

## 可再生能源分布式发电能量管理的复杂性研究

曾君<sup>1</sup>, 刘俊峰<sup>2</sup>, 吴丽群<sup>3</sup>, 吴捷<sup>1</sup>, 颜汉荣<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 广东省绿色能源重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 香港理工大学 电机工程学系, 香港 红磡; 3. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 本文主要研究可再生能源分布式发电系统能量的优化与协调问题. 基于系统能量管理中优化与协调控制问题的复杂性, 提出采用基于Agent的建模与仿真方法进行研究. 针对系统要求, 以分散式发电系统的实体节点的映射封装Agent, 提出了智能混合控制Agent的概念, 建立了3层混合Agent的内部结构模型; 并建立了以个体层、组织层和社会层构成的3层动态层级MAS体系结构, 进一步辅以主导Agent和移动Agent辅助系统优化与决策, 最终建立了一种新的面向可再生能源的分散式发电系统能量管理的MAS宏观模型. 最后应用有色Petri网对系统的优化与协调过程进行了动态模拟, 验证了所提出的结构的正确性、合理性和有效性.

**关键词:** 可再生能源; 分布式发电; 能量管理; 优化与协调; 多Agent系统

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Complex characteristics of energy management system for distributed renewable energy generation

ZENG Jun<sup>1</sup>, LIU Jun-feng<sup>2</sup>, WU Li-qun<sup>3</sup>, WU Jie<sup>1</sup>, NGAN H.W.<sup>2</sup>

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** A new system of energy management for distributed renewable energy generation is proposed. The complex characteristic of this system is analyzed, and requirements on coordination and optimization for energy management are presented in the agent-based modeling simulation. The intelligent hybrid agent is proposed with a three layer model, and a dynamic macro multiple agent system is built. New concepts of the main-agent and the mobile-agent are proposed to facilitate the decision-making and the system optimization. Finally, a colored Petri Net is built and applied to simulate the cooperation and optimization process of the system in operation. The results show that the system is valid, rational and effective.

**Key words:** renewable energy; distribution generation; energy management; optimization and cooperation; multi-agent system

### 1 引言(Introduction)

在国家“建设资源节约型、环境友好型社会”<sup>[1]</sup>新形势下, 分布式发电技术得以快速发展. 以再生能源作为基本支撑的分布式发电多指以生物能、太阳能、风能和小型燃气轮机等支撑辅以能量存储控制设备形成的小型发电系统(一般50MW以下), 可以并网或者脱网运行<sup>[2]</sup>. 系统因地因时制宜, 在负荷附近就地建设安装, 解决了分散电力需求, 减少了电力新建或升级输、配电网的费用, 改善供电可靠性和电能质量, 与环境具有良好的相容性. 在现阶段可在生态(绿色)建筑区、海岛、边防哨所、偏远的农村和山区等大电网无法达到或者建设成本过高的地区进行

大力推广, 具有广泛的应用前景.

从优化与控制的视野, 对于分布式发电系统的研究, 主要集中在对分布式发电设备的研发、制造和设备自身控制方面, 以及单种可再生能源大规模接入电网时对大电网的影响<sup>[3]</sup>, 接入标准<sup>[4]</sup>等等, 而涉及分布式发电系统的优化、协调和控制等领域的研究则刚刚起步. 文献[5]采用分布式问题求解方法, 以总建设费用最小为目标建立了分布式发电系统的优化模型, 对分布式发电系统的选址和容量控制进行了有益的研究<sup>[5]</sup>, 但并未涉及分布式发电系统内部的优化与协调控制问题. Mohamed在分别建立了柴油发电机、燃料电池、微型燃气轮机、风力发电

机、光伏阵列和蓄电池的单独模型后,建立了静态情况下的分散式发电系统模型,并且以系统运行费用最小和环境污染最小为目标,采用多目标规划,运用自适应网格直接搜索法、遗传算法和博弈算法等进行了混合能源之间的优化方法研究<sup>[6]</sup>。Dimeas采用多Agent系统(MAS)技术研究了由分布式电源组成的多个微网之间的协调控制,采用经典的拍卖策略,以整个电力市场为背景,确定最优组合,并通过与集中式控制进行对比,证明了所提出方法的有效性<sup>[7]</sup>。Lum等人则将每个分布式电源节点和负载作为独立的节点由Agent代理,采用MAS技术,建立了由柴油发电机、风力发电机和地热工厂以及燃料电池组成的分布式供能系统的模型,采用合同网策略进行了系统各电源之间的协调控制<sup>[8]</sup>。在我国,文献[2]提出电源之间的协调优化控制将是分布式电源的重要研究内容之一<sup>[2]</sup>。徐大明等人提出采用遗传算法进行风光互补独立供电系统的优化设计<sup>[9]</sup>,优化目标为系统安装成本和供电可靠性。王明俊以分布式电源的接入讨论了新一代电网能量管理系统的问题,分析了实时分布式系统采用集中式求解所遇到的问题,提出该问题的解决新途径即采用Agent技术<sup>[10]</sup>。华南理工大学新能源研究中心,对基于可再生能源的分布式发电系统的协调控制方法进行了初步的研

