

计及机组爬坡速率约束的发电商竞价策略

黄大为¹, 韩学山², 郭志忠¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;

2. 山东大学 电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

Analysis on Generation Companies' Bidding Strategy Taking Unit Ramp Rate Constraints Into Account

HUANG Da-wei¹, HAN Xue-shan², GUO Zhi-zhong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: In this paper the bidding strategy of generation companies is expressed as a bi-level programming problem, in which the upper one is the profit maximization of generation company and the lower one is dynamic economic dispatching. The profit maximization of generation companies is solved by the particle swarm optimization based on stochastic inertia weight method; the dynamic economic dispatching is solved by quadratic programming (QP) method, from this the two programming problems are alternatively solved. On this basis, by means of simulation of calculation example, the mechanism of adjusting bidding strategy by generation companies according to their geographic position and the differences among their ability to response load variation is analyzed.

KEY WORDS: electricity market; bidding strategy; bi-level programming; particle swarm optimization

摘要: 将发电商竞价决策表达成二层规划问题, 上层为发电商利润最大化, 下层为动态经济调度。发电商利润最大化问题采用随机惯性权重的粒子群优化算法完成, 动态经济调度采用二次规划方法完成, 由此形成二层规划交替求解。在此基础上, 通过算例仿真分析了发电商依据地理位置和机组对负荷变化响应能力的差异来调整竞价策略的机理。

关键词: 电力市场; 竞价策略; 二层规划; 粒子群算法

0 引言

与普通商品市场不同, 在电力市场中, 电力商品的交易发生在受特殊运行规律约束的输电网络

上, 发电商所处的地理位置(节点)和输电网结构直接影响其收益。而且, 在一段时间内(如负荷陡然升降), 由于机组输出功率速率的限制, 各时段发电机组的输出功率相互牵制, 因此, 发电商的竞价决策中需要考虑机组对负荷的动态响应能力。如何针对具体的输电网结构和变化的负荷模式, 研究输电网和机组功率速率约束对发电商竞价决策的影响, 进而优化报价策略以最大化利润, 是发电商在电力市场竞争交易中所要解决的重要问题。

研究发电商的最优报价策略和分析电力市场中发电商滥用市场力的行为是近年来国内外的研究热点^[1]。在诸多研究中, 供给函数均衡(supply function equilibrium, SFE)模型因其较适用于解决电力市场中的投标问题而被广泛应用^[1-3]。文献[3]依据优化理论提出了求解发电商最优供给函数的二层规划模型, 其中上层是发电商利润最大化问题, 下层是基于最优潮流的优化调度问题。这一思路构成了研究发电商最优竞价策略和分析电力市场供给函数均衡的一个核心框架, 并得到了运用和发展^[4-10]。文献[5]假定发电商按线性供给函数投标, 系统按用户付费最小进行优化调度, 通过运用概率理论估计竞争对手的竞价策略, 采用随机模拟与优化理论相结合的方法求解发电商最优报价策略。文献[6-7]在文献[5]的基础上, 研究了输电网阻塞和不同的阻塞管理方式对竞价策略的影响。文献[8]在线性报价规约的基础上构建了发电商最优竞价策略的二层优化模型, 在其中考虑了其他竞争对手竞价策略的不确定性和网络约束对竞价策略的影响。文

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50377021, 50677036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50377021, 50677036).

献[9]则将这一模型扩展到分段报价型的竞价模型中。文献[10]利用最优潮流计算了不同结算方式下的 Nash 均衡, 并进行了比较分析。文献[11]对线性供给函数均衡的应用加以推广, 将需求方投标引入到线性供给函数均衡模型中, 并基于最优潮流的灵敏度分析提出了求解市场均衡点的迭代算法。从目前的研究状况来看, 人们对发电商竞价决策的研究较偏重于输电网制约对竞价策略的影响机制, 而对于机组输出功率速度制约对竞价策略的影响的分析相对较少, 忽视了机组输出功率轨迹在不同时间间隔的关联和衔接, 使得到的报价策略未必合理有效。在此背景下, 本文从动态负荷变化与发电机组功率变化相互制约的角度出发, 建立发电商竞价决策的二层规划模型, 通过采用改进的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法与二次规划相结合的方法研究发电商的优化竞价策略, 并通过算例仿真分析输电网络和机组输出功率速度对发电商竞价策略的影响。

