

多智能体技术在机组组合运行与管理分析中的应用

赵波, 曹一家

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 电力系统机组组合问题是一个典型的大规模混合整数的非线性组合优化问题, 很难得到理论上的最优解。该文提出了求解机组组合问题的多智能体体系结构, 并且提出了自治与分级管理相结合的 3层 MAS系统体系结构, 最终通过协调 Agent、任务 Agent、发电 Agent 的协商、谈判, 获得了机组组合问题的一个较为满意的解。

关键词: 电力系统; 机组组合; 多智能体系统; Agent

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)08-0022-05

0 引言

电力系统机组组合问题是指满足系统负荷及备用要求和机组运行的技术条件约束的情况下, 确定一个调度周期 (通常为 24 h) 内各时段参加运行的机组和各机组在运行时段的出力, 以使系统总的运行费用达到最小。机组组合问题是一个典型的大规模混合整数的非线性组合优化问题, 很难得到理论上的最优解。近年来, 已有许多参考文献提出了解决该问题的各种方法, 如: 拉格朗日松弛法 (LR)、动态规划法 (DP)、混合整数规划法、遗传算法 (GA) 等^[1]。在这些方法中, 一些算法容易造成“维数灾”的问题, 一些算法难以处理以时间为变量的约束条件和机组间耦合的约束条件, 还有一些算法会随着调度机组的增多而需要较长的计算时间, 因此不适用于实际系统机组组合问题的计算。

电力市场化改革后, 发电厂机组组合运行与管理所涉及的问题与因素较多, 尤其是厂网分开, 发电厂作为一个单独的实体自主盈亏, 这就需要发电厂自身根据市场的情况能够制定出合理、实用、经济的机组组合运行与管理方案。传统的机组组合问题仅仅是一个数学上的优化问题, 而市场化运行后, 发电厂作为市场中的一个竞价者应该看成一个智能体, 能够实时地根据市场信息确定符合该发电厂运行条件、经济利益的机组组合运行与管理方案, 使其利益最大化。因此, 多智能体技术在机组组合运行与管理的分析中不失为一种理想的新技术。

多智能体系统 (MAS) 是分布式人工智能 (DAI) 的研究热点, 它已经成为复杂、分布式系统的新一代建模工具。它研究的是一组在逻辑上或物理上分离的 Agent 之间行为的协调, 各个 Agent 具有一定的独

立解决问题的能力, 它们通过彼此之间的协商共同完成比较复杂的任务。MAS 已经在各个领域得到了广泛的重视, 特别适用于处理调度问题^[2], 因此本文提出了基于多智能体方法的机组组合求解体系。在 MAS 环境中, 为了能够合理、有效地求解机组组合问题, 本文构造了三类 Agent, 即: 发电 Agent、任务 Agent 和协调 Agent, 这些 Agent 在一个分布式计算环境中运行, 通过一些规则的合理制定, 以及 Agent 间的协调、竞争、合作和信息交流, 最后得到了机组组合问题的一组较为满意的解。

1 数学模型

1.1 目标函数

机组组合问题的目标函数通常是在满足各种约束条件下总的发电运行成本最小化。其目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I [FC_i(p_i^j) \cdot u_i^j + ST_i \cdot u_i^j \cdot (1 - u_i^{j-1})] \quad (1)$$

式中: F 为总的发电成本; u_i^j 为机组 i 在第 j 时刻的状态, $u_i^j = 1$ 表示该机组处于运行状态, $u_i^j = 0$ 表示该机组处于停机状态; $FC_i(p_i^j)$ 为机组 i 在第 j 时刻的发电运行成本; p_i^j 为机组 i 在第 j 时刻的实际出力; ST_i 为机组 i 的启动成本; T 为总的时段数; I 为总的机组数。

通常情况下, $FC_i(p_i^j)$ 可以用二次函数表示为:

$$FC_i(p_i^j) = a_i + b_i \cdot p_i^j + c_i \cdot (p_i^j)^2 \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 发电成本函数的参数。

机组 i 的启动成本 ST_i 可以简化表示为:

$$ST_i = \begin{cases} HSC_i: & MDT_i < (-DT_i) < MDT_i + CSH_i \\ CSC_i: & (-DT_i) > MDT_i + CSH_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: HSC_i 为机组 i 的热启动成本; CSC_i 为机组 i 的冷启动成本; DT_i 为机组 i 到第 t 时刻已经连续运行 (值为正) 或连续停机 (值为负) 的时段数; MDT_i 为机组 i 的最小停机时间; CSH_i 为机组 i 的冷启动时间。

