

智能电网下节能发电调度多 Agent 系统的研究

黎静华, 韦化, 夏小琴

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 改革现有的发电调度执行模式和体系, 建立协调安全、节能、环保及经济等众多因素的智能调度系统, 满足智能电网的要求, 是建设和实现坚强智能电网的核心内容之一。基于此, 在分析智能电网和节能发电调度原则的基础上, 利用多 Agent 的分散协调控制等优势, 建立实现节能发电智能调度分布式系统。该系统能依据不同的运行方式协调系统运行经济性、安全性和环保性, 给出不同状态下的目标函数及约束条件的限制, 实现能自适应于不同运行状态及条件下的智能调度系统。最后, 通过示例验证了该调度系统的适应性、智能性和快速性, 为智能电网环境下节能发电调度系统的实现开辟一条新的、有效的实施途径。

关键词: 智能电网; 智能调度; 节能调度; 节能减排; 多 Agent

Multi-Agent model and method for units commitment in energy-saving generation dispatching

LI Jing-hua, WEI Hua, XIA Xiao-qin

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Reforming the dispatching system and establishing security, environment protection and economic dispatching system to meet the requirements of smart grid are the key contents to construction and realization of the smart grid. Based on analyzing smart grid and energy generation dispatching principle, this paper establishes a smart distributed scheduling system by coordinating multi-Agent decentralized controlling. The system can give the different objective functions and limits of constraints by considering various running states and load so as to realize smart dispatching system which can adapt to the different operational status and conditions. Finally, the example validates that the scheduling system is adaptability, intelligence and rapidity, which will open a new valid way for implementing energy-saving generation dispatching in smart grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50907012 and No. 50867001).

Key words: smart grid; smart dispatching; energy-saving generation; energy-saving and emission reducing; multi-Agent

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0096-08

0 引言

智能电网的发展方向是建设具有灵活、清洁、安全、经济和友好等性能的电网。可见, 节能发电智能调度是实现智能电网关键的一环。与传统的调度系统相比, 智能调度具有“多目标”、“可控制”、“自适应”、“自处理”、“自决策”和“快速性”等特征^[1-4]。所谓“多目标”是指系统能协调“安全”、“经济”、“节能”和“环保”等多目标, 可根据不同的任务状态制定不同的目标函数, 最终达到总体最优的运行状态, 即“多目标趋优”。“可监控”指可监测及控制设备的运行状态, 出力情况及电网的潮流

分布。“自适应”指可根据系统运行方式及实际情况设置运行参数, 或充分利用风能及水情预测确立相应的约束。智能电网下, 广而多的分布式发电的接入, 随时都会导致系统功率失衡, 因此应在调度过程中加以考虑和应用其预测结果, 确立相应的备用及出力等约束, 从而提高系统运行的经济性和可靠性。“自处理”系统能自动处理目标函数及约束的变化, 并采用合理的算法解算出满足安全、经济、环保及节能的调度计划, 指导系统运行。“快速性”主要指系统具有较强的负荷跟踪能力, 能快速响应负荷的波动。此外, 要有足够的旋转备用, 以弥补负荷的突然变化和难以预计的发电机组开断所引起的功率失衡。大规模风电并网后, 风电的随机波动与负荷的波动叠加在一起, 使系统面临的不确定因素更大, 因此需要配置更多的旋转备用。而备用配置

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50907012); 国家自然科学基金项目 (50867001)

过多会增加运行成本, 过少则会增加运行风险, 因此风电场的日前调度问题应着重考虑充分利用电网备用。

可见, 传统的人工协调调度方式不可能满足智能电网下调度的要求。基于此, 本文通过构建智能电网下节能发电调度的功能结构, 充分利用多 Agent 的智能分散协调控制优势^[5-12], 建立实现节能发电调度的分布式智能系统。系统根据各功能结构设计单个 Agent 的目标及推理机制, 当运行状况发生改变时 (如风速、可用水量和机组出力等), 各 Agent 能感知外部环境和条件的变化, 通过相互协调、协商, 获取所需知识和数据, 按照定义的规则, 启动推理及解算器, 实现预期目标。同时各 Agent 相互独立, 达到并行工作的效果, 从而大大缩减调度决策时间。最后, 以某一系统故障为例, 对比说明了多 Agent 智能调度系统的调度决策过程, 结果验证了该系统的“智能特征”, 为实现智能电网环境下节能发电调度开辟一个有效的实施途径。