1 发电商竞价决策的二层规划模型

本文主要研究联营体(pool)模式下发电侧开放的日前交易市场, 市场以总发电费用最小为目标, 按节点电价结算购电费用。为便于论述, 假设每个发电商仅拥有一台发电机组或一个等值发电机组, 市场中共有 N 个发电商参与竞价。设第 i 个发电商在 t 时刻的运行变动成本为

$$c_i(p_{i,t}) = 0.5a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t}$$

式中: $p_{i,t}$ 为发电商 i 在 t 时刻的有功功率; a_i 和 b_i 为成本特性参数, 均大于 0。按市场要求, 发电商以线性的报价函数进行报价, 即

$$B_{i,t}(p_{i,t}) = a_{i,t} p_{i,t} + b_{i,t} \quad (p_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max})$$

式中: $B_{i,t}(p_{i,t})$ 为单位电能的报价; $a_{i,t}$ 和 $b_{i,t}$ 为报价系数; $p_{i,\min}$ 和 $p_{i,\max}$ 分别为发电商有功功率的上下限。

本文重点研究输电网络和机组输出功率速度约束对发电商竞价策略的影响, 主要分析在负荷陡升或陡降的时间段内发电商调整竞价策略的机理。因此, 本文所研究的时间段内机组的启停状态已经确定, 并假设除所考虑的发电商外, 其余发电商的策略参数是给定的。另外, 本文暂不考虑发电商之间动态调整策略的博弈行为以及对于纳什均衡策略的分析。

在 pool 模式下, 在机组的启停状态已经确定的时间段内, 发电商的发电功率和市场出清价格是通

过市场最优化调度(优化潮流)决定的, 目标是购电成本最小化。该优化调度模型为

$$\min F(\mathbf{P}, \mathbf{f}) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (0.5a_{i,t} p_{i,t}^2 + b_{i,t} p_{i,t}) \Delta t \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{A}_g^t \mathbf{P}^t - \mathbf{A}_l^t \mathbf{f}^t = \mathbf{P}_L^t \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_c^t \mathbf{X}^t \mathbf{f}^t = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$p_i^{\min} \leq p_{i,t} \leq p_i^{\max} \quad (4)$$

$$-r_{d,i} \Delta t \leq p_{i,t+1} - p_{i,t} \leq r_{u,i} \Delta t \quad (5)$$

$$-f_{l,\max} \leq f_{l,t} \leq f_{l,\max} \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (6)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T$; T 为研究期内被均匀分成的总时段数; N 为电力市场中发电商总数; \mathbf{A}_g^t 为节点与机组间的关联矩阵; \mathbf{P}^t 为系统各节点机组输出有功功率向量; \mathbf{A}_l^t 为节点与支路间的关联矩阵; \mathbf{f}^t 为系统输电元件有功功率向量; \mathbf{A}_c^t 为网络独立闭合回路与支路间的关联矩阵; \mathbf{X}^t 为系统所有输电元件的电抗构成的对角阵; \mathbf{P} 是由 \mathbf{P}^t 构成的所有时段各节点机组输出有功功率向量; \mathbf{f} 是由 \mathbf{f}^t 构成的系统输电元件各时段有功功率向量; $r_{u,i}$ 和 $r_{d,i}$ 分别为机组 i 单位时间内的最大上升和下降速率; Δt 为每个时段所持续的时间; h ; $f_{l,t}$ 为 t 时段线路 l 传输的功率; $f_{l,\max}$ 为线路 l 传输的功率限值; L 为系统支路总数。

约束(2)(3)为直流潮流约束方程, 将输电元件的支路潮流表示为独立变量, 以便于分析线路潮流与策略参数的变化关系。在机组组合已知的条件下, 采用式(3)~(7)构成的模型可计算出研究期间内每一时段的市场出清价格 $I_{i,t}$ 、输电线路上的潮流 $f_{l,t}$ 和各机组的有功功率 $p_{i,t}$ 。该优化模型与动态安全经济调度模型相同, 具体解法可参见文献[12-14]等。该优化模型表述了发电商报价的清除过程, 报价系数的调整直接影响系统潮流的变化, 市场清除价格和各机组输出有功功率可以表示为发电商报价系数的函数。这样, 发电商 i 在 T 时段内的总利润为

$$p_i = \Delta t \sum_{t=1}^T [I_{i,t}(s_i, s_{-i}) p_{i,t}(s_i, s_{-i}) - c_i(p_{i,t}(s_i, s_{-i}))] \quad (7)$$