1.2 约束条件

1) 系统有功平衡约束:

$$\sum_{i=1}^I p_i^t - p_{\text{loss}}^t = D^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

式中: D^t 为第 t 时刻系统总的负荷; p_{loss}^t 为第 t 时刻系统总的有功网损。

2) 旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^I u_i^t \cdot p_i^{\max} - D^t - R^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

式中: p_i^{\max} 为机组 i 的最大出力; R^t 为第 t 时刻系统总的备用。本文将 R^t 取为系统总的负荷的 10%, 即 $R^t = 10\% \times D^t$ 。

3) 机组出力上下限约束:

$$p_i^{\min} \leq p_i^t \leq p_i^{\max} \quad (6)$$

式中: p_i^{\min} 为机组 i 的最小出力。

4) 最小启停时间约束:

$$\begin{cases} DT_i & MGT_i \\ (-DT_i) & MDT_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: MGT_i 为机组 i 的最小运行时间。

5) 机组爬坡约束:

$$p_i^{\min} \leq p_i^t - p_i^{t-1} \leq p_i^{\max} \quad (8)$$

式中: p_i^{\min} 和 p_i^{\max} 为机组 i 的功率的下降量和上升量的限制。

2 基于 MAS 的机组组合体系结构

2.1 MAS 技术

多智能体系统 (MAS) 是分布式人工智能 (DAI) 的研究热点。它研究的是一组在逻辑上或物理上分离的 Agent 之间行为的协调, 各个 Agent 具有一定的独立解决问题的能力, 他们通过彼此之间的协商共同完成比较复杂的任务。一个 MAS 通常由如下几部分构成:

1) 多个已存在的 Agent

2) 多 Agent 间的联合意图 (joint intention), 即多个 Agent 联合参与行动以完成其共同承诺的行为。

3) 常识 (common sense), 即 Agent 间的公共知识。

4) 公共行为规范, 与单个 Agent 的 (局部) 行为

规范相识, 它规定了多 Agent 在实现系统的联合意图时应该或将要采取的行动。

5) Agent 赖以生存的环境, 如为 Agent 提供通讯设施的网络、其它实体以及与 MAS 进行交互的用户等。

多 Agent 协调与协作是 MAS 研究的核心问题。近几年国内外的一些文献对此问题提出了一些价值较高的理论与方法。但是, Agent 合作机制和产生合作机制的条件、多 Agent 的合作策略以及多 Agent 间的有效联盟机制来提高多 Agent 求解问题的能力、建立在非协同域前提下的进化协商模型, 以期最大程度地解决 Agent 间的冲突、多 Agent 社会法则的自动产生机制等问题尚需进一步的研究^[3]。

由于 MAS 具有自治、分布、适应、灵活、开放、动态等特点, 非常适合表示和实现复杂电力系统中各机组之间的合作、协调、竞争的行为, 因此采用 MAS 结构对机组组合问题进行求解不失为一种理想的选择。

2.2 MAS 的体系结构

基于 MAS 的机组组合体系结构是以 Agent 的概念对有限的发电机资源进行封装, 并对这些 Agent 进行组织, 通过 Agent 的自身努力及 Agent 之间的合作完成最终的机组调度问题。为了能够保证系统和发电机组的约束条件, 又能满足全局的优化目标, 本文提出了自治与分级管理相结合的 3 层 MAS 系统体系结构。设立分级管理 Agent, 一方面体现全局策略, 另一方面降低计算的复杂度。这 3 层中最上层是协调 Agent, 中间层是任务 Agent, 最下层是发电 Agent, 整个系统结构如图 1 所示^[4]。每一层中 Agent 的特征下面将进行详细的说明。

1) 协调 Agent 该 Agent 主要是对所有时段机组组合进行全局协调, 使其满足机组组合的所有约束条件, 并对所有时段机组组合做最后的调节, 使其最大化全局效益, 满足目标函数最小化。它主要是对任务 Agent 发出指令, 决定任务 Agent 对发电 Agent 访问的迁移路线。协调 Agent 对任务 Agent 的管理体现了调度的整体思想。

2) 任务 Agent 该 Agent 主要负责对发电 Agent 管理、协调及任务的监视, 并且与其它任务 Agent 进行协调、信息共享, 同时它也与协调 Agent 不断地进行信息的交流。任务 Agent 相当于一个移动 Agent, 它对应一个时段所需要完成的机组发电任务, 使其满足该时段的负荷需求及其各约束条件。它的主要功能就是接收协调 Agent 发出的该时段的任务指