1 节能发电调度方式

节能发电调度方式^[13-21]与传统的调度运行方式相比发生了重大的变革, 其计划制定方式从传统的均衡发电到按机组的能耗排序发电; 管理方式从传统的简单粗放到精细化边际化管理; 调度运行方式从传统的仅考虑安全裕度到综合考虑安全、经济、节能和环保。也就是说, 节能发电调度机组组合是考虑新能源在内的多种电源的组合优化, 实现节能、环保和经济的综合目标。图 1 示出了节能发电调度的主体流程, 从流程看, 节能发电调度计划制定需要考虑负荷、备用、检修及安全等众多因素, 仅依靠人工难以完成, 因此建立能综合考虑上述因素的节能发电调度计划制定分布式系统势在必行。

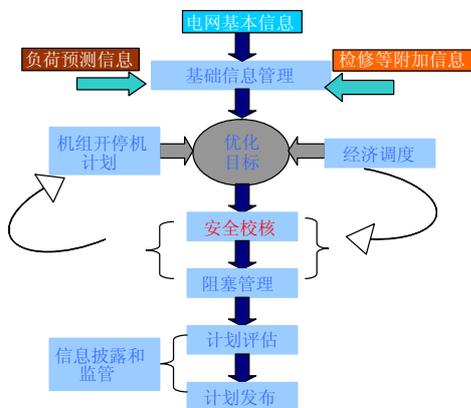


图 1 节能发电调度主体流程图

Fig.1 Main flowchart of energy-saving generation dispatching model

2 节能发电调度分布式系统的实现

2.1 智能调度分布式结构

图 2 中, 系统被封装为三种类型 Agent, 即控制 Agent, 协调 Agent 和基本功能 Agent。控制 Agent 感受外界环境变化而对任务进行辨识和分解, 基本功能 Agent 包括制定机组发电顺序、调峰调频、安全稳定控制、市场管理和备用管理等。控制 Agent 是系统的中心操作员, 指挥协调 Agent 按照目标要求制作一个发电计划表。协调 Agent 属于移动的 Agent, 其通过在网络访问所有的基本功能 Agent, 为每个时间段寻找和评估出一个满意的发电计划。全局约束条件在协调 Agent 巡访基本功能 Agent 的时候得满足; 每个基本功能 Agent 负责提供和校验局部约束条件的工作。

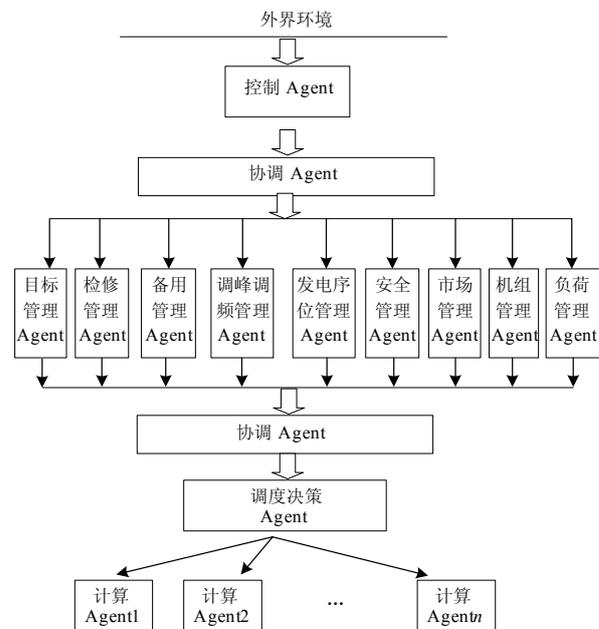


图 2 智能调度分布式结构

Fig.2 Distributed architecture of intelligent dispatching

智能电网下, 电网将建设为一个具有较强交互能力的综合型网络, 能使其实现信息、电力数据的实时交换, 上述各 Agent 之间能实现实时高速的数据信息交换。当运行条件发生变化, 如负荷变化、机组故障或风速突然减弱, 则对应负荷管理 Agent、机组 Agent 发生改变, 从而更新基础信息管理 Agent。备用 Agent 等各功能 Agent 感受到变化时, 将启动其目标检测部分, 当目标与外部变化相关时, 则执行其推理器, 完成任务后将结果传给协调 Agent, 若检测到变化与其无关时, 则拒绝工作, 并告知协调 Agent。协调 Agent 综合上述 Agent 的结

果, 重构一个调度模型并将模型传给调度决策 Agent 进行解算决策。调度决策 Agent 将待解算模型分解给 n 个计算 Agent, 多个 Agent 进行并行计算, 最后将结果传给调度决策 Agent, 调度决策 Agent 综合结果并公布。

可见, 该模型能自动感知外界运行状态和条件的变化, Agent 之间通过相互协商、协调和协作, 共同制定对应的调度决策, 具有高度的智能性和自适应性。同时, 各功能 Agent 相对独立, 并行多线程工作, 提高调度决策的速度, 及时跟踪电力系统运行中的各种变化, 具有快速性, 从而保证电网安全稳定运行。