式中: s_i 为发电商 i 在各时段的报价系数向量; s_{-i} 为其他所有发电商各时段报价系数形成的向量。在分析发电商 i 的竞价问题时, 在固定 s_{-i} 的基础上, 发电商通过调整 s_i 试图最大化其利润, 因此, 该优化问题可表示为如下二层规划模型:

$$\max p_i = \Delta t \sum_{t=1}^T [I_{i,t}(s_i) p_{i,t}(s_i) - c_i(p_{i,t}(s_i))] \quad (8)$$

$$\text{s.t. } s_{i,\min} \leq s_i \leq s_{i,\max} \quad (9)$$

$$\min F(\mathbf{P}(s_i), \mathbf{F}(s_i)) \quad (10)$$

$$h(\mathbf{P}(s_i), \mathbf{F}(s_i)) = 0 \quad (11)$$

$$g(\mathbf{P}(s_i), \mathbf{F}(s_i)) \leq 0 \quad (12)$$

式(11)(12)分别对应优化模型式(1)~(6)中的等式和不等式约束方程。

在上述二层规划模型中,上层规划的决策变量是发电商的策略参数,而下层规划则以发电商的决策变量为参数选取使目标函数式(1)最优的决策。在这一过程中,下层的决策结果直接影响到上层规划问题的求解。与单时段的情形不同,发电商的决策目标是在 T 个时段内的总利润最大,各时段策略参数的调整是相互关联的,它们的取值大小不仅与具体的输电网络结构参数有关,还取决于各节点负荷随时间变化的规律和机组对负荷变化的响应能力。

2 模型求解方法

2.1 改进的 PSO 算法

标准的粒子群模型包括一个 n 维变量空间内的 m 个粒子组成的群体和与进化代数 k 相关的粒子位置。设 n 维解空间中有 m 个微粒, $\mathbf{X}_s^k = (x_{s1}^k, x_{s2}^k, \dots, x_{sn}^k)$ 为微粒 s 进化到第 k 代的位置, $\mathbf{V}_s^k = (v_{s1}^k, v_{s2}^k, \dots, v_{sn}^k)$ 为微粒 s 进化到第 k 代的速度。在进化过程中,微粒到第 k 代为止的历史最优位置为 $\mathbf{Q}_s^k = (q_{s1}^k, q_{s2}^k, \dots, q_{sn}^k)$, 所有微粒的全局最优位置为 $\mathbf{Q}_g^k = (q_{g1}^k, q_{g2}^k, \dots, q_{gn}^k)$, 则 PSO 算法的进化方程可描述为

$$v_{sj}^{k+1} = w^k v_{sj}^k + c_1 r(q_{sj}^k - x_{sj}^k) + c_2 r(q_{gj}^k - x_{sj}^k) \quad (13)$$

$$x_{sj}^{k+1} = x_{sj}^k + v_{sj}^{k+1} \quad (14)$$

式中: w^k 是速度的惯性权重因子; c_1 和 c_2 为加速常数; r 是在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数。

各粒子依据目标函数计算适应值,微粒的速度、位置根据式(10)(11)来进化,直到满足最大迭代的代数或所要求的精度为止。具体的寻优过程如下:

(1) 随机初始生成每个粒子的位置和速度。

(2) 利用目标函数计算粒子的适应值,更新并保存 P_s^k 和 P_g 。

(3) 依据式(10)(11)更新每个粒子的速度和位置。速度的惯性权重因子设定为在区间 $[w_{\min}, w_{\max}]$ 上关于当前进化代数 k 线性递减的函数

$$w^k = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})k / k_{\max} \quad (15)$$