令,然后迁移到合适的发电 Agent,按照该时段的负荷需求与发电 Agent进行协商谈判,最终确定该发电 Agent所选择的策略。该 Agent具有前一时段所有机组的状态信息,以及各机组的状态所持续的时段数和运行机组的出力情况。

3) 发电 Agent 每一个发电 Agent就相当于机组组合中所对应的一台发电机组。每个发电 Agent应该包含如下数据:机组组名、机组出力上下限、最小启停时间约束、机组爬坡率约束、机组当前状态以及当前状态所持续的时段数。每一个发电 Agent一直处于等待状态,当任务 Agent迁移到该发电 Agent时,与该发电 Agent进行信息交换、协调、谈判,最终确定该发电 Agent的动作策略(机组的启停,或者上升出力,或者下降出力)。

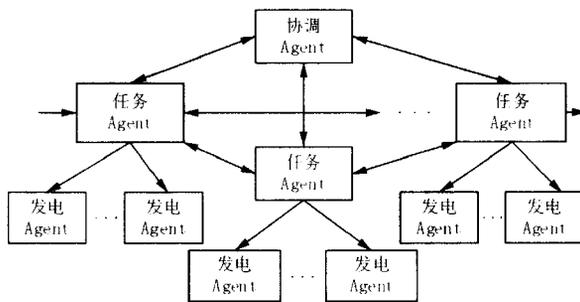


图 1 基于 MAS 的机组组合体系结构

Fig 1 A MAS based unit system

图 1 是三层的 MAS 体系结构。机组组合问题开始于协调 Agent 的启动,在一个调度周期内发送命令给任务 Agent。任务 Agent 接收到命令后,启动并且迁移到所有的发电 Agent 上,与发电 Agent 进行谈判协商,最终确定机组的组合计划。与此同时,发电 Agent 根据与任务 Agent 的最后谈判结果,计算自身的发电成本,通过任务 Agent 最终汇总到协调 Agent,得到总的调度周期内的发电运行成本。本文中 Agent 间的通讯问题是用一个类似于 KQML 语言的消息对象来实现的。

2.3 Agent 间的协调过程

为了能够有效解决机组组合问题,Agent 间的协调过程如图 2 所示,其过程为:

1) 协调 Agent 为整个 MAS 的最上层管理者,是其核心,它的数据库具有每个时段的负荷数据。在一个具体时段,该协调 Agent 对任务 Agent 发送任务请求,并且把该时段的负荷数据发送给任务 Agent。

2) 任务 Agent 一直处于等待任务阶段,当它接收到该任务请求信息后,判断当前时段的负荷数据针对上一时刻是升负荷还是降负荷。如果是升负

荷,任务 Agent 则伴随上升负荷指令迁移到各发电 Agent。同样,如果是降负荷,任务 Agent 则伴随下降负荷指令迁移到各发电 Agent。

3) 任务 Agent 对发电 Agent 的迁移路线是根据每个发电 Agent 的生产成本和开机成本进行排序逐个进行访问。任务 Agent 总是先迁移到成本较低的发电 Agent,与它进行谈判协商。

4) 当任务 Agent 迁移到一个发电 Agent 时,根据任务 Agent 升负荷指令或者降负荷指令,检查该发电 Agent 是否满足自身的约束条件。若不满足条件,该发电 Agent 发送拒绝请求给该任务 Agent,则任务 Agent 迁移到下一个发电 Agent。若满足约束条件,则与该发电 Agent 继续谈判,决定上升或者下降负荷,或者机组的启停,然后把最后的协商数据,即发电 Agent 的最后运行成本发送给任务 Agent。

5) 任务 Agent 将对每一个发电 Agent 进行访问,最终满足该时段的负荷平衡,并且记录所有发电 Agent 当前的状态,最后把该信息发送给协调 Agent。

6) 协调 Agent 在收到所有时段任务 Agent 发送的信息后,统计最后的运行成本,并且检查是否满足各约束条件。若不满足条件,则发出请求信息给任务 Agent,进行重新协调,使其满足所有的约束条件。

7) 在负荷上升阶段,任务 Agent 首先检查已经开启的机组是否能够满足该时段的负荷和备用需求。若不满足,考虑满足约束条件的发电 Agent 的开启,尽量开启运行成本较低的发电 Agent。

8) 在负荷下降阶段,尽量不关停正在运行的发电 Agent,降低成本较高的发电 Agent 的出力。若还需进一步降低负荷,关停满足约束条件下运行成本最高的发电 Agent。