究,先后提出采用模糊控制方法<sup>[11]</sup>、以MAS技术建立系统模型,采取多目标规划和有色Petri网进行协调控制的初步研究<sup>[12-15]</sup>。

本文以华南理工大学新能源研究中心的风力-太阳能分散式发电系统为基础,提出了一种新的分散式发电系统的体系结构,并以此结构为基础,分析了系统的特点以及建立顶层能量管理系统的重要意义,并对能量优化与协调控制问题的复杂性进行了分析,指出实际上是一个具有开放性、动态性、分散型、层次性、自适应性和非线性等特点的复杂性问题,提出采用基于Agent建模方法,融合新的优化与协调控制技术,为面向再生能源的分散式发电系统建立新的模型体系。最后,应用有色Petri网模拟了系统能量优化与协调的动态过程,证明了所提出方法的有效性。

## 2 面向可再生能源的分散式发电系统(Distribution generation based on renewable energy)

### 2.1 系统体系结构(Frame of the DG)

本文在实验室已有风光互补发电系统基础上进行一定的扩展,建立的分布式发电系统的体系结构如图1所示。

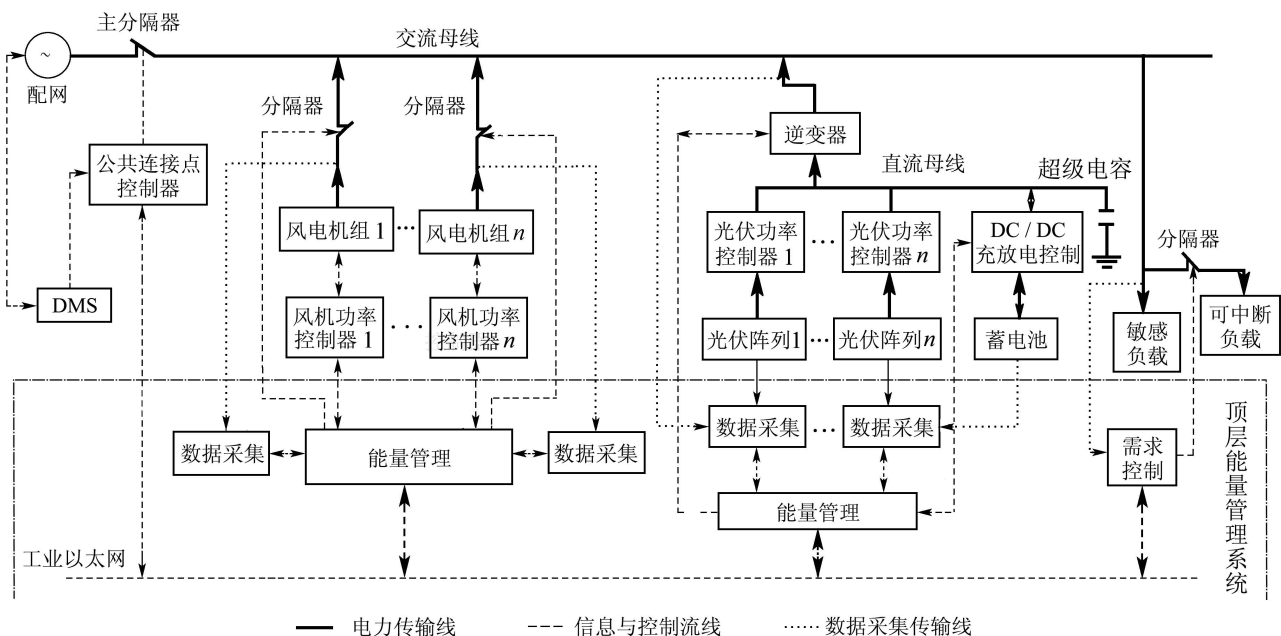


图1 华南理工大学电力学院新能源研究中心风力-太阳能发电系统组成示意图

Fig. 1 Framework of distributed renewable energy power system in renewable energy research center of South China University of Technology