式中 k_{\max} 为最大进化代数。

(4) 如未达到预先设定的停止条件,则返回到第(2)步,否则停止计算。

由上述寻优过程可以看出,速度的惯性权重 w^k 对于优化过程起着重要的作用,主要表现在以下两个方面:①用来控制历史速度对当前速度的影响;②用来平衡全局搜索和局部搜索。采用基本 PSO 算法时, w^k 由方程式(15)确定。在进化代数较小时, w^k 较大,搜索的范围加大,提高了全局搜索能力,从而增加了候选解的多样性;随着进化代数增加, w^k 逐渐减小,速度变化范围减弱,从而增强了局部挖掘最优解的能力,加速收敛。但是,这种取值方法也存在一些问题。首先,如果在进化初期探测到较优点,则希望能迅速收敛于最优点,而 w^k 的线性递减减缓了算法的收敛速度;其次,在进化后期,随着 w^k 的减小,导致全局搜索能力下降,多样性减弱,容易陷入局部最优。

基于此,本文采用随机惯性权重法来取代线性递减的方法,使得微粒既能在进化初期有机会获得较小的 w^k 值,又能够在后期有机会得到较大的 w^k 值。具体取值由下式确定:

$$w^k = \begin{cases} U(r_1, r_2), & \|\Delta \mathbf{Q}_g^k\| \leq e \\ U(r_3, r_4), & \|\Delta \mathbf{Q}_g^k\| > e \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\|\Delta \mathbf{Q}_g^k\| = [(q_{g1}^k - q_{g1}^{k-1})^2 + (q_{g2}^k - q_{g2}^{k-1})^2 + \dots + (q_{gn}^k - q_{gn}^{k-1})^2]^{1/2}$; e 为足够小的常数; $U(r_1, r_2)$ 、 $U(r_3, r_4)$ 分别表示在区间 (r_1, r_2) 和 (r_3, r_4) 上均匀分布的随机数,且 $r_3 < r_1$, 设置 $r_2 < 1.2$ 。

由上式可以看出, w^k 为均匀分布的随机数,并且根据 \mathbf{Q}_g^k 是否发生变化,其取值范围也作相应调整:当 \mathbf{Q}_g^k 的变化小于一定范围时, w^k 随机取一个较大的值,否则取值将变小。这样可以较好地解决用线性递减方式确定惯性权重所导致的缺点。

2.2 算法流程

依据本文模型的特点(下层问题与动态经济调度问题相同),本文采用改进的 PSO 启发式算法和动态经济调度相结合的方法求解二层优化问题。

在改进的 PSO 算法中,每个随机产生的个体都有机会成为群体中的最优个体。粒子群中的粒子 s 由所考虑发电商的各交易时段报价函数的策略参数变量组成。本文采用先固定报价曲线的斜率,以报价曲线的截距作为策略参数的报价调整策略^[3],则粒子位置向量可表示为 $\mathbf{X}_s^k = (b_{s1}^k, b_{s2}^k, \dots, b_{sT}^k)$ 。对于每个粒子,通过求解优化模型(1)~(6)得到各时

段的节点价格和机组输出功率, 以计算粒子适应值。对于更新后的粒子位置违反约束条件的情况, 在适应值计算中进行惩罚^[15]。在粒子适应值的计算过程中, 对于模型(1)~(6)的求解是一个相对独立的优化问题, 在原理上与动态经济调度完全相同, 本文采用原对偶内点法进行求解。二层规划交替求解方法的基本流程为:

(1) 输入机组数据、各时段负荷数据、网络数据及所考虑机组的策略调整参数约束。

(2) 置迭代次数 $k=0$, 给定最大迭代次数 k_{\max} 。

(3) 根据策略参数的约束条件随机产生初始粒子位置和相应的速度信息。

(4) 将策略参数带入模型(1)~(6)中, 利用原对偶内点法求解出发电商的节点电价和输出功率。

(5) 计算粒子适应值, 并更新 P_s^k 和 P_g 的信息。

(6) 用式(15)计算随机惯性权重, 分别用式(14)(13)更新粒子速度和位置信息, 获得新的策略参数, 并置 $k=k+1$ 。

(7) 如果迭代次数 k 到达最大次数, 则输出策略参数, 否则返回到步骤(4)。

3 算例分析

3.1 算例参数

本文运用 IEEE14 节点系统模拟电力传输网络, 考虑 3 个时段的情况。发电商的技术经济参数和各时段负荷参数分别见表 1 和表 2。表 3 为发电商在起始时段的输出功率初值。