2.2 各功能 Agent 的设计

功能 Agent 结构如图 3 所示, 其由通信接口部分、任务控制部分、推理部分和知识库等四部分组成, 各部分的功能介绍如下。

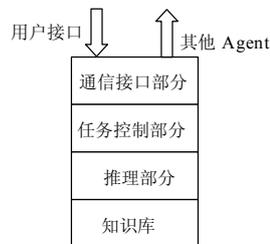


图 3 单个 Agent 的结构图
Fig.3 Structure of single Agent

(1) 通信接口模块负责与其他 Agent 间的通信, 它是机组组合 Agent 与其他 Agent 进行相互作用的桥梁。

(2) 任务控制部件, 该部分保存了对 Agent 能力的描述, 任务控制策略以及整个多 Agent 系统方法论知识的表述。若外部请求到达时, 任务控制模块首先判断它的请求是否在自己的能力范围内, 当不能完成请求时, 则通过通信模块发出消息告知拒绝该请求; 否则, 则根据规则告知移动 Agent, 并启动推理机进行工作。

(3) 推理部分。按照其所需完成功能制定相应的执行规则或算法, 从而顺利完成任务。

下面对本文所涉及的各功能 Agent 的推理器进行介绍:

(1) 调峰调频 Agent

节能发电调度环境下, 制定机组发电计划时, 应充分体现机组的调峰调频能力。该 Agent 负责确定参与调峰、调频、调压和备用的机组。其制定规则为:

规则 1: 有调节能力水电厂应充分发挥其调峰、调频作用, 按预先制定的水库水位控制计划安排发

电负荷;

规则 2: 天然气、煤气化发电机组按照气源情况和系统负荷特性参与电力系统调峰运行;

规则 3: 电力调度机构应积极开展流域水电优化调度和水火联合优化调度, 提高水资源利用率, 并充分发挥水电的调峰、调频作用;

规则 4: 电网调峰任务原则上由抽水蓄能、有调节能力的水电机组、燃气、燃油机组承担, 必要时火电机组应进行深度调峰或启停调峰;

规则 5: 抽水蓄能机组根据电网调峰调频的需要安排发电和抽水;

规则 6: 天然气、煤气化发电机组按照气源情况和系统负荷特性参与电力系统调峰运行。

该 Agent 按照上述规则, 确定在各时段的必开机组, 从而满足电网调峰调频的需要。

(2) 发电序位管理 Agent

根据机组的安全、环保及经济等指标, 制定机组的发电序位, 以体现节能降耗。按照节能发电调度的要求, 可在其推理器设置如下排序规则^[21]:

规则 1. 对不同类型发电机组, 调度优先顺序为:

a) 无调节能力的风能、太阳能、海洋能、水能等可再生能源发电机组;

b) 有调节能力的水能、生物质能、地热能等可再生能源发电机组和满足环保要求的垃圾发电机组;

c) 核能发电机组;

d) 按“以热定电”方式运行的燃煤热电联产机组, 余热、余气、余压、洗中煤和煤层气等资源综合利用发电机组;

e) 天然气、煤气化发电机组;

f) 其他燃煤发电机组, 包括未带热负荷的热电联产机组;

g) 燃油发电机组。

规则 2. 对于同类发电机组, 考虑安全、环保及经济等综合性指标, 其主要涉及可靠性指标 (R), 经济性指标 (E), 环保指标 (D) 和热电比 (H) 等, 分别赋予权值 a_R , a_E , a_D 和 a_H , 于是按如下式子计算其排序指标, 按指标从大到小进行排序。

$$I = a_R \times R + a_E \times E + a_D \times D + a_H \times H \quad (1)$$

其中, $a_R + a_E + a_D + a_H = 1$, 可以由调度人员根据实际运行进行设置。

各指标的确定规则如下:

a) 可靠性指标为发电机组的安全可靠运行的概率, 由调度人员根据实际需要设定。

b) 经济性指标按照单位出力消耗一次能源水平来确定, 如火电机组则用单位出力耗煤量表示, 燃油机组则用单位出力耗油量表示, 水电机组则用单位出力耗水量表示, 依此类推。

假设机组运行的经济性与出力的函数关系为 $E(P)$, 则经济性指标的计算公式为:

$$E = \frac{E(P_{\max})}{P_{\max}} \quad (2)$$

c) 环保性指标采用单位出力排放有害气体总量来表示, 假设机组运行时的某种气体排放量与出力的关系为 $D_i(P)$, 则环保性指标的计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n D_i(P_{\max})}{P_{\max}} \quad (3)$$

d) 热电比指标采用单位出力转换热量表示, 即转换效率。假设机组热电转换的函数关系为 $H(P)$, 则热电比指标的计算公式为:

$$H = \frac{H(P_{\max})}{P_{\max}} \quad (4)$$

式 (2)、(3) 和 (4) 中, P 和 P_{\max} 分别为机组的出力和最大出力限制。

(3) 市场管理 Agent

该 Agent 充分考虑电力市场的因素, 使节能调度方案与电力市场平滑衔接和过度。在制定发电计划过程中应体现“三公”调度原则, 跨区跨省地购销合同, 阻塞管理及企业的利益调整和补偿等电力市场因素, 如调峰、调频及备用的经济补偿。