从图1可以看出,系统分为两层。底层由各风机、光伏阵列、蓄电池、负载等基本单元构成,通过交流母线实现能量流动。该层主要利用控制技术实现底层的连续控制,完成风能的最大功率捕

获控制和太阳能最大功率跟踪控制,解决实现风能最大捕获和太阳能最大功率跟踪而带来的变速运行和光伏设备的变压/变流调节等以及蓄电池充放电控制等等。顶层为能量管理系统,建立在底

层单元控制的基础上,各能量管理单元通过光纤以太网实现数据和信息传输,根据负荷需求、能源资源、气象条件等解决风力-太阳能发电的协调控制,进行能量的协调和优化管理.在该基本结构基础上,形成不同容量的分布式风光互补发电系统.

## 2.2 能量管理系统(Energy management system)

本文中能量管理主要针对分布式发电系统的优化与协调控制,基本功能在于根据环境变化,实时优化与调度,根据系统发电、负荷需求,实现系统的供需平衡,提供优质电能.相对于传统以化石能源为主的集中式供电来说,面向可再生能源的分布式发电系统中电源具有多样性并且受到不同外界环境的影响、约束和限制,系统具有动态随机性,能源节点频繁的退出和投入运行,系统的能源供给和负荷需求具有时空分散性.而储能装置的大量存在使得系统能量在支路上可双向流动.能源节点与负荷节点要求独立性,其接入与退出要求具有标准的接口和交互模式,保证分布式发电系统的柔性和动态重构的能力.因此,对于分布式发电系统,小到电源个体,大至系统本身,进而扩展至分散式发电系统与系统之间,以致未来整个智能电网的需求,都迫切要求建立能量管理系统,在电源自治和系统局部优化的基础上,实现个体与系统之间的协商以达到全局优化,并要求能够动态适应系统内在的复杂性和环境变化的动态随机性,实现动态优化与调度,最终达到能源的优质高效利用.

综上所述,并结合图1,分散式发电系统的能量管理系统具有以下特性:①电源的分散性,决定了其能量管理系统的开放性;②环境变化的不可预知性,决定了其能量管理系统的动态性;③各个单元之间具有聚集性,决定了其能量管理系统的层次性;④分散式发电系统中离散与连续事件的并存,决定了能量管理系统必然是混合动态系统;⑤同类能源节点之间,不同能源节点之间,能源节点、储能节点与负荷之间,互相交互,各个单元之间要求协同与协作,从而保持系统的平衡.个体要求自身的最优,系统要求全局的最优,这决定了能量管理系统的非线性性和自适应性.

综合以上各点,对于能量管理系统的开发,在基本的优化与调度机制上,它的优化与协调控制技术有着新的要求,可以概括为以下几点:

1) 分布式控制.系统节点组成松散耦合系统,具有不同类型和程度的时间约束的并行任务执行,各节点之间紧密的协作,并且具有一定的执行不确定性,可能会产生冲突甚至死锁等.

2) 智能控制.节点自治和协调必备的基本特性

使得系统所需求的智能控制是多方面的,主要是学习性、自适应性和重构性.

3) 协商控制.各个不同层次的控制节点能在同级(水平)和上下级(垂直)之间相互交互协商.

4) 基于事件驱动的动态控制.系统不再满足于传统的统一步长的协调控制,而是要求能够捕捉环境的变化,并且对其进行辨识,产生基于事件的实时优化与协调策略.

因此,能量管理系统可以看作是现代系统科学研究中较为复杂的一类系统-开放的复杂系统,本文采用基于Agent建模方法,融合新的优化与协调控制技术,建立新的模型体系.

## 3 基于Agent的能量管理系统建模(Modeling to the EMS based on agent)

基于Agent的建模方法是研究复杂系统的一种自顶向下分析,自底向上综合的有效建模方式.这种从个体到整体,从微观到宏观的建模方式,克服了复杂系统难于自上而下建立传统的数学分析模型的困难.现在,Agent的思想和技术广泛应用于各个领域,它甚至不再仅仅是一种简单的概念、技术或者方案,而是一种思维方式,是一种更加符合人类社会学的思维方式,是一种方法论.

