

文章编号: 1001-0920(2002)04-0450-04

禁忌搜索协调的多智能体优化方法及其应用

韩 水¹, 汪定伟²

(1. 辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006; 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 针对电力市场下电力购买与配送计划优化问题, 提出基于多智能体的模型求解算法。为使多智能体能够有序竞争有限资源, 采用禁忌搜索算法进行协调。算法的本质是对智能体使用资源的优先顺序进行优化排序。将该算法用于实际电力系统的购-配电计划优化, 取得了满意的结果。

关键词: 多智能体; 禁忌搜索; 最优化; 电力市场; 购电计划

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

Optimization approach of multi-agent system with tabu search coordination and its application

HAN Shui¹, WANG Dingwei²

(1. Liaoning Electric Power Co. Ltd, Shenyang 110006, China; 2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: To optimize the electric power purchase and distribution planning, a multi-agent based approach is proposed. Tabu search is applied to coordinate the resource competition of all agents. The based idea is to optimize the priority sequence of agents to utilize resources. The approach is applied into the power distribution problem and satisfactory results are achieved.

Key words: multi-agent; tabu search; optimization; electric power market; power purchase planning

1 引 言

多智能体系统(MAS)以其很强的自治性、分布性特点和自组织、自适应能力,在许多领域获得广泛的应用^[1]。近年来,MAS在决策与优化领域也获得了应用^[2]。由于各种Agent在系统中都能自主地竞争资源,因此在资源受限的优化问题中,如何基于系统的整体目标对各个Agent进行协调,便成为一个重要的问题。

另一方面,禁忌搜索(TS)自20世纪80年代初

提出后^[3],已成为一种广为应用的智能优化方法。但是,TS只能用来求解离散优化问题,对于应用更广的实优化问题则显得能力不足。为此,本文提出一种基于多智能体的用禁忌搜索协调的优化方法。该方法的实质是让各个Agent尽可能主动地选用所需要的资源,而用TS根据各个Agent对整体目标的贡献确定各个Agent使用资源的优先顺序。将该方法用于实际电网在电力市场条件下的购电-配电计划优化问题^[4],取得了良好的应用效果。

收稿日期: 2001-11-19; 修回日期: 2002-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(60084003, 70171056)

作者简介: 韩水(1958—),男,辽宁大连人,副总经理,教授级高工,从事电力市场理论、电力系统运行等研究;汪定伟(1948—),男,江西彭泽人,教授,博士生导师,从事制造系统建模与优化、智能计算与软计算等研究。

2 问题描述与模型

在电力市场“厂网分开”和“竞价上网”的条件下^[4], 如何最经济地从不同电厂购买电力, 在极小化输电费用且不发生线路拥塞的前提下将电力配送给各用电城市, 是一个亟待解决的优化问题^[5]。根据电力系统中长期计划中经济决策与系统运行技术分析应分别进行的思想^[6], 本文提出如下数学模型:

一个电网可表达为由发电、用电两类节点和代表输电线路的边组成的连通图, 记为

$$G = \{S, D, E\} \quad (1)$$

其中, $S = \{1, 2, \dots, n_1\}$ 为发电厂 n_1 个节点的集合, $D = \{n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2\}$ 为用电城市 n_2 个节点的集合, $E = \{(i, j), i, j \in S \cup D\}$ 为输电线路的边的集合。