该 Agent 主要负责计算机组的合同完成率, 省际间或区域间的交易合同, 提供该机组当日出力的上下限 P_{\min} 和 P_{\max} , 从而为制定发电计划提供依据。其计算规则为, 假设某外资发电机组购电合同总量为 $P_{\text{总}}$, 从合同生效之日至今累计发电量为 $P_{\text{实}}$, 现距合同结束时间为 T , 则该机组当日发电的上下限可按式 (5) 确定:

$$P_{\min} = \frac{P_{\text{总}} - P_{\text{实}}}{T} \quad (5)$$

P_{\max} 设为机组出力的上限。

(4) 目标管理 Agent

与传统的调度目标相比, 智能调度的目标不仅仅考虑经济性, 其目标应综合协调考虑经济性、节能环保性, 安全性和可靠性。具体有如下几种形式。

- 1) 运行费用最小;
- 2) 购电成本最小;
- 3) 反映资源配置效率的社会总收益最大;

该 Agent 通过其任务管理器确定目标函数的形式, 并将其交给协调 Agent。

(5) 机组管理 Agent

该 Agent 通过可利用资源的情况, 确定机组出力的上下限。

确定规则为:

- 1) 除水能外的可再生能源机组按发电企业申报的出力过程曲线安排发电负荷。
- 2) 无调节能力的水能发电机组按照“以水定电”的原则安排发电负荷。
- 3) 对承担综合利用任务的水电厂, 在满足综合利用要求的前提下安排水电机组的发电负荷, 并尽力提高水能利用率。对流域梯级水电厂, 应积极开展水库优化调度和水库群的联合调度, 合理运用水库蓄水。
- 4) 资源综合利用发电机组按照“以(资源)量定电”的原则安排发电负荷。
- 5) 核电机组除特殊情况外, 按照其申报的出力过程曲线安排发电负荷。
- 6) 燃煤热电联产机组按照“以热定电”的原则安排发电负荷。超过供热所学的发电负荷部分, 按冷凝式机组安排。
- 7) 火电机组按照供电煤耗等微增率的原则安排发电负荷。

(6) 安全管理 Agent

该 Agent 不仅能为调度决策 Agent 提供安全稳定约束, 且能独立完成安全稳定校核任务。

当任务管理器接受的任务为重构安全稳定约束时, 此 Agent 依据《电力系统安全稳定导则》和相关安全规定的要求, 为开停机方式和负荷分配提供安全稳定校核的约束, 从而使调度结果满足安全稳定要求。该 Agent 的推理器根据系统的运行状态(如正常状态、异常或紧急情况 and 事故状态)或不同的网络拓扑情况, 重构相应的安全稳定约束有电压无功约束, 线路热稳极限, 线路传输容量, 断面传输功率, 电网的 N-1 约束, 区域最小开机约束, 其他复杂网络约束等。并将约束通过协调 Agent 送给调度决策 Agent, 从而使所制定方式满足继电保护和稳定性的要求。

当任务管理器接受的任务为对某种运行方式进行安全校核时, 该 Agent 的推理器根据上述所获取的安全稳定约束(如图 4 所示)判断所给运行方式是否存在可行解。



图 4 电网安全稳定控制 Agent 结构

Fig.4 Structure of power grid's security and stability control

Agent

即采用内点法求解如下模型，若收敛则说明运行方式可行，否则该运行方式不能满足安全稳定要求。

$$\begin{aligned} \text{obj. } \min .f(x) &= 0 \\ \text{s.t. } h(x) &= 0 \\ g &\leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (6)$$

(7) 检修管理 Agent

该 Agent 主要是确定可以安排检修的机组。燃煤、燃气、燃油发电机组检修应充分利用年电力负荷低谷时期、丰水期进行。各级电力调度机构应依据负荷预测结果和排序表，在保证系统运行安全的前提下，综合各种因素，优化编制发电机组年、月检修计划；依据短期负荷预测结果，安排日设备检修工作。

当该 Agent 接受了安排检修机组的任务时，其知识库向推理器提供负荷及备用约束、安全约束等，推理器计算校核各约束是否能满足，若能满足则该 Agent 同意批准该检修计划，否则不予安排。

