

考虑输电容量约束的发电公司竞价策略的不确定规划方法

祝全乐 马新顺 苑津莎

(华北电力大学电气与电子工程学院 保定 071003)

摘要 在基于估计竞争对手的报价系数来构造发电公司最优竞价策略的问题中, 综合使用历史数据和专家经验能为决策者提供更为科学的决策依据。本文在不确定理论框架内, 提出了能够同时支持使用历史数据和专家经验的考虑输电容量约束的发电公司竞价策略方法, 给出了由市场清除问题和最优报价策略问题组成的两层不确定约束规划模型, 设计了一种由神经网络和改进遗传算法组成的混合求解算法。用3节点系统和IEEE 30节点系统对所提出的模型和算法进行了计算分析, 结果表明本文的方法是可行和有效的。

关键词: 电力市场 报价策略 输电容量约束 不确定理论 混合算法

中图分类号: TM73; F123.9

Uncertainty Programming Approach to Develop Optimal Bidding Strategies for Generation Companies Considering Transmission Capacity Constraints

Zhu Quanle Ma Xinshun Yuan Jinsha

(North China Electric Power University Baoding 071003 China)

Abstract In the problem of building optimal bidding strategies for generation companies based on estimating the rival's bids, historical data and experts experience can be used as the basis of scientific decision for generation companies. In this paper, method that can support use of historical data and experience with experts for building bidding strategies for generation companies considering transmission capacity constraints is proposed based on uncertain theory. The two-level model of uncertain programming composed of market clearing problem and optimal bidding strategies problem is presented, and the hybrid solution algorithm composed of artificial neural network (ANN) and improved genetic algorithm (GA) is designed. Finally, the numerical examples with 3-bus and IEEE 30-bus systems are used to verify the proposed method. The results show that the model and the solution algorithm are feasible and effective.

Keywords: Electricity market, bidding strategies, transmission capacity constraints, uncertainty theory, hybrid algorithm

收稿日期 2010-10-11 改稿日期 2011-08-23

1 引言

在电力市场环境下, 发电公司可以通过估计竞争对手的竞价行为来构造其最优竞价策略。在已经发展的基于估计市场不确定性的最优竞价策略方法

中, 普遍采用了两种方法框架: 一是从随机数学理论出发建立竞价策略的随机规划模型; 二是从模糊数学理论出发建立竞价策略的模糊规划模型。

第一种方法是将对手的竞价行为及其他的一些不确定信息视为随机变量, 构造发电公司竞价策略的随机规划模型, 并由历史数据的统计规律, 通过随机模拟进行求解^[1-5]。这种方法有比较严格的数学

基础,也存在较为成熟的求解方法,容易被接受。第二种方法是市场不确定变量视为模糊变量而发展的最优竞价策略方法^[6-8]。这种方法通过构造发电公司竞价策略的模糊规划模型,避免了对大量历史数据的要求,能够更好地体现决策者或专家经验在构造竞价策略中的作用。

解决不确定环境下发电公司的竞价策略问题,关键是使用合理的数学工具来处理这些不确定信息。受经典的数学理论所限,在构造发电公司最优竞价策略的以上两种方法框架中,仅能单独使用数学上具有随机性和具有模糊性的这两类信息之一,而不能综合考虑。最近,文献[9]利用不确定理论的最新研究成果^[10,11],同时考虑随机和模糊这两类不确定信息,建立了不确定环境下发电公司最优报价策略的随机模糊规划模型,并给出了混合智能求解算法。

不确定理论是新的数学分支,已经在电力系统的发电机组和线路检修等问题中得到应用。与传统的数学理论相比,基于不确定理论的数学模型,由于同时支持使用历史数据的统计特性和专家经验,因而能够为决策者提供更多的参考信息和决策依据,具有较强的实用性^[12,13]。具体到电力市场中的竞价策略问题,虽然文献[9]给出了构造最优竞价策略的不确定理论方法框架,但并未涉及输电容量约束问题,这与实际存在的电力市场环境下的竞价问题有较大的差距。事实上,在计及输电容量约束后,该问题要复杂得多,需要解决从建模到计算求解过程中的一系列问题。虽然文献[14]和[15]研究了计及输电容量约束的发电公司的竞价策略问题,但所得结果是在确定性数学理论框架内得到的,并未涉及随机或模糊等任何不确定信息。文献[16]在随机数学的框架内研究了考虑输电网络约束的发电公司竞价策略问题,并采用蒙特卡罗模拟法求解,所给出的方法仅限于考虑随机信息的情况。为了提高求解两层随机规划问题的计算效率,在假设竞争对手的报价系数服从正态分布的条件下,文献[17]提出了一种基于互补直接优化求解算法,较好地解决了计及输电容量约束的发电公司竞价策略问题。在需要处理同时具有随机性和模糊性变量的不确定环境下,本文在文献[9]的基础上,建立了考虑输电容量约束的发电公司竞价策略的不确定规划模型,其中同时计及了随机和模糊这两类不确定信息,并设计了新的基于混合算法的求解方法,该方法适用于竞争对手的随机模糊报价系数服从任意分布的情况。最后,通过实际算例验证了所提出模型和算法的可行性和