表 1 发电商的技术经济参数

节点	$a_i/(\text{元}/\text{MW}^2)$	$b_i/(\text{元}/\text{MW}^2)$	p_i^{\max}/MW	p_i^{\min}/MW	$(r_w/r_d)/\text{MWh}$
1	0.0194	74.9	500	200	180
2	0.0245	96.8	300	120	90
3	0.0326	106.8	300	150	90
6	0.0362	125.3	200	80	90
8	0.0185	85.6	500	210	180

表 2 各节点负荷

时段	负荷/MW					
	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7
1	100	100	100	100	100	100
2	120	130	130	120	150	150
3	130	140	140	150	140	140

时段	负荷/MW					
	节点 9	节点 10	节点 11	节点 12	节点 13	节点 14
1	100	100	100	100	100	100
2	140	110	110	120	130	120
3	145	140	140	135	150	140

表 3 发电商起始时段的输出功率值

节点号	1	2	3	6	8
发电商 i	1	2	3	4	5
$p_{i,0}/\text{MW}$	300	200	200	150	300

3.2 比较分析

为了比较说明网络约束和机组输出功率速度约束对发电商竞价决策的影响, 本文在 3 种情况下进行仿真计算: ①发电商不考虑网络和机组输出功率速度约束的报价策略以及市场清除结果; ②发电商考虑网络约束但没有考虑机组输出功率速度约束的报价策略以及市场清除结果; ③发电商考虑网络和机组输出功率速度约束的报价策略以及电力市场清除结果。在算例中, 节点 7 至 9 的线路有功功率限值为 400MW, 节点 8 至 7 的线路有功功率限值为 500MW, 其余线路的限值均为 300MW。除当前所考虑的发电商外, 其余发电商均以边际成本曲线进行报价。时段持续时间为 1 h。设发电商 1 的策略参数调整范围为 [55,140]。采用本文所提方法求解发电商竞价的二层优化问题, 改进的 PSO 算法参数如下: 粒子数目为 30, 最大迭代次数为 500, $c_1=c_2=2$, $r_1=0.5$, $r_2=1.0$, $r_3=0$, $r_4=1.0$, $e=0.01$ 。表 4 给出了 3 种情况下发电商 1 各时段的策略参数和总利润。表 5 给出第 3 种情况下各发电商的节点电价和输出功率。

表 4 3 种情况下发电商 1 的报价策略和利润

Tab. 4 Bidding strategy and profit of generator 1 under three kinds of conditions

情况	$b_{1,j}/(\text{元}/\text{MW})$			利润/元
	时段 1	时段 2	时段 3	
①	127.84	120.09	136.6	43 806.24
②	91.964	115.97	139.08	45 393.21
③	101.86	140	140	49 404.40

表 5 第 3 种情况下市场清除结果

Tab. 5 Market clearing result under the third condition

发电商	时段 1		时段 2		时段 3	
	有功功率/ MW	节点电价/ (元/MW)	有功功率/ MW	节点电价/ (元/MW)	有功功率/ MW	节点电价/ (元/MW)
1	200	105.04	230	144.46	409.43	147.94
2	290	105.04	300	144.46	300	147.52
3	150	105.04	300	144.46	300	146.33
4	80	105.04	200	144.46	200	147.61
5	480	105.04	500	119.70	480.27	94.58

从表 4 可见, 在上述 3 种情况下, 发电商 1 所决定的报价策略和所获利润有明显差异, 这种差异反映出网络和机组输出功率速度约束对竞价决策结果的影响。从表 5 可以看出, 发电商 1 在交易时

段2和时段3都具有明显优势。在时段2, 发电商2、3和5均已达到输出功率上限, 而发电商4受机组输出功率速度限制, 也不能多发功率, 发电商1的策略参数可以调整至上限。这种优势的产生是由于系统负荷是动态变化的, 而其他竞争对手的机组输出功率速度受限, 不能有效地对负荷变化做出响应所引起的。此时对发电商1而言, 其所具有的竞争优势称之为响应优势。在时段3, 发电商2、3和4均满发, 而发电商5由于受网络约束的限制(线路7-9发生阻塞), 机组输出功率受限, 此时发电商1的策略参数调整至上限。这一竞争优势是由于网络约束的制约以及发电商1所处位置的不同而引起的, 称之为位置优势。由上述分析可知, 在竞价交易过程中, 发电商在特定的交易时段和负荷模式下, 可以利用自身的位置优势和响应优势, 分析这些优势有利于发电商获得超额利润。