也就是知识库建立含系统控制变量和状态变量的一组非线性约束：

- a) 网络潮流约束；
- b) 备用约束；
- c) 母线或变压器上的最大允许电流约束；
- d) 馈线的容量约束；
- e) 系统中各节点电压幅值约束。

即可转化为如下模型：

$$\begin{aligned} \text{obj. } \min .f(x) &= 0 \\ \text{s.t. } h(x) &= 0 \\ g &\leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (7)$$

该 Agent 的推理器通过内点法求解模型，由该模型是否有解判断由 a)-e) 方程组是否存在可行解。

(8) 调度决策 Agent

该 Agent 负责提供调度的决策和指令，负责机组发电组合调整，负荷分配，发电机出力调整及机组检修、调峰、调频及备用容量的安排等。

该 Agent 通过协调 Agent 获取各功能 Agent 的结果，从而得到含决策变量优化模型的目标函数和约束，表示为如式 (8) 所示的模型。

$$\begin{aligned} \text{obj. } \min .f(x) \\ \text{s.t. } h(x) &= 0 \\ g &\leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (8)$$

其推理器为基于内点法求解非线性规划的求解器，具体步骤可参照文献[20]。

(9) 备用管理 Agent

安排备用容量应满足《电力系统安全稳定导则》和有关行业标准的要求，在不同类型机组和地区间合理分布。在智能电网下，大规模的风电并网后，风电的随机波动与负荷的波动叠加在一起，使系统面临的不确定因素更大，因此需要配置更多的旋转备用。而备用配置过多会增加运行成本，过少则会增加运行风险，因此节能调度问题应着重考虑如何优化和利用电网的备用。其推理器综合考虑逻辑推理和解算结构两种形式。

解算形式：

数学优化模型：

变量：承担旋转备用机组的出力。

备用：运行机组的容量-出力。

目标函数为：系统在调度周期内总备用最小。

约束：

- a) 系统功率平衡方程；
- b) 机组输出功率约束；
- c) 机组爬坡率约束；
- d) 节点电压约束；
- e) 输电线路电流约束；
- f) 机组备用容量约束；
- g) 系统稳定性约束；
- h) 输电线路容量约束；
- i) 联络线传输容量约束；
- j) 区域系统频率偏差约束。

从而得到如式 (8) 所示的数学模型，其推理器为基于内点法求解非线性规划的求解器。

推理形式：

上述的备用管理 Agent。也可按如下规则确定备用。

$$S = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6 \quad (9)$$

式中： s_1 为平衡瞬间负荷波动与负荷预计误差的旋转备用容量，经验值为预测最大发电负荷的 2%~5%，高峰时段按下限控制； s_2 为事故备用的可供短时调用的备用容量，经验值为预测最大发电负荷的 10% 左右，且不小于系统中最大单机容量或电网

可能失去的最大受电功率; s_3 为满足运行机组周期性检修所需的检修备用容量, 经验值为预测最大发电负荷的 8%~15%; s_4 为应对水电来水以及其他可再生能源发电能力波动的备用容量, 可依实际需要留用; s_5 为应对重大节假日和重大活动的备用容量, 依实际需要留用; s_6 为应对新建机组投产日期不确定性和运行初期不稳定性的备用容量, 依实际需要留用。

s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 和 s_6 可由该 Agent 与调度员交互, 由调度人员根据实际经验确定, 或该 Agent 通过建立最优备用模型自主确定。

2.3 Agent 间的协作

智能调度系统中, 在各个 Agent 不断地对其他 Agent 发送信息或服务求解, 或者不断地响应其他 Agent 的消息的过程中, 智能调度系统的功能得以实现。各类 Agent 的协作关系如下:

(1) 协调 Agent: 是系统中最活跃的 Agent。在其接收到控制 Agent 的命令之后, 巡访所有的功能 Agent, 并和基本功能 Agent 进行沟通协商。通过与其他类型的 Agent 协商, 完成在计划周期内的机组的开/停, 和出力/备用容量状态的计划。协调 Agent 有自己的沟通规则, 这些规则可使它的任务完成得更为出色, 获得更加令人满意的短期发电计划。

(2) 基本功能 Agent: 存在于每台机组的控制计算机, 或者每个独立电厂的服务器上。其知识库中保存有机组的完整特性信息和相应的一系列规则(约束条件)。这些 Agent 不能移动, 但是掌握着一些和协商 Agent 的简单计算规则和函数, 并具有判断某些约束条件和自动改变机组状态(如: 开/停状态)的功能。它们可独立完成某种任务, 检修管理 Agent 能审核检修计划, 安全管理 Agent 能校核系统安全性。同时, 也能通过协调 Agent 为调度决策 Agent 提供对应的约束条件, 从而获得最大利润的出力/备用参考服务计划。

