

基于改进的 PSO 算法求解电力公司最优报价策略

唐江桦, 罗可, 赵志学

TANG Jiang-hua, LUO Ke, ZHAO Zhi-xue

长沙理工大学 计算机与通信工程学院, 长沙 410076

College of Computer and Communication Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China

E-mail: tjh0259@163.com

TANG Jiang-hua, LUO Ke, ZHAO zhi-xue. Improved PSO algorithm based optimal bidding strategy for generating company. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(24): 212-214.

Abstract: The optimal quoted price function model for a power producers is a bi-level mathematical programming problem in which the upper optimization is to maximize the benefit whilst the lower one is to maximize the benefit model. The heuristic approach can be an alternative to solve the model above with simplicity and immune to the local optima. Particle Swarm Optimization (PSO) integrating with the heuristic approach is then presented in this paper to obtain the optimal quoted price functions for power producers. In addition, the result of the model proposed is compared with that of the deterministic approach, the IEEE 30-bus system has proved the feasibility of the proposed model.

Key words: bi-level optimization model; Particle Swarm Optimization (PSO); bidding strategy

摘要: 电力公司报价策略是一个双层优化问题, 其中上层的 ISO 是保证社会公共效益最大化而制定的市场清除价模型, 确定参与发电的电力公司, 下层是基于发电公司利润最大的模型。采用启发式算法求解简单易行, 最优解具有全局性, 且与初始点选择无关。运用改进后的粒子群优化算法 (PSO) 求解电力公司利润最大的优化问题, 并与确定性方法的计算结果进行了比较。在 IEEE30 节点 6 机系统验证了该方法的有效性。

关键词: 两层优化模型; 粒子群优化算法; 报价策略

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.24.064 文章编号: 1002-8331(2008)24-0212-03 文献标识码: A 中图分类号: TP39

由经济学理论可知, 在理想、完全竞争的电力市场中, 发电公司的最优报价是其边际运行成本。但由于发电行业存在投资壁垒和尚未具有一定的经济规模特性等原因, 使未来电力市场不可能是完全竞争的, 而是更接近于寡头垄断。这样, 发电公司有可能采用报高价 (大的发电公司甚至可以采用容量滞留的方式) 来获得更大的利润, 这就是所谓的策略性报价。而发电公司面临的一个重要问题就是如何得到最优报价系数, 从而被 ISO 选中同时获得最大化的利润, 实现风险最小而利润最大化。研究电力公司的最优化报价策略已经成为国内外研究的热点问题。文献[1]提出了 ISO 与发电公司的双层优化问题, 其中 ISO 的效益最大化是基于电力公司利润最大化之上的。到目前为止, 这一思想构成了研究发电公司最优策略和由此衍生的多发电商博弈竞价策略的框架^[2-3]。

从最优化问题求解角度来看, 总的可以分为两大类不同的处理方式: (1) 确定性的方法求解两层优化问题, 文献[4-5]介绍了分支界定法、牛顿搜索法、网络搜索法和惩罚函数法。(2) 启发式方法; 文献[6]介绍了一种优化基因法, 用以求解两层线性

规划问题。本文所用的粒子群算法是由 Kennedy 和 Eberhart 博士于 1995 年受人工生命研究结果启发, 而提出的一种基于群体智能的进化计算方法^[7]。PSO 算法的提出受到了研究者的广泛关注, 并在函数优化、聚类、预测理论中获得成功的运用。在电力系统领域, 文献[8]介绍了 PSO 算法在电力系统中的应用。在 PSO 算法的改进方面, 文献[9]提出了无约束优化问题和多目标优化的 PSO 算法; 文献[10]提出了 PSO 算法在有约束问题上的应用方法; 然而, 结合 PSO 算法求解发电公司报价策略的有约束的两层优化问题文献却很少。为此本文借鉴以上文献的部分研究成果, 将其改进应用于对发电公司最优策略模型计算, 获得发电公司的最优报价策略。

1 改进有约束的粒子群算法

1.1 算法介绍

PSO 算法是一种实数域内的进化算法。每一个粒子知道当前个体的最优值 (Pbest Value)、群体中最优值 (Gbest Value) 和与其对应的位置 (Pbest Potion/Gbest Potion)。每个粒子也知道

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60474070, No.10471036); 湖南省教育厅重点项目 (No.07A001); 湖南省科技厅项目 (No.05FJ3074)。

作者简介: 唐江桦 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事数据挖掘、电力系统分析研究; 罗可 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事数据挖掘、计算机应用, 电力系统分析等研究。