有效性。

2 数学模型

2.1 基本假设

电力市场中共有 N 个发电公司参与竞价,发电公司 f ($f=1,2,\dots,N$) 位于节点 i ($i \in I$) 的发电机组记为 $f_i \in S_f$, 这里 I 为输电网络节点集合, S_f 为隶属于发电公司 f 的所有发电机组的集合。机组 f_i 的发电成本函数为 $C_{f_i}(q_{f_i}) = b_{f_i}q_{f_i} + 0.5c_{f_i}q_{f_i}^2$ 。假设市场采用线性函数报价规则^[14,15], 即机组 f_i 的报价函数为 $P_{f_i}(q_{f_i}) = k_{f_i}(b_{f_i} + c_{f_i}q_{f_i})$, 其中, b_{f_i} 和 c_{f_i} 为发电机组 f_i 的成本系数且 $b_{f_i} > 0$, k_{f_i} 为该机组的报价系数, q_{f_i} 为发电出力。设节点 i 的负荷效用函数为 $B_{d_i}(q_{d_i}) = p_{d_i}q_{d_i} - 0.5\eta_{d_i}q_{d_i}^2$, 其中, p_{d_i} 和 η_{d_i} 为效用系数, $\eta_{d_i} \geq 0$, q_{d_i} 为节点 i 的负荷需求电量。这样,在以上假设下发电公司 f 单位时间的利润 π_f 为

$$\pi_f = \sum_{i \in I, f_i \in S_f} [\lambda_i q_{f_i} - C_{f_i}(q_{f_i})] \quad (1)$$

式中, λ_i 为发电机组 f_i 所在节点 i 处的市场结清电价, q_{f_i} 为发电机组 f_i 的调度出力, 它们为所有参与市场竞争的发电机组报价系数所构成的向量 \mathbf{k} 的隐函数。每个发电公司的利润函数不仅与自身的竞价策略有关, 而且与其他发电公司的竞价策略也有关。

2.2 交易中心 (ISO) 优化问题

ISO 在获得各发电公司的报价后, 以全社会福利最大为目标, 并计及输电网络约束, 确定各个机组的发电出力 q_{f_i} , 以及节点电价 λ_i , 这样, 考虑输电容量约束的市场清除问题可以描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{q_{di}, q_{fi}, T_{ij}} \sum_{i \in D} (p_{di} q_{di} - 0.5 \eta_{di} q_{di}^2) - \\ \sum_{f_i \in P} (k_{fi} b_{fi} q_{fi} + 0.5 k_{fi} c_{fi} q_{fi}^2) \\ \text{s.t. } q_{di} \geq 0 \quad \forall i \in D \\ 0 \leq q_{fi} \leq q_{fi}^{\max} \quad \forall f_i \in P \\ q_{di} - \sum_{i \in I} q_{fi} + \sum_{j, ij \in A} T_{ij} = 0 \quad \forall i \in I \\ Y_l(T_{ij}) = 0 \quad \forall l \\ |T_{ij}| \leq T_{ij}^{\max} \quad \forall ij \in A \end{array} \right. \quad (2)$$

式中， D 为全体用户节点集合； P 为全体发电机组的集合； A 为全体支路集合； q_{fi}^{\max} 为发电机组 f_i 的容量上限； T_{ij} 、 T_{ij}^{\max} 分别为输电线路 ij 的输电量及最大输电容量； $Y_l(\cdot)$ 为网络中环路 l 的电压方程。

为了更清楚地表述问题，将 ISO 优化问题

(2) 写成如下的向量形式^[17]