(3) 调度决策 Agent: 是系统的中心决策者。运行与控制中心的服务器上(例如, 嵌入在电力系统监视和控制系统中), 与其他分散在各地的计算机用网络相连。它从其他的支持系统获得预测数据(负荷/备用需求, 实时电价, 备用电价等), 并命令协调 Agent 根据预测数据去完成短期发电计划任务。能观察到基本 Agent 的状态信息, 还能发送调节发电信息要求给协调 Agent, 并等待接收协调 Agent 的应答。

以制定某日方式为例, 介绍 Agent 间的消息传

递过程, 如图 5 所示。

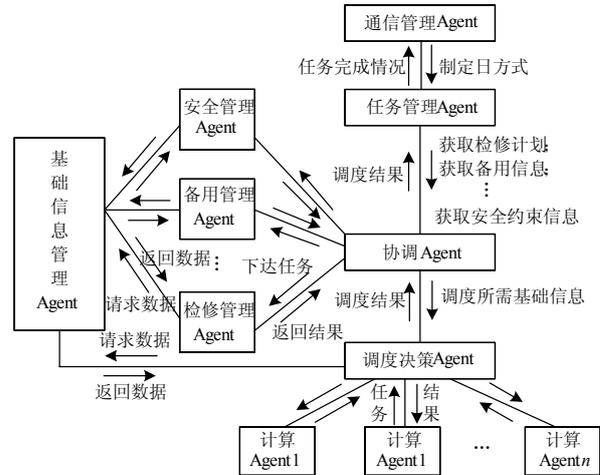


图 5 多 Agent 的协作过程

Fig.5 Collaborative process of multi-Agent

(1) 控制 Agent 接收到外界发送的“制定日调度计划”通知消息;

(2) 控制管理 Agent 根据功能对任务进行分解, 产生 n 个子任务, 并向协调 Agent 发送消息;

(3) 协调 Agent 收到子任务消息通知后, 根据子任务的目标向各功能 Agent 发送任务消息, 并等待结果;

(4) 各功能 Agent 完成任务后, 向基础数据管理 Agent 发送消息索取所需数据;

(5) 基础数据接受到所要数据消息后, 将数据返回各功能 Agent;

(6) 各功能 Agent 接到数据通知后进行计算, 并将完成情况以信息形式返回协调 Agent;

(7) 协调 Agent 获得所有功能 Agent 的回应后, 给调度决策 Agent 发送通知, 并向其传送数据;

(8) 调度决策 Agent 接受到任务后, 向基础数据管理 Agent 发送消息索取所需数据;

(9) 基础数据接受到所要数据消息后, 将数据返回各功能 Agent;

(10) 调度决策 Agent 获得数据后, 启动并行推理计算, 并将结果通知协调 Agent;

(11) 协调 Agent 接受到结果通知后, 向控制 Agent 返回调度结果;

(12) 控制 Agent 通过通信管理 Agent 执行或公布调度决策。

至此, 完成整个通信过程。

根据对 Agent 之间协作关系的讨论, 可以看出在智能调度系统中, 若干管理 Agent 起着主导作用, 其他 Agent 则响应它的控制, 提供服务, 处于从属地位。这是一种主从服务的协作关系。例如, 任务

管理 Agent 和资源管理 Agent 之间存在服从关系。另外，在 Agent 之间还存在一种对等的协作关系，这些 Agent 处于平等的地位，彼此之间相互提供服务。例如，在单元管理 Agent 之间的协作就是对等的。

3 智能调度多 Agent 系统的应用举例

为了验证该智能调度多 Agent 系统的自适应性、智能性和快速性，本文采用如图 6 所示的某区域智能电网^[21]，对比说明传统调度系统与多 Agent 智能调度系统的决策过程。

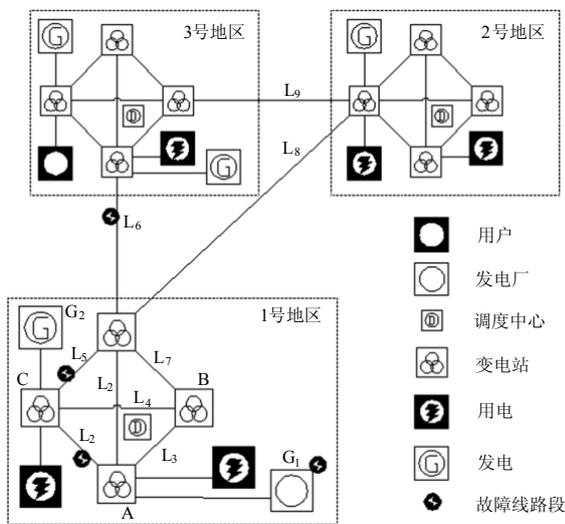


图 6 智能电网决策状态图

Fig.6 Diagram of smart grid decision state

(1) 传统自动化调度系统工作过程

0.6 s

如果发电机 G₁ 突然发生故障，变电站 B 的调控计算机一般会关闭 L₃ 号线，以减少供电需求。但是现在 G₁ 发电机是系统有意停止运转的，因此整个 1 号地区的计算机便发出通知，决定让一家大型工厂停止生产，大大降低供电需求。这一措施减少了发电量之间供不应求的状况，以保证诸如路灯照明和医院之类的重要职能部门的供电。

