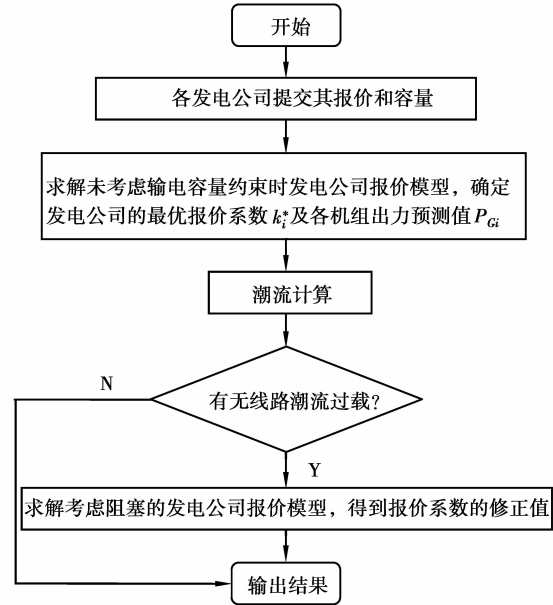


图 1 算法流程图

首先求解不考虑输电容量约束时的发电公司最优竞价模型,得到发电公司  $i$  的最优报价系数  $k_i^*$  以及市场出清价  $\lambda$  和各发电公司出力  $P_{Gi}$  的预测值。然后根据电力调度交易中心公布的系统参数及各节点预期负荷水平进行潮流计算,以预测系统是否会发生输电阻塞。如果该调度计划没有引起线路潮流越限,则上述结果即为所求最优解。若预测到可能有线路潮流越限,则应求解考虑阻塞时的发电公司  $i$  的最优竞价模型,从而得到发电公司  $i$  的最优报价系数的修正值。

## 4 算例分析

以 IEEE-14 节点网络为例,对本文所提方法进行仿真分析。

### 4.1 系统描述

以 IEEE-14 节点系统为例,对论文所提方法进行仿真分析。系统参数见文献[12]。假设系统中 5 台发电机分别隶属于 5 个不同的发电公司,系统中各台发电机所在节点及其机组参数如表 1 所示,在实际应用时需要根据历史数据(报价数据等)采用数学方法(如统计分析方法)确定各机组参数。

表 1 IEEE-14 节点网络发电机数据

发电公司	机组成本系数			$P_{Gi,min}$ /MW	$P_{Gi,max}$ /MW	所在节点号
	$c_{ic}$	$\alpha_{ic}$	$\beta_{ic}$			
1	0	3.00	0.275	15	90	1
2	0	5.25	0.105	20	100	2
3	0	3.00	0.175	20	100	3
4	0	5.00	0.150	20	120	6
5	0	4.00	0.150	15	100	8

注:上表中  $c_{ic}$  的单位为美元/h;  $\alpha_{ic}$  的单位为美元/(MW·h);  $\beta_{ic}$  的单位为美元/(MW<sup>2</sup>·h)。

## 4.2 仿真结果

### 4.2.1 不考虑输电容量约束时的仿真结果

假设市场公布信息可知系统总负荷  $P_D = 329$  MW,并且系统负荷均为对电价非弹性。本文首先对不考虑输电容量约束下的发电公司最优竞价模型进行求解。计算得到 5 个发电公司的最优报价策略如表 2 所示。

表 2 发电公司的最优报价策略、各机组出力 and 利润预测值

发电公司	最优报价策略			$P_{Gi}$ /MW	$\Omega$ /美元
	$k$	$\alpha_i$	$\beta_i$		
1	1.16	3.480 0	0.319 0	48.208 1	444.950 5
2	1.41	7.402 5	0.148 0	77.378 6	738.657 7
3	1.27	3.810 0	0.222 2	67.709 3	672.613 1
4	1.27	6.350 0	0.190 5	65.660 9	586.603 3
5	1.30	5.200 0	0.195 0	70.043 1	672.775 4