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{q, q_d} B(q_d) - C(k, q) \\ \text{s.t. } g(q, q_d, T) = 0 \\ h(q, q_d, T) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

式中， k 为所有竞价机组的报价系数所构成的向量； q 为各发电机组被调度出力向量； q_d 为各负荷需求向量； T 为支路潮流向量； B 为各负荷节点效用之和； C 为 ISO 的实际购买总成本； g 表示等式约束其中包括由基尔霍夫电压定律和电流定律所表示的网络方程； h 表示不等式约束中包括发电出力的上、下限约束和支路潮流极限约束。

2.3 发电公司竞价策略的不确定规划模型

发电公司 f 的最优竞价策略问题是确定 k_{fi} ($f_i \in S_f, i \in I$)，在约束 (2) 或 (3) 的条件下使其利润式 (1) 达到最大，这是一个典型的两层优化问题。由于发电公司不完全知道竞争对手的报价系数，因而，需要基于估计对手的竞价行为来求解上述两层优化问题。本文在不确定理论的框架内，用随机模糊变量来对竞争对手的竞价行为进行估计，即综合使用历史数据和专家经验进行估计，从而通过建立两层不确定规划模型来构造发电公司的最优竞价策略。

当发电公司 f 在竞标过程中，其最优竞价策略为在报价系数的允许范围内以极大化利润的乐观值为目标。这时，在考虑输电容量约束下，发电公司 f 的最优竞价策略可通过求解如下不确定规划得出

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{k_{fi}} \bar{\pi}_f = \max_{k_{fi}} \max_{\bar{\pi}_f} \bar{\pi}_f \\ \text{s.t. } \text{Ch} \left\{ \pi_f = \sum_{i \in I, f_i \in S_f} [\lambda_i q_{fi} - C_{fi}(q_{fi})] \geq \bar{\pi}_f \right\} (\alpha) \quad \beta \\ 1 \leq k_{fi} \leq \bar{k}_{fi} \quad \forall i \in I \\ \lambda_i, q_{fi} \text{ 由式 (2) 或 (3) 确定} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中， α 和 β 是预先给定的置信水平，均在 (0,1)

取值，直接反映了发电公司 f 决策者的风险喜好， α 和 β 越小，风险就越大，反之则越小；

$\max \bar{\pi}_f$ 是发电公司 f 的乐观收益； \bar{k}_{fi} 为竞价机组 f_i 的报价系数 k_{fi} 的允许上限；Ch 为机会测度，机会约束 $\text{Ch}\{\pi_f \geq \bar{\pi}_f\}(\alpha) \quad \beta$ 等价于

$$\sup \{ \gamma | \text{Cr}\{\text{Pr}(\pi_f \geq \bar{\pi}_f) \geq \gamma\} \geq \beta \}$$

式中 Cr 为可信性测度；Pr 为概率测度； λ_i 和 q_{fi} 为由式 (2) 或式 (3) 表示的 ISO 优化问题的解，分别为节点电价和机组 $f_i \in S_f$ 的被调度出力。

3 模型求解

发电公司竞价策略的数学模型 (4) 为典型的两层不确定规划问题。为了求解下层的 ISO 优化问题 (2) 或 (3)，本文采用非线性互补优化方法进行求解^[17]。首先构造拉格朗日函数

$$L = B(q_d) - C(k, q) - \lambda g(q, q_d, T) + \mu h(q, q_d, T) \quad (5)$$

式中， λ 和 μ 为对偶向量。由式 (5) 可得式 (3) 的 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla_q L(q, q_d, T, \lambda, \mu) = 0 \\ \nabla_{q_d} L(q, q_d, T, \lambda, \mu) = 0 \\ \nabla_T L(q, q_d, T, \lambda, \mu) = 0 \\ g(q, q_d, T) = 0 \\ \mu_m h_m(q, q_d, T) = 0 \\ h_m(q, q_d, T) \geq 0 \\ \mu_m \geq 0 \\ m = 1, 2, \dots, M \end{array} \right. \quad (6)$$