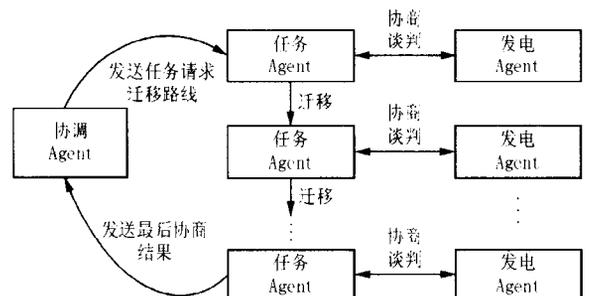


图 2 Agent 间的协调过程

Fig 2 Coordinating process among Agents

2.4 基于 MAS 的机组组合的计算流程

为了能够清晰地说明本文提出的方法,用一个简单的示例并结合图 2 来说明这一过程的实现。假

设有三台机组 G1、G2和 G3,它们的最大出力分别为 500、300、200,最小出力分别为 200、100和 100。为了简化说明的目的,仅仅考虑发电机出力 and 负荷平衡的约束条件。在某一时段 n 的负荷 $D^n = 600$ MW。前一时段负荷 $D^{n-1} = 300$ MW,且在 $n - 1$ 时段各机组的出力分别为 G1为 300,G2为 0,G3为 0。假设根据各发电 Agent成本大小,任务 Agent的迁移路线分别是 Agent G1、G2、G3。

基于 MAS的机组组合在时段 n 的实现步骤如下所示。

1) 第一阶段:各个 Agent处于等待命令阶段。



图 3 阶段一
Fig 3 The first stage

2) 第二阶段:协调 Agent发送任务请求,任务 Agent根据任务请求判断负荷升降,进行迁移。

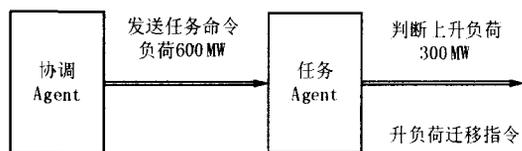


图 4 阶段二
Fig 4 The second stage

3) 第三阶段:任务 Agent根据迁移路线,与各发电 Agent进行协商谈判,直至满足该时段的负荷要求为止,最后返回谈判结果给任务 Agent。

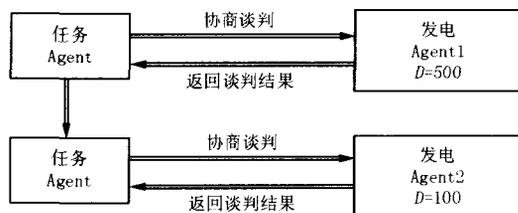


图 5 阶段三
Fig 5 The third stage

4) 第四阶段:协调 Agent接受任务 Agent发送的最终协调信息,完成该时段的任务,协调 Agent准备下一阶段的任務请求准备。

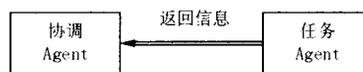


图 6 阶段四

Fig 6 The fourth stage

以上的过程是一个简单的负荷上升的基于 MAS的机组组合的计算流程,如果是负荷下降的情况,相应的任务 Agent仅仅伴随负荷下降的命令迁移到各发电 Agent,进行减负荷的协商谈判,迁移路线是 Agent G3、G2、G1,应该先从发电成本较高的 Agent进行减负荷的协商谈判,其它步骤与上升负荷情况完全一样。

3 算例

本文提出的 MAS体系应用 JAVA 语言编程实现,为了演示本文提出方法的有效性,以某一发电厂内 10台机组、24个时段的算例进行求解。单线图、线路参数、各发电机参数和各时段负荷参数见文献 [1]。

表 1是应用本文提出的方法所得到的 24个时段 10台机组的启停计划表。从表 1可知,该电厂的 G8、G9和 G10在 24时段几乎处于停运状态,由于该三台机组最大出力较小,并且运行成本和开机成本较高,属于高煤耗的小型机组,任务 Agent总是最后才对其进行访问,只有在其它机组不能满足负荷平衡的条件下,任务 Agent才与其进行协商谈判。这一现象符合实际情况,在一个发电厂内尽量多开启低煤耗、低成本的高效发电机组,逐渐淘汰高煤耗的小型发电机组。

表 1 24时段机组启停计划

Tab 1 Unit commitment schedule for twenty-four hours

G1	11111111111111111111111111111111
G2	11111111111111111111111111111111
G3	000011111111111111111111111000
G4	000001111111111111111111111100
G5	001111111111111111111111111110
G6	00000000011111100001110000
G7	00000000111111100000111100
G8	00000000000110000000100000
G9	00000000000010000000010000
G10	0000000000000000000000000000