4 结论

本文着重分析网络约束和机组输出功率速度约束对发电商竞价决策的影响, 构建了发电商竞价决策的三层规划模型, 并给出相应的求解方法。分析表明, 无论是网络约束的制约, 还是机组响应能力的限制, 在特定的交易时段和负荷模式下, 都可能存在能量供给的瓶颈, 从而使发电商具有一定的竞争优势, 这也是电力交易特殊性的一种体现。从系统侧来看, 分析竞价决策过程中的负荷动态变化与机组输出功率速度之间相互制约的动态关系, 有助于市场监管部门对市场力的监管和评估。如何制定反映发电商行使市场力的有效的动态指标将是下一阶段的研究重点。

参考文献

- [1] 文福拴, David A K. 电力市场中的投标策略[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 1-6.
Wen Fushuan, David A K. Bidding strategy in power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 1-6(in Chinese).
- [2] Hobbs B F. Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets[J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(2): 194-202.
- [3] Weber J D, Overbye T J. A two-level optimization problem for analysis of market bidding strategies[C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Alta, Canada, 1999: 682-687.
- [4] Hobbs B F, Metzler C B, Pang J S. Strategic gaming analysis for electric power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 638-645.
- [5] Wen F S, David A K. Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 15-21.
- [6] 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 Fushuan, Ni Yixin, 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(in Chinese).
- [7] 陶芬, 张步涵, 杨超. 考虑输电阻塞影响的发电商最优报价策略[J]. 电网技术, 2007, 31(16): 12-16.
Tao Fen, Zhang Buhuan, Yang Chao. Optimal bidding strategy of power generation company considering transmission congestion[J]. Power System Technology, 2007, 31(16): 12-16 (in Chinese).
- [8] Vasileios P G, Anastasios G B. Bidding strategies for electricity producers in a competitive electricity marketplace[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 356-365.
- [9] Anastasios G B, Nikolaos P Z, Athina C T, et al. Electricity producer offering strategies in day-ahead energy market with step-wise offers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1804-1818.
- [10] 袁智强, 蒋传文, 侯志俭, 等. 不同结算方式下发电商投标策略的 Nash 均衡分析[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1250-1255.
Yuan Zhiqiang, Jiang huanwen, Hou Zhijian, et al. Analysis of Nash equilibrium of bidding strategies for suppliers under different settlement modes[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 32(8): 1250-1255(in Chinese).
- [11] 陈晓明, 余贻鑫, 许琳. 计及输电约束和需求方投标的线性供应函数均衡点的求解算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 17-23.
Chen XiaoMing, Yu Yixin, Xu Lin. Linear supply function equilibrium with demand side bidding and transmission constrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 17-23(in Chinese).
- [12] 韩学山, 柳焯. 考虑机组爬坡速率和网络安全约束的经济调度解耦算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 32-37.
Han Xueshan, Liu Zhuo. Decoupled economic dispatch including unit ramp rate and network security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 32-37 (in Chinese).
- [13] Han X S, Gooi H B. Effective economic dispatch model and algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29(2): 113-120.
- [14] 赵建国, 韩学山, 程时杰. 网络流和内点法结合的有功动态优化调度[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 27-31,83.
Zhao Jianguo, Han Xueshan, Cheng Shijie. Optimal active power dispatching combining network flow and interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 27-31,83(in Chinese).
- [15] 马豫超, 侯志俭, 蒋传文, 等. 基于粒子群算法求解电力市场发电商最优供给函数模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 45-50.
Ma Yuchao, Hou Zhijian, Jiang Chuanwen, et al. PSO algorithm based optimal supply function model for power producer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 45-50(in Chinese).

收稿日期: 2007-12-13。

作者简介:

黄大为(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统经济、发电企业决策, E-mail: hdw76@163.com;

韩学山(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统调度与运行及电力市场运营方面的研究工作;

郭志忠(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行、电力系统新技术研究等方面的研究工作。

(责任编辑 王金芝)