式中， M 为式 (2) 或式 (3) 中不等式约束的个数。利用非线性互补函数 $\Psi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2}$ 的以下重要性质^[18]

$$\Psi(a, b) = 0 \Leftrightarrow a \geq 0, b \geq 0, ab = 0 \quad (7)$$

将式 (6) 中的不等式转换为等式条件, 这样, 式 (6) 可转换为一个非线性方程组。在各发电机组报价策略已知的情况下, 通过求解该非线性方程组, 得到发电机组 f_i 所在节点的电价 λ_i 及被调度发电出力 q_{fi} , 进而求得该机组的利润 π_{fi} 。

在求解上层发电公司最优决策问题时, 发电公司 f 的最大乐观利润 $\max \bar{\pi}_f$ 为其报价系数 \mathbf{k}_f 的不确定函数 U

$$\mathbf{k}_f \rightarrow U(\mathbf{k}_f, \xi) = \max \bar{\pi}_f$$

式中, \mathbf{k}_f 表示由发电公司 f 的各竞价机组的报价系数所组成的确定性向量; ξ 表示由对手报价策略所组成的随机模糊向量, 即 $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_f, \xi)$ 。

由于无法确定这个不确定函数的具体形式, 本文采用基于随机模糊模拟, 并嵌入人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN) 的混合算法, 对问题 (4) 进行求解, 具体过程可概括为以下三个步骤:

(1) 在给定报价系数向量 \mathbf{k}_f 下, 确定发电公司 f 的最大乐观利润 $\max \bar{\pi}_f$ 。这个过程可通过对 ξ 的随机模糊模拟来实现^[9,10], 并由此求解由非线性互补函数将式 (6) 转化得到的非线性方程组获得节点电价 λ_i 和机组出力 q_{fi} ^[17], 进而获得最大乐观利润。由于 λ_i , q_{fi} 均为 \mathbf{k}_f 的不确定函数, 为了避免在寻优过程中对由式 (6) 转化的非线性方程组的反复求解, 本文采用了 BP (back propagation) 神经网络来确定 λ_i 、 q_{fi} , 大大提高了计算效率。

(2) 重复上述过程, 产生 W 组数据集, 其输入为发电公司 f 的报价系数向量 \mathbf{k}_f , 输出为发电公司 f 最大乐观利润 $\max \bar{\pi}_f$, 并利用此数据集训练一个神经网络以逼近不确定函数 U :

$$U: \mathbf{k}_f \rightarrow \max \{\bar{\pi}_f | \text{Ch}\{\pi_f \geq \bar{\pi}_f\}(\alpha) \quad \beta\} \quad (8)$$

(3) 利用遗传算法求解不确定规划 (4)。求解过程中, 将上述神经网络嵌入到遗传算法过程中, 最后得到发电公司 f 的最优报价策略 \mathbf{k}_f 及最大的乐观利润 $\max \bar{\pi}_f$ 。

由于神经网络在隐层采用 S (sigmoid) 型传递函数, 输出层采用线性传递函数时, 其三层结构的 BP 神经网络能够逼近任意的非线性映射关系, 非常适合于解决函数逼近问题^[19,20], 因而保证了以上过程的可行性。为了提高神经网络的逼近效果和缩短神经网络的训练时间, 本文采取了多项优化措施:

(1) 训练过程中采用了均匀随机选取样本的方法, 这样, 样本误差的均匀分布特征可保证更好的逼近效果。

(2) 通过逐步增加隐层节点的方法, 来确定隐层神经元的个数, 以满足网络性能要求。这是因为, 当隐层节点数量太少时, 网络从样本中获取的信息能力差, 不足以概括和体现训练集中的样本规律, 拟合效果差, 当隐层节点数量过多时, 又可能把样本中非规律性的成分 (如噪声等) 记牢, 从而出现“过拟合”问题, 反而降低了泛化能力, 此外, 隐层节点数太多还会增加训练时间。

(3) 采用遗传算法训练神经网络, 这是因为训练神经网络在本质上是选取最优的权值以极小化目标输出和实际输出之间的误差, 而遗传算法是求解全局优化问题的有效方法。

在优化神经网络和求解最优报价策略的过程中都要用到遗传算法, 本文采用文献 [21] 提出的一种新型遗传算法, 该算法采用实数编码, 通过引入了不可行种群, 并基于混合拉普拉斯交叉和指数变异构造遗传算子, 数值实验表明, 与经典遗传算法相比该算法具有更强的搜索能力和更高的收敛性能, 非常适用于求解多约束非线性优化问题。