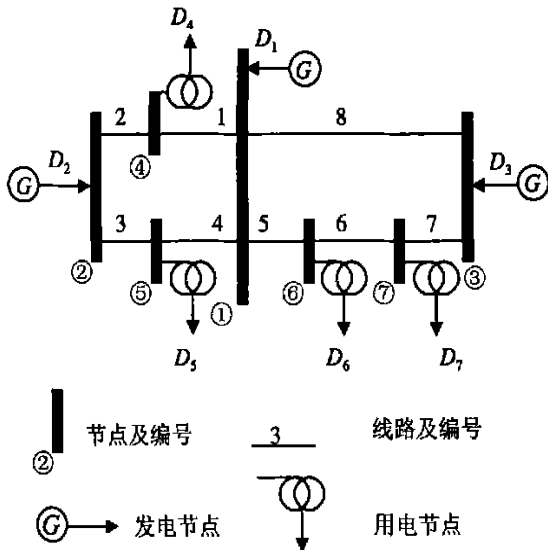


图 1 实际电网举例

一个实际电网如图 1 所示。其中节点 1 ~ 4 是发电节点, 节点 5 ~ 8 是用电节点, 连接各节点的 8 条边是输电线路。

设在计划期内, 已知发电厂 $i, i = 1, 2, \dots, n_1$, 发电量的上下限分别为 b_i 和 B_i , 其批量折扣电价可表达为发电量 x_i 的分段函数

$$p_i(x_i) = \begin{cases} p_i^1, & b_i \leq x_i < B_i \\ p_i^2, & x_i \geq B_i \end{cases} \quad (2)$$

设城市 i 的电量需求为 $d_i, i = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$; 线路 (i, j) 的最大输电量为 $A_{ij}, (i, j) \in E$ 。输电成本为输电量 y_{ij} 的二次函数, 即 $q_{ij}(y_{ij}) = a_{ij}y_{ij} + b_{ij}y_{ij}^2$, 可用逐线计算的综合成本法或长期边际成本法获得。输电线路损失也是 y_{ij} 的二次函数, 即 $s_{ij}(y_{ij}) = h_{ij}y_{ij}^2$, 可由线路参数计算获得。问题的

目标是如何在满足所有城市用电需要的前提下制定购电 - 输电计划, 使费用的总和达到极小。

设模型变量 x_i 为从电厂 i 购得的电量, $i = 1, 2, \dots, n_1$; y_{ij} 为线路 (i, j) 上从节点 i 到节点 j 的输电量, $(i, j) \in E$ 。则问题可表达为一个二次规划模型

$$\min \sum_{i=1}^n p_i(x_i)x_i + \sum_{(i,j) \in E} q_{ij}(y_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } x_i + \sum_{(i,j) \in \text{In}_i} [y_{ij} - s_{ij}(y_{ij})] - \sum_{(j,i) \in \text{Out}_i} y_{ji} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in \text{In}_j} [y_{ij} - s_{ij}(y_{ij})] - \sum_{(j,i) \in \text{Out}_j} y_{ji} = d_j$$

$$j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2 \quad (5)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq A_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (6)$$

$$b_i \leq x_i \leq B_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_1 \quad (7)$$

其中, In_i 和 Out_i 分别表示电量流入和流出节点 i 的线路的集合。

模型 (3) 是由购电费用和输电费用构成的目标函数, (4) 和 (5) 分别为发电节点和用电节点的电量平衡条件, (6) 和 (7) 为变量的上下界约束。以上模型看似一个二次规划模型, 但是由于发电厂的电价函数 $p_i(x_i)$ 是分段函数, In_i 和 Out_i 在计算中是随电力流向而变化的, 因此不能用普通的二次规划算法求解。

3 基于多智能体的求解方法

在电力系统中, 发电厂、用电城市和输电线路是以服从整体协调的自治个体参加系统运行的, 因此适合用多智能体系统来求解购电 - 输电计划问题^[6]。

3.1 多智能体的运行规则

系统中的智能体及其运行规则如下:

3.1.1 发电 Agent

包括接受询价和电量出售两个操作:

1) 接受询价: 一旦接到城市 Agent 询价:

IF (预购量 $b_i \leq x_i \leq B_i$) THEN

接受预购并返回费用 $x_i p_i(x_i)$;

IF (预购量 $x_i > B_i$ 或 $x_i < b_i$) THEN

返回可供量 B_i 或 b_i 和费用 $B_i p_i(B_i)$ 或 $b_i p_i(b_i)$ 。

2) 售电确认: 一旦接到城市 Agent 的购电确认, 则

冻结售电计划, 令发电能力 $B_i \leftarrow B_i - x_i$ 。

3.1.2 输电 Agent

包括接受询价和输电确认两个操作:

1) 接受询价: 一旦接到城市 Agent 询价:

IF (预订输电量加线损 $y_{ij} + s_{ij}(y_{ij}) > A_{ij}$)