10 s

几秒钟后，由于供不应求的状况仍然十分严重，变电站的计算机检测到整个 1 号地区的电压开始波动，波动值超过安全允许的范围，有可能给 L₃ 和 L₄ 号地区和 L₇ 号地区的计算机将发电机 G₂ 的控制改为人工操作，并建议 1 号地区调度中心的调度人员增加发电量减少用电负荷，调度员会采取其中一项措施。

60 s

L₃、L₄ 和 L₇ 号线路已处于空载状态，而 L₄ 号线开始出现过载，该调度中心调度人员通过卫星通信与 2 号地区的调度员联系，请求帮助。2 号地区调度员通过 L₈ 号线路发送电力；他们还命令其部门的调控计算机稍微调整供电电流，以平衡因突然借电而带来的电力失衡。一旦维修人员修复了受损坏的 L₅ 号和 L₇ 号线路，计算机便让 L₁ 号线路和发电厂 G₁ 马上投入正常运行。至此，三个地区的电力供应全面恢复正常。

(2) 多 Agent 智能系统工作过程

当系统检测处于紧急运行状态时，控制 Agent 首先通知 1 号地区的安全校核 Agent，计算该地区满足安全稳定的运行方案，并向控制 Agent 返回计算结果。

若安全校核 Agent 计算收敛，则控制 Agent 将该计算结果返回通信管理 Agent，由通信管理 Agent 执行。假设计算结果为请求 2 号地区支援 50 MW。

2 号地区的通信管理 Agent 接收到指令后，其控制 Agent 与安全校核 Agent 通信，安全校核 Agent 通过推理计算，获取一个满足该地区安全稳定调度方案后，其通信管理 Agent 通过 L₈ 线路发送电力，并按该方案调整本区内。

至此，两个地区电力供应恢复正常。

可见，与传统方案相比，所建立的多 Agent 系统具有如下特点：

智能性：多 Agent 能自动感知外部的变化，并通过计算获取合理的调度方案；而传统调度自动化通过调度员来决策，难以考虑众多方面，往往会出现调度不当，扩大事故，从而造成不必要的损失。

自愈性：该系统自动感知外界变化，系统中的多 Agent 相互协调、协商及协作自动处理了异常情况，所以系统具有很强的自适应性和自愈能力。

快速性：在整个处理过程中，并不需要调度员的处理，全靠计算机来实现，计算机处理的速度远优于调度员，因此，系统能及时跟踪外界的变化。

4 结论

为了实现智能调度，更好地满足智能电网的要求，本文综合 Agent 理论，节能发电调度实施细节及电力系统运行特点，建立节能发电多 Agent 智能调度系统，该系统将节能发电调度中复杂抽象的原则、理论、方法、技术与电力专业分析技术紧密结合起来，充分发挥 Agent 的自主性、自治性以及智能性，形成基于多 Agent 的人机合作系统，分散协调控制节能调度中所涉及的安全、经济、节能和环保等诸多方面，制定出符合节能发电调度原则的优

质调度方式。文中最后通过示例,与传统调度自动化相比,该系统具有更好的智能性,自适应性,快速性和自愈能力,满足智能电网建设的要求。本文研究成果为智能电网下智能调度的建设和实施提供了有效的方案。