### 3.1 Agent微观模型的建立(Micro model building)

本系统中Agent指代分散式发电系统中的实体节点,包括电源节点(风机、PV阵列)、储能节点(蓄电池)和负荷节点,映射成对应的两大类型Agent,分别为电源Agent和负荷Agent.具体定义如下:

风机Agent(wind turbine agents, WTAs): 电源Agent的一种,对风力发电机进行能量管理.

光伏Agent(photovoltaic array agents, PVAs): 电源Agent的一种,对光伏阵列进行能量管理.

负荷Agent(load agent, LA): 对负荷进行能量管理.并进一步分为可中断负荷Agent(interruptible load agent, ILA)和不可中断负荷Agent(uninterruptible load agent, ULA)两类.

储能Agent(battery agents, BAs): 对储能节点进行能量管理.在本系统中看作是电源Agent的一种.由于储能Agent同时具有电源和负荷的双重特性,借鉴电路理论中对电流引入“参考方向”的意义,本文引入“参考状态”对其进行如下规定,储能Agent以电源形态出现,处于放电状态时,其输出功率为“+”;当储能单元以负荷形态出现,处于充电状态时,其输出功率为“-”.

若考虑与大电网的连接,可以设置电网Agent,

定义如下: 电网Agent(power grid agent, PGA): 电网Agent代理大电网, 由于与分散式发电系统相比, 大电网容量远远大于分散式发电系统, 因此, 在本文中, 将其看成一个无限大的容量池: 当分布式发电系统供大于需时, 电网Agent能无限接收系统的多余容量; 当分布式发电系统供小于需时, 电网Agent能无限满足系统所需. 基于大电网Agent可以同时提供或者吸收能量, 考虑本文主要的研究

对象为可再生能源, 因此, 同理引入“参考状态”, 将其作为负荷Agent一类, 当电网Agent为分散式发电系统提供能量时, 其输出功率为“-”, 当电网吸收分散式发电系统容量时, 其输出功率为“+”.

对应于图1, 基于Agent建模的分散式发电系统能量管理系统的基本结构如图2所示. 图中Agent总的数量由系统中风力发电机组、光伏阵列和储能节点的数量决定.

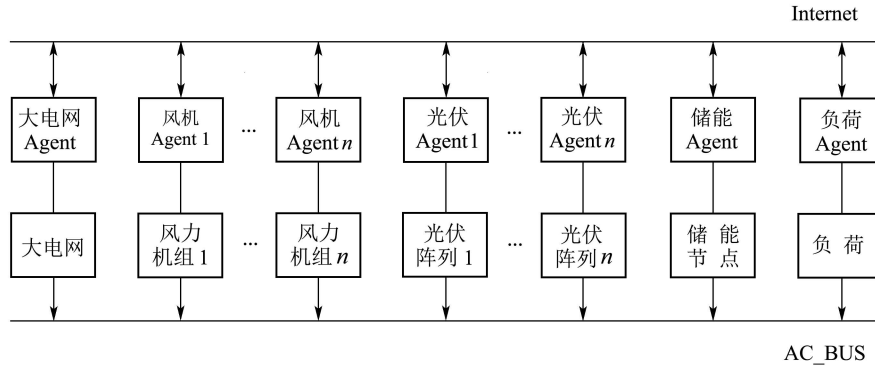


图2 能量管理系统的基本结构图

Fig. 2 The construction of the DG EMS model

基于能量管理系统的要求, 本文提出智能混合控制Agent, 具体为: “智能”是指各个Agent除了具有数据处理、控制和通讯的功能外, 还具有自主决策、相互协调、学习和适应的能力; “混合”则是将混合控制的概念与技术作为内核植入Agent中, 它既包含连续控制部分, 还具有离散决策部分. 借鉴Muller提出的混合主体结构NTERRAP<sup>[15]</sup>, 依据不同程度的抽象和复杂程度, 采用3层结构描述主体, 控制和知识库均为多层的, 并且, 控制过程自底向上, 决策过程由上至下, 形成Agent微观模型如图3所示.

识、自我意识和社会意识. 自底向上传递Agent的意识和意愿, 通过通信和协调机制, 自顶向下传递决策和动作指令, 意识和行为双向传递, 充分尊重了Agent自身意愿, 又体现了全局优化和决策. 从图3可以看出, 微观模型从整体上来说, 可以分为两大部分, 分别是离散的决策部分和连续控制部分. 模型描述了当系统环境发生变化, Agent个体从“感知-辨识-计划-合作-决策-行动”的离散决策过程, 以及“控制-评估”的连续运行过程, 其中评估机制的建立十分重要, 它直接将离散决策和连续运行部分紧密地结合起来. 而感知, 不仅仅指感知自然环境的变化, 还包括非Agent本身的其他Agent和运行环境的变化.