收稿日期: 2007-10-25 **修回日期:** 2008-01-21

当前值(位置), 并跟踪当前的最优粒子。基本的粒子群模型在一个 n 维的空间内, m 个粒子组成的群体与进化代数 t 相关的粒子位置 P_t^j 及速度 V_t^j 构成, 表示:

$$P_t^j = (p_{1,t}^j, p_{2,t}^j, \dots, p_{i,t}^j, \dots, p_{n,t}^j)$$

$$V_t^j = (v_{1,t}^j, v_{2,t}^j, \dots, v_{i,t}^j, \dots, v_{n,t}^j)$$

式中: $j=1, 2, \dots, m$, 代表粒子的编号; $i=1, 2, \dots, n$, 是粒子位置元素的编号; t 是进化的代数。因此在 $t+1$ 代, 粒子 J 的速度更新表达式为:

$$V[t+1] = V[t] + C_1 \cdot \text{Rand}() [P_{\text{Best}} - V[t]] + C_2 \cdot \text{Rand}() [G_{\text{Best}} - V[t]]$$

粒子 J 位置的更新表达式为:

$$P[t+1] = P[t] + V[t]$$

C_1, C_2 是常数, $\text{Rand}()$ 是在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。

1.2 改进 PSO 算法的描述

- (1) 对于每个粒子, 初始化粒子;
- (2) 对于每个粒子, 计算适应度值。如果该适应度值好于历史最好适应度值(Pbest), 则令当前值作为新的 Pbest;
- (3) 选取所有粒子中具有最好适应度的粒子作为 Gbest 粒子;
- (4) 对于每个粒子, 按照方程计算粒子速度, 并更新粒子位置。因为发电公司和 ISO 都存在多种约束, 是一种在约束条件下的求最优解, 所以在更新粒子位置时出现违反约束条件的情况时, 应在适应值计算中进行惩罚。在这里采用适应度函数式(1)。

$$F(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & g_j(\bar{x}) \leq 0, \forall j=1, 2, \dots, m \\ f_{\text{max}} + \sum_{j=1}^m \langle g_j(\bar{x}) \rangle, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $g_j(\bar{x}) \geq 0$ 时, 取 $g_j(\bar{x})$ 的值, $g_j(\bar{x})$ 为要求解的函数, 在本文中 $g_j(\bar{x})$ 为式(5)。当 $g_j(\bar{x}) < 0$ 时, 取 0 值; f_{max} 是群体中最差可行个体的适应度值, 如群体中没有可行个体时则为零。对不可行解的度量通过 $f_{\text{max}} + \sum_{j=1}^m \langle g_j(\bar{x}) \rangle$ 实现, 不可行解将在选择的压力下逐渐向可行域靠近, 当进入可行域后又会在的压力下逐渐接近最优解。

(5) 同时在 PSO 约束问题求解的过程中引入文献[10]提出的半可行域。因为大部分的约束问题的解都在边界附近求得, 在可行域边界附近的不可行解用目标函数来评价要更有效。所以定义搜索空间内的任一点 \bar{x} 和可行域 F 之前的距离为:

$$d(\bar{x}, F) = \max\{0, g_{\text{max}}(\bar{x})\} \quad (2)$$

$$g_{\text{max}}(\bar{x}) = \{g_i(\bar{x}), i=1, 2, \dots, m\}$$

判定条件 if $d(\bar{x}, F) = 0$ then $\bar{x} \in F$ 。所以针对 PSO 算法根据文献[11]提出的 PSOSelect() 函数: (1) 形成一个半可行域, 保证 PSO 算法中全局 Gbest 一定在半可行域中; (2) 当群体中有利个体达到一定的比例时, PSOSelect() 将逐渐减小半可行域的宽度, 直至半可行域为零, 使所有个体全部在可行域, 找到在边界上的最优解。

2 发电公司报价模型

2.1 发电公司报价模型

本文所讨论的电力市场包括 I 家发电公司, 为了使问题简单化, 假设每一个发电公司只有一台发电机组, 而且设定研究对象为稳健型发电公司, 对风险的喜好为中等, 一般取值为 0.5 左右。所以每个电力公司需要给定报价函数为:

$$S_i(q_i) = a_i + b_i q_i (i=1, 2, \dots, n)$$

$(x_i, x_{-i}) = (a_i, b_i)$ 是发电公司的报价参数, q_i 是发电量。那么发电公司的成本函数为:

$$C_i(q_i) = A_i q_i + 0.5 B_i q_i^2 (A_i, B_i \text{ 为常量, 每个发电公司都不同})$$

那么可以得发电公司的利润模型为:

$$\text{Max} \pi_i(x_i, x_{-i}) = \lambda_i(x_i) q_i(x_i) - [A_i q_i + 0.5 B_i q_i^2] \quad (3)$$