4 算例分析

将本文方法分别在 3 节点系统和 IEEE 30 节点系统上进行实际计算, 其中, 3 节点系统为单机组系统 (即每家发电公司拥有一台发电机组或一台等值发电机组), 30 节点系统为多机组系统 (即每家发电公司在不同节点拥有多台发电机组)。

4.1 3 节点系统

3 节点系统结构如图 1 所示。在图 1 中, 节点 1 既是发电节点又是负荷节点, 其拥有的发电机组为 G1; 节点 2 为负荷节点; 节点 3 是发电节点, 拥有发电机组 G2。整个电力市场中有两个竞争发电公司, 分别拥有发电机组 G1 和 G2。L₁₋₂, L₂₋₃, L₁₋₃ 三条支路的阻抗分别为 0.057 5Ω, 0.185 2Ω, 0.173 7Ω。G1 和 G2 的生产数据见表 1, 发电公司 1、2 的生产成本曲线如图 2 所示。两个负荷参数见表 2。

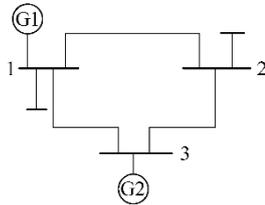


图1 3节点系统

Fig.1 3-bus system

表1 发电机组 G1 和 G2 生产数据

Tab.1 Generator G1 and G2 production data

发电公司	节点	b_{fi} / (百元/MW ² h)	c_{fi} / (百元/MW ² h)	最小容量/MW	最大容量/MW
1	1	2.00	0.003 75	0	160
2	3	1.75	0.017 50	0	100

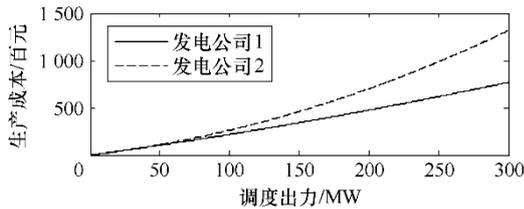


图2 发电公司1和2的生产成本曲线

Fig.2 Quadratic production cost curve of generation company 1 and 2

表2 负荷参数

Tab.2 Load parameters

负荷编号	所在节点	$p_{d,j}$ / (百元/MW ² h)	$\eta_{d,j}$ / (百元/MW ² h)
1	1	10	0.073
2	2	10	0.017

4.1.1 发电公司报价策略与输电容量约束的关系

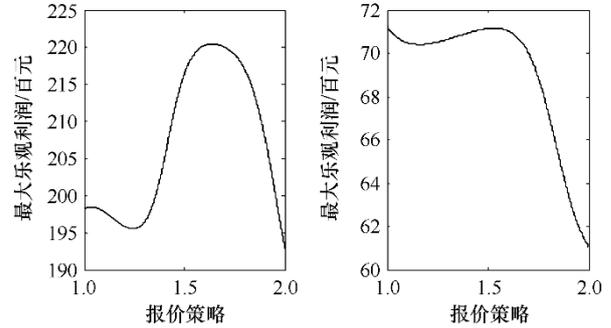
为了计算方便，假设发电公司1、2均采用此方法来构造竞价策略^[16]，均取置信水平 $\alpha = \beta = 0.9$ ，其估计竞争对手报价系数为服从均值为三角模糊变量

ρ_1 、方差为0.022 5的正态分布，这里，

$\rho_1 = (1.4, 1.5, 1.6)$ 。并假设所有竞价机组的报价系数

上限为2。

考虑线路 $L_{1,2}$ 输电约束分别为100MW和25MW的两种情况。此时，由ANN模拟出的报价策略与乐观利润之间的对应关系如图3和图4所示，所求出的最优报价策略及其利润见表3。