参考文献

- [1] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 1-11.
ZHANG Wen-liang, LIU Zhuang-zhi, WANG Ming-jun, et al. Research status and development trend of smart grid [J]. Power System Technology, 2009, 33 (13): 1-11.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33 (8): 1-7.
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33 (8): 1-7.
- [3] 王明俊. 智能电网热点问题探讨[J]. 电网技术, 2009, 33 (18): 9-16.
WANG Ming-jun. Some highlights in relation to smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33 (18): 9-16.
- [4] 何光宇,孙英云,梅生伟,等. 多指标自趋优的智能电网[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 1-5.
HE Guang-yu, SUN Ying-yun, MEI Sheng-wei, et al. Multi-indices self-approximate-optimal smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (17): 1-5.
- [5] McArthur, Davidson S D J, Funabashi F. Multi-Agent systems for power engineering applications-part II: technologies, standards, and tools for building multi-Agent systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (4): 1753-1759.
- [6] Zhao B, Guo C X, Cao Y J. A multi-Agent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2005, 20 (2): 1070-1078.
- [7] Nordman M M, Lehtonen M. Distributed Agent-based state estimation for electrical distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2005, 20 (2): 652-658.
- [8] Dimeas A L, Hatziaargyriou N D. Operation of a multi-Agent system for microgrid control[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2006, 20 (3): 1447-1455.
- [9] McArthur S D J, Booth D, McDonald J R, et al. An Agent-based anomaly detection architecture for condition monitoring[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2005, 20(4): 1675-1682.
- [10] Davidson E M, McArthur S D J, McDonald J R. Applying multi-Agent system technology in practice: automated management and analysis of SCADA and digital fault recorder data[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2006, 21 (2): 559-567.
- [11] Baran M E, El-Markabi I M. A multi-Agent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2007, 22 (1): 52-59.
- [12] McArthur S D J, Strachan S M, Jahn G. The design of a multi-Agent transformer condition monitoring system[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2004, 19 (4): 1845-1852.
- [13] 刘敏,吴复立. 电力市场环境发电商电能分配策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (25): 111-117.
LIU Min, WU Fu-li. Trading strategy of generation companies in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (25): 111-117.
- [14] 喻洁,李扬,夏安邦. 兼顾环境保护与经济效益的发电调度分布式优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (16): 63-68.
YU Jie, LI Yang, XIA An-bang. Distributed optimization of generation dispatch schedule considering environmental protection and economic profits[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (16): 63-68.
- [15] 周伟,彭昱,孙辉,等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (25): 13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (25): 13-18.
- [16] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4): 41-47.
SUN Yuan-zhang, WU Jun, LI Guo-jie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.
- [17] 黎静华,韦化. 求解机组组合问题的领域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 33-40.
LI Jing-hua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 33-40.
- [18] 韦化,吴阿琴,白晓清. 一种求解机组组合问题的内点半定规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 35-40.
WEI Hua, WU A-qin, BAI Xiao-qing. An interior point semi definite programming for unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1): 35-40.
- [19] 黎静华,韦化. 基于模式搜索算法的电力系统机组组合问题[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (6): 123-128.

(下转第 108 页 continued on page 108)

Trans on Energy Conversion, 2000, 15 (4): 433-439.

[3] 王成山, 王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 1-4.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 1-4.

[4] 陶琼, 吴在京, 程军照, 等. 含光伏阵列及燃料电池的微网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 89-93.
TAO Qiong, WU Zai-jing, CHENG Jun-zhao, et al. Modeling and simulation of microgrid containing photovoltaic array and fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (1): 89-93.

[5] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2): 82-86.
GUO Li, WANG Cheng-shan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2): 82-86.

[6] Slootweg J G, Polinder H, Kling W L. Initialization of wind turbine models in power systems dynamics simulation[C]. //IEEE Proto Power Tech Conference. Porto (Portugal): 2001.

[7] GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, CHENG Ru-qi, et al. Simulation of wind turbine based on Fuzzy-PI control[C]. //The 2nd conference on PEITS. Shenzhen (China): 2009: 130-133.

[8] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22 (4): 409-412.
SU Jian-hui, YU Shi-jie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22 (4): 409-412.

[9] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (5): 1248-1251.
MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.

[10] Shepherd C M. Design of Primary and secondary cells-part 2: an equation describing battery discharge[J]. Journal of Electrochemical Society, 1965: 657-664.

[11] Tremblay O, Dessaint L -A, Dekkiche A -I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. //Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007: 284-289.

[12] PENG Fang-zheng. Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (2): 504-510.

[13] ZHOU Zhi-jian, ZHANG Xing, XU Po, et al. Single-phase uninterruptible power supply based on Z-Source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (8): 2997-3004.

收稿日期: 2010-04-15; 修回日期: 2010-08-25

作者简介:

郭天勇 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与光电子技术; E-mail: gty_0101@163.com

赵庚申 (1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与光电子技术;

赵耀 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与光电子技术。

(上接第 103 页 continued from page 103)

LI Jing-hua, WEI Hua. A general pattern search algorithm for electric power system unit commitment problems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (6) : 123-128.

[20] 黎静华, 韦化. 基于内点法的机组组合模型[J]. 电网技术, 2007, 31 (24) : 28-34.
LI Jing-hua, WEI Hua. A unit commitment model based on interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31 (24) : 28-34.

[21] 黎静华, 兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2) : 1-7.
LI Jing-hua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (2) : 1-7.

[22] 周渝慧. 智能电网—21世纪国际能源新战略[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

黎静华 (1982-), 女, 讲师, 博士生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用, 电力系统优化运行与控制; E-mail: happyjinghua@163.com

韦化 (1954-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为现代内点最优理论及其在电力系统中的应用;

夏小琴 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化。