其中 λ_i, q_i 是结点 i 的价格和发电量都由 ISO 确定。在这里发现发电公司报高价时可以获得较高的利润, 但同时面对可能不被 ISO 调度从而承担相应的风险, 本文涉及到了兼顾风险的报价策略, 因为其它发电公司的报价参数直接影响到报价参数的确定。这里假定以 i 家发电公司为研究对象, 设其它竞争对手服从正态分布 $x_{-i} \cdot N(\bar{x}_{-i}, V_{-i})$:

$$P_{-i}(x_{-i}) = \frac{1}{(2\pi)^{(2l-2)/2} |V_{-i}|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (x_{-i} - \bar{x}_{-i})^T V_{-i}^{-1} (x_{-i} - \bar{x}_{-i})\right] \quad (4)$$

2.2 ISO 市场清除价对发电公司报价的约束

ISO 在考虑社会效益最大化和最大的网络约束的条件下进行最优调度。最优化调度的模型为:

$$\begin{aligned} \max(q, d): W(x, q, d) &= B(d) - C(x, q) \\ \text{s.t.}: g(q, d) &= 0 \\ h(q, d) &\leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$B(d) = \sum_{j=1}^J (p_j d_j - 0.5 \eta_j d_j^2) \quad C(x, q) = \sum_{i=1}^I (a_i q_i + 0.5 b_i d_i^2)$$

$d = (d_1, d_2, \dots, d_J)$ 是网络的需求, $q = (q_1, q_2, \dots, q_I)$ 是发电公司的发电量, $B(d)$ 是效率函数, 而 $C(x, q)$ 是成本函数。 $h(q, d)$ 表示系统运行约束和发电机出力约束, $g(q, d)$ 表示各节点的功率平衡等式约束。转化成 KKT 系统得:

$$L(x, q, d, \lambda, \mu) = -W(x, q, d) + \lambda^T g(q, d) + \mu^T h(q, d)$$

ISO 优化时必须保证以下方程:

$$\Phi(x, q, d, \lambda, \mu) = \begin{pmatrix} \nabla_x L(x, q, d) \\ \nabla_q L(x, q, d) \\ g(q, d) \\ \varphi(\mu_i, h_i(q, d)) \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

3 求解方法

本文针对发电公司报价策略模型为双层优化的特点, 对 PSO 算法流程进行改进, 得到新的流程图如图 1 所示。

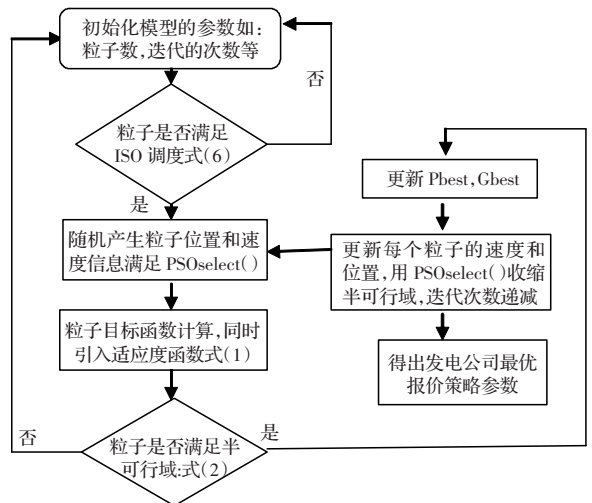


图 1 PSO 算法对发电公司模型优化流程图

PSO 算法随机产生粒子,每个粒子代表发电公司待优化参数,从样本数据中选择服从式(4)的 X_i ,再对每个产生的粒子进入 ISO 优化调度,得到价格和相应的调度产量(A_i, B_i, λ_i, q_i),进行粒子适应值的计算,同时用 PSOSelect()对约束条件进行适当的放大形成一个半可行域,在粒子更新的时候用 PSOselect 保证所有的个体都在半可行域内,否则重新生成一对新的粒子,重新计算。如果满足式(6),根据其提供的适应度函数对粒子的适应值进行计算。在迭代的过程中不断的保存最优粒子和上层模型式(3)所计算出 Pbest 的值,再根据 ISO 计算调度以确定参数,进入下一层优化如式(3)得到 Gbest。完成以后对可行域进行调节。两层优化问题最重要的是在半可行域的收缩的快慢。因此,从表面上看,上层优化问题仅有 4 个变量,但在实际的下层优化问题上,每一步的计算都引用了上层优化的结果,合理的调节半可行域、淘汰上层提供的变量直接影响到结果质量。

4 算例分析

4.1 仿真结果与分析

本文是基于 PSO 算法对发电公司两层优化问题求解的实例数据采用 IEEE 30 节系统模拟电力传输网络数据,分别为发电公司技术与经济参数表、ISO 负荷需求参数表。