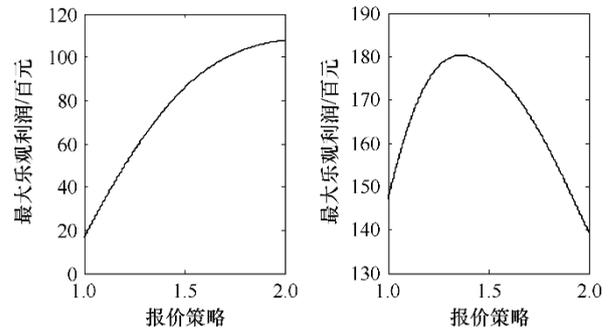
(a) 发电公司1

(b) 发电公司2

图3 输电容量约束为100MW时报价策略与最大乐观利润之间的对应关系

Fig.3 Relation of bidding strategy and maximal

optimistic profit with the 100MW transmission constraints



(a) 发电公司1

(b) 发电公司2

图4 25MW输电约束时报价策略与最大乐观利润之间的对应关系

Fig.4 Relation of bidding strategy and maximal

optimistic profit with the 25MW transmission constraints

表3 最优报价策略及其对应的利润

Tab.3 The optimal strategies and profits

节点1和节点2之间的输电容量约束/MW	发电公司	最优报价策略	最大乐观利润/百元
100	1	1.642 1	220.5
	2	1.000 0	71.2
25	1	2.000 0	107.9
	2	1.365 9	180.3

为了进行比较，表4给出了当所有竞价机组均按边际成本竞价时（即报价系数均为1）发电公司所获得的利润值。

表4 均以边际成本报价时所获利润

Tab.4 The profits for marginal cost

节点1和节点2之间的输电容量约束/MW	发电公司	报价策略	利润/百元
100	1	1.000 0	105.8
	2	1.000 0	41.9

25	1	1.000 0	10.3
	2	1.000 0	121.2

由表 3 和表 4 可以看出：与边际成本竞价相比（即报价系数均为 1），两家发电公司 1 和 2 通过策略性报价均获得了更多的利润；低成本的发电公司 1（见图 2），在较大的输电容量约束下（输电约束为 100MW）获得了比发电公司 2 更多的生产利润；在较小的输电容量约束下（输电约束为 25MW），由于抑制了位于节点 1 的发电公司 1 向节点 2 输送更多电力，发电公司 2 在节点 2 处具有潜在的垄断力，从而，发电成本较高的发电公司 2 比发电公司 1 获得了更多的利润。

4.1.2 梯形模糊变量下的报价策略

假设估计对手机组的报价系数为服从均值为 ρ_2 、方差为 0.022 5 的正态分布，此时， ρ_2 为梯形模糊变量，即 $\rho_2 = (1.4, 1.466, 1.534, 1.6)$ ，其他假设与

4.1.1 小节相同。在线路 L_{1-2} 输电约束分别为 100MW 和 25MW 时，计算发电公司的最优报价策略，其结果列于表 5 中。

表 5 梯形模糊变量的最优策略和利润

Tab.5 The optimal strategies and profits under trapezium fuzzy variables

节点 1 和节点 2 之间的输电容量约束 /MW	发电公司	最优报价策略	最大利润 /百元
100	1	1.648 1	226.9
	2	1.000 0	76.7
25	1	2.000 0	111.7
	2	1.368 0	184.8

比较表 3 和表 5 可知，在其他条件不变、仅当估计对手发电机组的报价系数在细节上有所不同时，此时，分别为三角和梯形模糊变量，最优报价策略和最大利润稍有不同，这从一个侧面说明了本文方法的合理性。

4.1.3 置信水平 α, β 对报价策略的影响

置信水平 α, β 体现了发电公司在竞价过程中所能承受的风险水平。 α, β 越小，风险就越大；反之，越小。在 4.1.2 小节的假设下，并假设节点 1, 2 之间的支路 L_{1-2} 输电容量约束为 25MW。当发电公司 1 报价系数上限为 2 时，在不同的置信水平下，分别计算发电公司 1 和 2 的最优报价策略，结果见表 6。

表 6 不同置信水平下的最优报价策略

Tab.6 The optimal bidding strategies in different

confidence levels			
发电公司	置信水平 $\alpha = \beta$	最优报价策略	最大乐观利润 /百元
1	0.9	2.000 0	107.9
	0.8	2.000 0	117.5
	0.7	2.000 0	123.5
	0.6	2.000 0	128.8
	0.5	2.000 0	134.1
2	0.9	1.365 9	180.3
	0.8	1.369 1	189.1
	0.7	1.377 2	196.1
	0.6	1.379 0	200.4
	0.5	1.381 9	204.5

由表 6 可以看出，随着发电公司所承受的风险水平的提高，其预期利润增加。这说明，若发电公司要获得更高的预期利润就必须承受更大的风险。

4.2 IEEE 30 节点系统

考虑修改后的 IEEE 30 节点系统^[17]。该系统包含 41 条支路，9 台分属 3 个发电公司 ($f = 1, 2, 3$) 的发电机组和 9 个负荷。发电机组所在节点所属公司及其各项生产数据见表 7，各负荷参数见表 8。