表 2是用遗传算法、动态规划算法和本文提出方法进行计算,得到的运行成本结果比较。

从表 2可知,本文提出的方法所得到的运行成本与遗传算法、动态规划算法比较,运行成本分别高出了 0.22%和 0.13%。这是因为任务 Agent的迁

移路线过于单一化,它仅仅根据发电 Agent 的成本的大小逐次进行访问,与之进行协商谈判,并不是如同动态规划把所有可能的情况都进行了分析,因此本文提出的方案可能仅仅是一个次优解。今后在任务 Agent 的设计过程中,也可以考虑更多的迁移路线,增加任务 Agent 的学习能力,使之能够得到更优的解,这将是该课题未来重点研究的对象。然而,作为求解复杂组合优化问题的一种新的思路,而且与传统方法比较,得到的解还是可行的。在计算时间方面,对于该 10 台机组 24 时段启停计划的求解时间仅仅需要 87 s,计算效率高于遗传算法和动态规划方法。因此,本文提出的方法对于实际大系统的计算是完全可行的。

表 2 结果比较

方法	运行成本最终结果 / \$
遗传算法 (GA)	565 825
动态规划 (DP)	566 321
本文的方法	567 042

4 结论

本文提出了求解机组组合问题的多智能体体系结构,并且提出了自治与分级管理相结合的 3 层 MAS 系统体系结构,最终通过协调 Agent、任务 Agent、发电 Agent 的协商、谈判,获得一个较为满意的解。虽然本文提出的方法所获得的解并不优于传统算法所获得解,但是作为一种新方法的尝试,通过未来的工作对 Agent 学习能力的不断加强、规则制定的不断完善,该方法对求解实际电力系统的机组组合问题不失为一种好的选择。

参考文献:

- [1] 王喆,余贻鑫,张弘鹏. 社会演化算法在机组组合中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 12-17.
WANG Zhe, YU Yi-xin, ZHANG Hong-peng. Social Evolutionary Programming Based Unit Commitment [J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 12-17.

- [2] Sousa P, Ramos C. A Distributed Architecture and Negotiation Protocol for Scheduling in Manufacturing Systems [J]. Computers in Industry, 1999, 38 (2): 103-113.
- [3] 曹一家. 多 Agent 系统协调理论中的几个关键问题——技术跨越与高新技术产业发展 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 21-22
CAO Yi-jia. Some Important Problems in Coordinative Theory of Multi-agent System—— Technological Leapfrog and Development on Hi-New Technology Industry [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001. 21-22
- [4] 王晓芳, 杨家本. 制造系统中任务分配的自适应 Agent 模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7 (8): 17-20.
WANG Xiao-fang, YANG Jia-ben. Self-adaptive Agent Model for Task Allocation in Manufacturing System [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7 (8): 17-20.
- [5] 张宇, 孙宪鹏. 基于多代理结构的 Job Shop 动态优化调度策略的研究 [J]. 制造业自动化, 2001, 23 (3): 22-24.
ZHANG Yu, SUN Xian-peng. Research on the Job Shop Optimal Scheduling Strategy Based on Multi-agent Architecture [J]. Manufacturing Automation, 2001, 23 (3): 22-24.
- [6] Kazarlis SA, Bakirtzis A G, Petridis V. A Genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (1): 83-92.
- [7] Juste K A, Kita H, Tanaka E, et al. An Evolutionary Programming to the Unit Commitment Problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 4 (4): 1452-1459.

收稿日期: 2004-06-28; 修回日期: 2004-12-23

作者简介:

赵波 (1977 -), 男, 博士研究生, 研究方向为智能优化算法和多智能体技术在电力系统中的应用; E-mail: zhaobozju@zju.edu.cn

曹一家 (1969 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制、进化计算与计算智能。

Application of multiagent technique to unit commitment operation and management analysis

ZHAO Bo, CAO Yi-jia

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Power system unit commitment, a problem of nonlinear commitment optimization with typical large-scale hybrid integers, is difficult to get an optimal solution in theory. To solve this problem, this paper proposes a multi-agent system, and the structure of three-layer MAS combined with autonomy and level management is provided. With the consultation and negotiation between coordinate Agent, task Agent and power-generating Agent, an optimal solution for unit commitment problems is obtained. The experiment results prove that the multi-agent system is able to find a satisfactory optimal solutions.

Key words: power system; unit commitment; multi-agent system; agent