此时,市场出清价  $\lambda = 18.858 4$  美元/(MW·h)。

经过直流潮流校核,线路 14 出现潮流越界,其初始潮流和潮流越限量如表 3 所示。

表 3 线路 14 的潮流及潮流越限量

支路号	首末端 母线号	线路潮流 /MW	线路容量 限额/MW	潮流越限量 /MW

为消除阻塞,调度中心对个发电公司进行出力调整。调整后,各发电公司出力及其利润如表 4 所示。

表 4 各发电公司调整后的出力及实际利润

	发电公司 1	发电公司 2	发电公司 3	发电公司 4	发电公司 5
	$P_{Gi}$ /MW	51.400 6	84.285 5	72.307 3	71.006 6
$\Omega$ /美元	504.413 9	860.216 1	763.137 0	678.501 7	606.548 4

### 4.2.2 考虑输电容量约束时的仿真结果

若发电公司在报价时预测到某些线路可能出现阻塞,为了最大化自身的利润,必然调整其报价系

数,调整后发电公司的最优报价策略如表 5 所示。

表 5 发电公司的最优报价策略、各机组出力 and 利润预测值

发电公司	最优报价策略			$P_{Gi}$ /MW	$\Omega$ /美元
	$k$	$\alpha_i$	$\beta_i$		
1	1.27	3.810 0	0.349 3	48.085 6	528.563 9
2	1.56	8.190 0	0.163 8	75.787 0	862.084 2
3	1.38	4.140 0	0.241 5	68.173 5	793.453 1
4	1.38	6.900 0	0.207 0	66.202 5	704.309 9
5	1.41	5.640 0	0.211 5	70.751 3	799.317 6

此时,市场出清价  $\lambda = 20.603 9$  美元/(MW·h)。经过直流潮流校核,在此调度方案下线路 14 和 15 出现潮流越界,其各自潮流及线路潮流越限量如表 6 所示。

表 6 线路 14 和 15 的潮流及潮流越限量

支路号	首末端 母线号	线路潮流 /MW	线路容量 限额/MW	潮流越限量 /MW
15	7-9	66.660 0	65	1.66

为消除阻塞,调度中心对个发电公司进行出力调整。调整后,各发电公司出力及其利润如表 7 所示。

表 7 各发电公司调整后的出力及实际利润

	发电公司 1	发电公司 2	发电公司 3	发电公司 4	发电公司 5
$P_{Gi}$ /MW	38.625 3	100.000 0	59.034 7	81.339 9	50.000 0
$\Omega$ /美元	541.335 9	819.000 0	785.253 6	752.501 5	682.125 0

从上述结果可见,当预测到某些线路可能发生输电阻塞时,发电公司会修正自己的报价系数。由表(5)和表(7)可以看出,由于输电阻塞的影响,发电公司 1、3 的利润比其预期利润高,而发电公司 2、4、5 的利润低于其预期利润。由表(4)和表(7)可以看出,与报价时不考虑输电约束进行比较,发电公司 2 的利润有所下降,其他发电公司采用本文提出的方法得到的最优报价系数进行报价时所得到的利润,高于不计输电容量约束时的最优报价系数下的利润。这说明本文提出的考虑输电阻塞影响的最优报价策略模型有利于发电公司实现利润最大化的目标。

## 5 结 语

研究了输电阻塞对发电公司的最优竞价策略的影响,将发电公司的竞价策略分为 3 步进行:首先在不完全信息的市场环境下,根据对市场内其他机组的报价系数的估计,建立市场出清模型,计算市场出清价的期望值;然后建立计及竞争对手报价的发电公

司竞价模型,计算考虑竞争对手报价的发电公司竞价系数。若经潮流计算,无输电阻塞发生,则求解上述模型得到的报价系数即为发电公司的最优报价系数。若经潮流计算,有输电阻塞发生,则计算考虑输电阻塞后发电公司报价策略的调整系数,得到阻塞情况下发电公司的最优报价系数。最后,以 IEEE-14 节点系统为例,说明输电阻塞对发电公司竞价策略的影响,证明采取本文方法得到的最优报价系数进行报价时,能够实现发电公司利润最大化的目标。