表 7 发电机组生产数据

Tab.7 Generator Production data

发电公司	节点	b_{fi} /(百元/MW ² h)	c_{fi} /(百元/MW ² h)	最小容量/MW	最大容量/MW
1	1	2.00	0.003 75	0	160
	8	3.00	0.025 00	0	150
	16	2.25	0.035 00	0	120
2	2	1.75	0.017 50	0	100
	11	3.25	0.008 34	0	130
	19	3.10	0.009 25	0	130
3	5	1.00	0.062 50	0	110
	13	3.00	0.025 00	0	120
	23	2.85	0.026 50	0	150

表 8 负荷参数

Tab.8 Load parameters

负荷编号	所在节点	p_{di} /(百元/MW ² h)	η_{qi} /(百元/MW ² h)
1	2	10	0.073
2	5	10	0.017
3	7	10	0.069
4	8	10	0.053
5	12	10	0.137

6	21	10	0.093
7	10	10	0.056
8	19	10	0.068
9	23	10	0.086

以发电公司 1 为研究对象。假设：其估计竞争对手报价行为服从均值为 ρ_3 、方差为 0.022 5 的正态分布，其中， $\rho_3 = (1.4, 1.5, 1.6)$ 为三角模糊变量；

发电公司 1 所有机组的报价系数上限均为 2；所有支路的潮流约束为 100MW。计算过程中，取置信水平 $\alpha = \beta = 0.9$ 。

基于随机模糊模拟求解 ISO 优化问题，产生以决策变量为输入和以节点电价及发电公司 1 的各竞价机组被调度出力为输出的输入/输出数据 1200 组，并由此训练一个神经网络。产生用于逼近不确定函数 U 的神经网络训练样本 500 组，并由此训练另一个神经网络。利用文献 [21] 给出的改进遗传算法（群体规模为 50，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.2）迭代 1 000 代求得最优结果为：报价策略 $k_1 = (2.000\ 0, 1.000\ 0, 1.037\ 9)$ ，其最大乐观利润 $\max \bar{\pi}_1 = 581.7$ 百元。本文为了计算方便假设发电公司 2、3 也均采用此方法来确定竞价策略，类似可求出发电公司 2、3 的最优结果为： $k_2 = (1.945\ 6, 1.402\ 4, 1.203\ 1)$ ， $\max \bar{\pi}_2 = 699.6$ 百元；

$k_3 = (1.157\ 4, 1.053\ 7, 1.019\ 6)$ ，

$\max \bar{\pi}_3 = 425.6$ 百元。此时，全社会总福利，即

ISO 优化问题 (2) 的目标函数值为 3 233.5 百元。

当发电公司 1、2、3 均以边际成本报价时，即 $k_1 = k_2 = k_3 = (1, 1, 1)$ ，经计算，3 个发电公司获得的利润分别为： $\pi_1 = 141.9$ 百元， $\pi_2 = 324.1$ 百元， $\pi_3 = 297.1$ 百元。此时，全社会总福利为 3 448.9 百元。

从上述计算结果可以看出：

(1) 策略报价使各个发电公司的利润大大增加，但造成了全社会总福利的下降。也就是说，发电公司的策略性竞价过程虽能增加其自身利润，但造成了全社会资源的浪费。

(2) 与边际成本报价相比，采用策略性竞价后虽然所有发电公司的利润增加了，但由于不同竞价机组所处的网络位置优势不同，发电公司利润的增

加值有很大不同。例如，在边际成本报价时，发电公司 1 的利润小于发电公司 3 的利润，但使用策略报价后发电公司 1 的乐观利润大于 3 的乐观利润。这说明，发电公司竞价机组的网络位置与其实现利润密切相关，这个结论有别于不考虑输电容量约束的结果。

5 结论

本文从不确定理论出发，较为系统地研究了发电公司的竞价策略问题，其中考虑了输电容量约束等网络约束问题。通过具体算例，在 3 节点系统中分别在多种输电约束条件，多种随机模糊估计，多种置信水平条件下进行了计算，在 IEEE 30 节点系统中针对多家发电公司并拥有多个机组的复杂情况进行了计算，并对这些计算结果进行了比较分析，结果表明所提出的方法是合理和可行的，能够为发电公司在实际的电力市场环境下构造更加合理的竞价策略。