THEN 接受预订, 返回费用 $q_{ij}(y_{ij})$;

IF (预订输电量加线损 $y_{ij} + s_{ij}(y_{ij}) > A_{ij}$)

THEN 返回可能输电量 A_{ij} 和费用 $q_{ij}(A_{ij})$ 。

2) 售电确认: 一旦接到城市 Agent 的输电确认, 则

冻结输电计划, 令输电能力 $A_{ij} = A_{ij} - y_{ij}$ 。

3.1.3 城市 Agent

包括购电与输电询价, 选择最优输电方案, 确认负荷满足 3 个操作:

1) 询价操作: 对城市 $j, j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$, 从相邻线路开始到电厂为止, 询问输电能力和价格, 得到从电厂 i 可获得的供电量

$$z_j(i) = \min\{x_i, y_{ji}, (j, i) \text{ 为经过线路}\}$$

费用为

$$F_j(i) = z_j p_i(z_j) + q_{ij}(y_{ji})$$

2) 选择输电方案, 对城市 $j, j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$:

$$\text{IF } (i^* = \arg \min\{F_j(i)/z_j(i)\})$$

THEN 选择电厂 i^* 供电, 并向电厂 i^* 和经过线路发出购电和输电确认信息。

3) 确认负荷

$$\text{IF } (z_j(i^*) < d_j) \text{ THEN } d_j = d_j - z_j,$$

再次执行询价操作;

$$\text{IF } (z_j(i^*) < d_j) \text{ THEN 返回。}$$

注 1 当出现一条线路上不同城市 Agent 要求的输电方向相反时, 则按重叠量交换负荷, 即交换两城市的供电节点。最后根据交换负荷后的潮流计算目标值。

3.2 多智能体的协调方法

由于多个城市 Agent 相互争夺发电和输电资源, 必须对多智能体进行协调。协调工作包括选择优先序和交换负荷两部分。

设 n_2 个城市选择输电资源的优先序为 $H = [h_1, h_2, \dots, h_{n_2}]$, h_k 为 $[n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2]$ 中的整数。对多智能体进行协调, 本质上就是要确定最佳的使用输电资源顺序。可以使用禁忌搜索(TS)来选择最优顺序^[3], 其基本计算步骤如下:

1) 产生一个初始的用电城市使用资源顺序 H^0 , 令迭代指标 $k = 0$ 。

2) 按两两交换顺序方式作邻域移动, 在给定的资源使用优先顺序中运行 MAS, 让各城市按 3.1 节的规则选择最优的电力资源, 按式(3) 计算目标函数值。

3) 在非禁忌的邻域中选择最优邻域移动。

4) 如果迭代指标 k 大于给定最大值, 则输出结果, 停机; 否则, $k = k + 1$, 更新 Tabu 表, 转 2)。

4 计算举例

以上算法已在计算机上实现, 对大量算例取得了满意的结果。图 1 给出一个实际电网的例子。本例将所有叶子节点(度数为 1 的节点) 的负荷或发电量都归并到其基节点上, 从而使电网得到简化。在某月中, 各发电厂的发电能力和报价见表 1, 线路数据见表 2, 用电节点的电量需求见表 3。其中, 电量单位为

表 1 发电节点数据

发电节点	下限 b_i	价格 1 p_i^1	折扣点 b_i^1	价格 2 p_i^2	上限 B_i	发电量 x_i
1	2.0	250.0	15.0	225.0	25.00	25.00
2	1.0	280.0	10.0	260.0	20.40	20.40
3	0.8	320.0	8.0	300.0	14.70	10.70