#### 参考文献:

- [1] GOUNTIS V P, BAKIRTZIS A G. Bidding strategies for electricity producers in a competitive electricity marketplace[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1):30-36.
- [2] NGUYEN D H, WONG K P. Natural dynamic equilibrium and multiple equilibria of competitive power markets[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2):133-138.
- [3] WEN F S, DAVID A K. Optimal bidding strategies for competitive generators and large consumers [J]. Electrical Power & Energy Systems, 2001, 23(1): 37-43.
- [4] WEN F S, DAVID A K. Coordination of bidding strategies in energy and spinning reserve markets for competitive suppliers using a genetic algorithm [C]// Proceedings of IEEE PES 2000 Summer Meeting, July 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. [s. l.]: IEEE, 2000:2174-2179.
- [5] 马豫超,蒋传文,侯志俭等. 基于自加强学习算法的发电公司报价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17):12-17.  
MA YU-CHAO, JIANG CHUAN-WEN, HOU ZHI-JIAN, et al. Strategic bidding of the electricity producers based on the reinforcement learning [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(17):12-17.
- [6] 王丽杰,张步涵,曾次玲. 用电价分布概率预测的发电公司报价策略模型[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):45-48.  
WANG LI-JIE, ZHANG BU-HAN, ZENG CI-LING. Bidding model based on forecasting the probability of electricity price distribution for power generation enterprises[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 45-48.
- [7] HE Y, SONG Y H. Generation bidding strategies based on two-level optimization and bids sensitivities [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(2): 44-46.
- [8] GOUNTIS V P, BAKIRTZIS A G. Bidding strategies for electricity producers in a competitive electricity marketplace [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1):356-365.
- [9] LI T, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Risk-constrained bidding strategy with stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 449-458.
- [10] YAO B, YE P, CAI Z Y. Optimal bidding strategies for power suppliers with transmission congestion taken into account [C]// International Conference on Power System Technology, Oct. 22-26, 2006, Chongqing, China. [s. l.]: IEEE, 2006 :1-8.
- [11] 马豫超,蒋传文,侯志俭,等. 基于自加强学习算法的发电公司报价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17):12-17.  
MA YU-CHAO, JIANG CHUAN-WEN, HOU ZHI-JIAN, et al. Strategic bidding of the electricity producers based on the reinforcement learning [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(17):12-17.
- [12] LI T, SHAHIDEHPOUR M. Risk-constrained FTR bidding strategy in transmission markets, IEEE Transactions on Power System, 2005, 20(2):1014-1021.
- [13] 黄大为,韩学山,郭志忠. 计及机组爬坡速率约束的发电公司竞价策略[J]. 电网技术, 2008, 32(11):79-83.  
HUANG DA-WEI, HAN XUE-SHAN, GUO ZHI-ZHONG. Analysis on generation companies' bidding strategy taking unit ramp rate constraints into account[J]. Power System Technology, 2008, 32(11):79-83
- [14] 吴江,李长山,管晓宏,等. 考虑机组约束的时前市场发电公司竞标策略[J]. 电机工程学报, 2008, 28(16):72-78.  
WU JIANG, LI CHANG-SHAN, GUAN XIAO-HONG, et al. Unit constraints considered genco's bidding strategies in hour-ahead electricity market[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(16):72-78
- [15] LI T, SHAHIDEHPOUR M. Strategic bidding of transmission -constrained Genco's with incomplete information [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 437-447.
- [16] PENG T, TOMSOVIC K. Congestion influence on bidding strategies in an electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1054-1061.
- [17] 马莉,文福拴,倪以信,等. 计及网络阻塞影响的发电公司最优报价策略[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12):12-17  
MA LI, WEN FU-SHUAN, NI YI-XIN, et al. Optimal bidding strategies for generation companies with network congestion taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 12-17.
- [18] 陶芬,张步涵,杨超. 考虑输电阻塞影响的发电公司最优报价策略[J]. 电网技术, 2007, 31(16):12-16  
TAO FEN, ZHANG BU-HAN, YANG CHAO. Optimal bidding strategy of power Generation Company considering transmission congestion [J]. Power System Technology, 2007, 31(16):12-16.

(编辑 张小强)