表 1 发电公司的技术和经济参数

节点	A_i	B_i	q_{\min}	q_{\max}
1	2.00	0.008 75	50	160
2	1.75	0.035 00	50	100
13	1.00	0.062 50	30	80
22	3.15	0.003 34	30	80
23	3.00	0.015 00	10	60
27	3.00	0.015 00	10	60

注:因为本文只讨论一个发电公司只有一台机组, q_{\min}, q_{\max} 的单位为 MW。

表 2 ISO 负荷需求函数参数

节点	2	3	4	7	8	10	12	14	15	16
P_i	60	65	55	50	55	60	50	70	65	60
η_i	-1.10	-1.20	-1.30	-1.00	-1.20	-1.80	-1.50	-1.25	-1.30	-1.40
节点	17	18	19	20	21	23	24	26	29	30
P_i	55	60	55	55	60	70	65	65	60	70
η_i	-1.25	-1.40	-1.10	-1.20	-1.50	-1.80	-1.75	-1.60	-1.55	-1.20

PSO 算法的基本参数为:粒子为 5 维数组(Swarm $[x, q, d, \lambda, \mu]$),粒子数为 20,最大迭代次数为 200, C_1, C_2 取值为 2,每 20 次迭代收缩半可行域 1/10。这里假定以 2 号发电公司为研究对象,引用文献[12]的计算结论, A_2 的搜索范围为[1.75, 1.1*1.75], B_2 的搜索范围为[0.5*0.035 00, 10*0.035 00],同时假设 q, d 相等其搜索范围为 $[q_{\min}, q_{\max}]$, $g(q, d)$ 中的 θ 向角取值为 3° 。在这里每个粒子在迭代之前要满足式(6)的要求,否则抛弃,重新再取。经过五次调用本文算法,发电公司第一层优化算法根据式(5)计算得出的最好结果(A_i, B_i, λ_i, q_i)且满足第二层模型如式(3)计算出(Max π)的结果如表 3。

根据以上迭代结果得出 2 号发电公司的最优报价参数 $A_2=1.777, B_2=0.037 45, q_2=50.25$,此时的市场清除价为 4.058 美

表 3 迭代结果表

调用次数	A_i	B_i	q_i	λ_i	Max π
1	1.750	0.037 042	62.48	4.046	71.152 718 84
2	1.821	0.032 041	63.54	4.058	77.458 909 10
3	1.805	0.036 420	65.32	4.074	70.514 429 30
4	1.765	0.037 036	61.79	4.056	70.859 090 08
5	1.767	0.034 450	61.77	4.037	74.495 345 80

注: $q_2, \lambda_2, \text{Max}\pi$ 的单位分别为 MW。

元,最大利润为:77.459 美元。

4.2 算法性能分析

优化问题直接解法是把双层优化转化为 KKT 系统然后调用 Matlab 的 fmincon 有约束的非线性最小化工具箱,把目标函数取负求得最大值。本文提出的改进 PSO 算法的计算结果与文献[12]提出的直接优化计算方法得出的结果进行了比较,结果如表 4。

表 4 两种算法结果比较

算法类型	A_i	B_i	q_i	λ_i	Max π
直接优化计算	1.750	0.037 041	61.79	4.038 6	74.698
改进的 PSO 求解方法	1.821	0.032 041	63.54	4.058 0	77.459

从以上比较分析可得,本文提出的算法能够求解出更合理的报价参数,更加准确地确定市场清除价,最终计算出发电公司的最大利润,使发电公司得到更大的收益。

5 结束语

PSO 是一种启发式求解最优化问题的方法,从用于解决电力公司最优化报价问题的应用来看,该方法简单、实用性强、收敛速度快。对 IEEE.30 节系统模拟电力传输网络数据仿真测试表明,该算法能够更好地获得全局最优解,具有重要的实用意义。

参考文献:

- [1] 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, 1999, 12: 682-687.
- [2] 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.
- [3] Ferrero R W, Rivera J F, Shahidehpour S M. Application of games with INCOMPLETE information for pricing electricity in deregulated power pools[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 184-189.
- [4] Hansen P, Jaumard B, Savard G. New branch-and-bound rules for linear bilevel programming[J]. SIAM Journal on Science and Statistical Computing, 1992, 13(5): 1194-1217.
- [5] Savard G, Gauvin J. The steepest descent direction for the nonlinear bi-level programming problem[J]. Operations Research Letters, 1994, 15(5): 265-273.
- [6] Oduguwa V, Roy R. Bi-level optimization using genetic algorithm[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Artificial Intelligence System Divnomorskoe, 2002: 322-327.

(下转 221 页)