表 2 输电线路数据

线路	连接节点 i, j	容量上限 A_{ij}	输电费用函数 $q_{ij}(y_{ij})$	线损函数 $s_{ij}(y_{ij})$	输电方向	输电量 y_{ij}
1	1, 4	18.4	$3.5y_{ij} + 0.034y_{ij}^2$	$0.000150y_{ij}^2$	1, 4	5.605
2	2, 4	15.8	$5.6y_{ij} + 0.063y_{ij}^2$	$0.000240y_{ij}^2$	2, 4	15.800
3	2, 5	11.2	$10.5y_{ij} + 0.104y_{ij}^2$	$0.000400y_{ij}^2$	2, 5	4.600
4	1, 5	15.8	$2.5y_{ij} + 0.048y_{ij}^2$	$0.000210y_{ij}^2$	1, 5	9.930
5	1, 6	11.2	$6.0y_{ij} + 0.142y_{ij}^2$	$0.000630y_{ij}^2$	1, 6	11.200
6	6, 7	9.2	$7.8y_{ij} + 0.209y_{ij}^2$	$0.000820y_{ij}^2$	6, 7	0.280
7	3, 7	9.2	$11.0y_{ij} + 0.318y_{ij}^2$	$0.001060y_{ij}^2$	3, 7	8.964
8	1, 3	18.4	$4.5y_{ij} + 0.040y_{ij}^2$	$0.000177y_{ij}^2$	1, 3	1.736

表 3 用电节点数据

用电节点	4	5	6	7
需电量 d_i	20.80	14.50	11.40	8.60

10^4 MW h, 电价单位为元 / MW h。

采用多智能体系统进行求解。当优先序为 [6-7-4-5] 时, 在线路 4 和 8 上作了负荷交换, 得到最优解。目标值即总的购电和输电费用为 14 555 015 万元, 其中输电费用为 416 015 万元。解得的购电量 x_i 和输电量 y_{ij} 分别示于表 1 和表 2 的后两列。以上解满足所有节点的平衡条件。

5 结 语

针对电力市场下电力购买与配送计划优化问题, 本文提出一种基于多智能体的用禁忌搜索协调的优化方法。将该方法用于实际电网的购电-配电优化问题, 取得了满意的应用效果。所提出方法为电力系统改革中“厂网分开”条件下的电价计算提供了一套可行的算法。

参考文献 (References):

- [1] 刘金琨, 尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 133-140
(Liu Jin-kun, Er Lian-jie. Overview of application of multiagent technology [J]. *Control & Decision*, 2001, 16(2): 133-140)
- [2] 曾伟, 费奇. 基于 Agent 方法体系的 ODSS 研究[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 753-755
(Zeng Wei, Fei Qi. Research on agent-based organizational decision support system [J]. *Control & Decision*, 2001, 15(6): 753-755)
- [3] Glover F. Tabu search: Part I[J]. *ORSA J on Computing*, 1989, 1(3): 190-206
- [4] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998
- [5] Fang R S, David A K. Transmission congestion management in an electricity market [J]. *IEEE Trans on Power Syst*, 1999, 14(3): 877-883
- [6] Yeung C S K, Poon A S Y, Wu F F. Game theoretical multi-agent modeling of coalition formation for multilateral trades [J]. *IEEE Trans on Power Syst*, 1999, 14(3): 929-934

(上接第 449 页)

- (Ruijun Zhu, Tianyou Chai. Robust nonlinear adaptive observer design using dynamical neural networks [J]. *Inf or & Contr*, 1998, 27(6): 421-425)
- [5] Rovithakis G A. Tracking control of multi-input affine nonlinear dynamical systems with unknown nonlinearities using dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1999, 29(2): 179-189
 - [6] Rovithakis G A, Christodoulou M A. Adaptive control of unknown plants using dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1994, 24(3): 400-411
 - [7] Man Zhihong, Wu H R, Palaniswami M. An adaptive tracking controller using neural networks for a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1998, 9(5): 947-954
 - [8] 朱瑞军, 柴天佑, 伏静丹. 基于神经网络的不确定非线性系统的鲁棒控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(1): 73-76
(Ruijun Zhu, Tianyou Chai, Jingdan Fu. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems using neural networks [J]. *Control & Decision*, 1999, 14(1): 73-76)
 - [9] Chaib-shiung Chen, Wen-liang Chen. Robust adaptive sliding mode control using fuzzy modeling for an inverted pendulum systems [J]. *IEEE Trans on Ind Electr*, 1998, 45(2): 297-305
 - [10] Walcott B, Zak S H. Combined observer-controller synthesis for uncertain dynamical systems with applications [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1988, 18(1): 88-103