本文的方法亦可应用于不确定电力市场环境下的其他利益主体构造最优竞价策略问题。

参考文献

- [1] 马莉, 文福拴, DAVID A K. 采用分段报价规则的竞价策略初探[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 16-19.
Ma Li, Wen Fushuan, A K David. A preliminary investigation on bidding strategies employing step-wise bidding rules[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 16-19.
- [2] Wen F S, David A K. Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 15-19.
- [3] 张晓东, 高波, 宋之平. 发电企业竞标策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 153-157.
Zhang Xiaodong, Gao Bo, Song Zhiping. The study of bidding strategies for a power supplier[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 153-157.
- [4] 赖菲, 丁振华, 张崇见, 等. 发电商的风险竞价策略选择[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 65-67.
Lai Fei, Ding Zhenhua, Zhang Chongjian, et al. Risk control for power suppliers in power market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1):

- 65-67.
- [5] Wen F S, David A K. Coordination of bidding strategies in day-ahead energy and spinning reserve markets[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2002, 24(4): 251-261.
- [6] Mattson C, Lucarella D, Liu C C. Modeling a competitor's bidding behavior using fuzzy inference networks[C]. *International Conference on Intelligent System Applications in Power Systems*, Budapest, Hungary, 2001: 1117-1130.
- [7] 马林, 谢敦礼. 模糊博弈理论在发电厂商报价决策中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(17): 15-18. Ma Lin, Xie Dunli. Application of fuzzy game theory to bidding decision of power producers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(17): 15-18.
- [8] 杨莉, 文福拴, 吴复立, 等. 基于可能性理论的发电公司最优报价策略[J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(23): 12-17. Yang Li, Wen Fushuan, Wu Fuli, et al. A possibility theory based approach for building optimal bidding strategies in electricity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(23): 12-17.
- [9] 马新顺, 刘建新, 文福拴. 不确定环境下的随机模糊规划最优报价策略模型[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(34): 77-83. Ma Xinshun, Liu Jianxin, Wen Fushuan. Random-fuzzy programming model for developing optimal bidding strategies in the uncertain environment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(34): 77-83.
- [10] Liu B. Uncertainty theory: an Introduction to its axiomatic foundations[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [11] Liu B. A survey of credibility theory[J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2006, 5(4): 387-408.
- [12] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的水火发电机组检修计划[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(13): 14-19. Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Hydro-thermal generator maintenance scheduling based on credibility theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(13): 14-19.
- [13] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的输电网络短期线路检修计划[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(4): 65-71. Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Short-term transmission line maintenance scheduling based on credibility theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(4): 65-71.
- [14] Hobbs B F, Merzler C, Pang J S. Strategic gaming analysis for electric power system: An MPEC approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(2): 638-645.
- [15] 王晔, 李渝曾, 张少华. 求解电力市场均衡模型的非线性互补方法[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(1): 7-12. Wang Xian, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. A nonlinear complementary approach to the solution of equilibrium models for electricity markets [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(1): 7-12.
- [16] 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.
- [17] 马新顺, 文福拴, 刘建新. 计及输电容量约束的发电公司最优报价策略[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(10): 6-10. Ma Xinshun, Wen Fushuan, Liu Jianxin. Development of optimal bidding strategies for generation companies considering transmission capacity constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(10): 6-10.
- [18] Facchinei F, Kanzow C. A nonsmooth inexact Newton method for the solution of large-scale nonlinear complementarity problems[J]. *Mathematical Programming*, 1997, 76(3): 493-512.
- [19] Simon Haykin. *Neural networks: a comprehensive foundation*[M]. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [20] 黄忠明, 吴志红, 刘全喜. 几种用于非线性函数逼近的神经网络方法研究[J]. *兵工自动化*, 2009, 28(10): 88-92. Huang Zhongming, Wu Zhihong, Liu Quanxi. Research on several neural network methods applied in nonlinear function approximation[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2009, 28(10): 88-92.

- [21] Ma X S. A new hybrid evolution genetic algorithm with laplace crossover and power mutation[C]. 2009 International Conference on Computational Intelligence and Security, Beijing, China, 2009: 88-91.

作者简介：祝全乐 男，1983年生，博士研究生，研究方向为电力市场。马新顺 男，1964年生，博士，教授，主要从事最优化理论及电力市场竞价策略方面的研究。