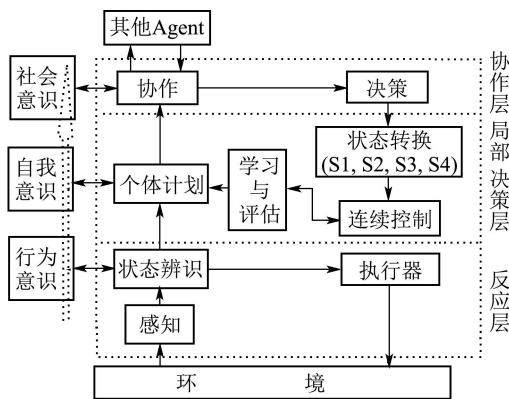


图3 Agent微观模型

Fig. 3 The micro model of agent

该模型共分3层, 分别为反应层、局部决策层和协作层, 各层对应相应的意识状态, 分别为行为意

### 3.2 MAS宏观体系的形成(Macro model building)

#### 3.2.1 MAS的体系结构(Framework of macro model)

MAS体系结构的建立, 实际上是Agent相互间关系的确立和协调机制的建立. 体系结构的合理性直接影响系统中各种信息流的流动和相互作用, 最终决定系统的生存能力. MAS体系结构的设立, 主要考虑系统的可靠性、容错能力、可扩展性和可重构性.

如果选择固定结构的MAS结构, 虽然应用过程中, Agent之间的交互、任务分配以及负载平衡等问题相对比较简单, 但显然有违MAS的开放性特

点, 降低系统适应能力和求解能力. 因此, 本文提出动态重构MAS, 根据环境变化, 调整自身结构, 动态构成MAS系统.

**定义 1** 分散式发电系统能量优化与协调控制的MAS体系中, Agent对应于发电系统中的实体节点, 而物理系统映射所产生的Agent的集合中, MAS指的是在一次决策后, 通过已有Agent的信息, 动态选择的参加运行的Agent的最优集合, 是一个具备一定组织结构的, 根据环境变化不断重构的系统.

### 3.2.2 动态层级结构的MAS(Dynamic structure of MAS)

本文建立的MAS宏观体系结构如图4所示.

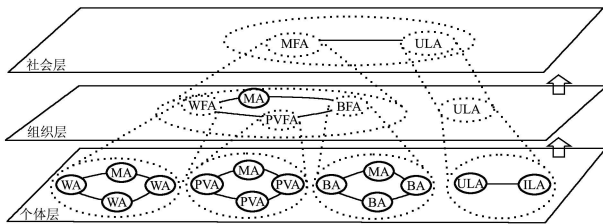


图 4 MAS宏观体系结构图

Fig. 4 The macro system architecture of the MAS

对图4说明如下:

1) 系统分为3层, 分别为个体层、组织层和系统层. 其中, 只有个体层是实际存在的, 组织层和系统层均为虚拟层, 因此在图中以虚线框表示.

2) 个体层的Agent由实体节点映射而成, 其数量由实际系统的组成决定, 并随系统变化而变化.

3) 移动Agent(mobile agent, MA): MA在MAS中是移动的, 并且不同的MA在固定的组织中流动, 其微观模型中嵌入了简单比较算法和令牌权, 在其移动的过程, 根据比较结果, 将令牌赋予优胜Agent个体. 获得令牌的Agent个体在此次决策中, 拥有决策权, 是为主导Agent.

4) 主导Agent: 获得MA令牌的Agent是为当次主导Agent, 具有当次决策权. 系统中每个Agent都有成为主导Agent的可能. 当次主导Agent是当前环境下同类Agent中的最优者.

5) 个体层中每个Agent在连续运行状态下, 是完全平等的, 当系统要求重构时, 个体Agent会根据各自具体角色, 同种类的Agent会聚集在一起, 形成群, 是为组织, 如图4中个体层的虚线环所示. 并由获得令牌的Agent成为组织中的决策者, 成为主导Agent. 在本系统中分别为WFA(风机群中主导Agent)、PVFA(PV阵列群主导Agent)、BFA(储能群主导Agent). 至于负荷Agent, ULA优先级永远高

于ILA, 因此ULA恒为负荷Agent中的主导Agent.

6) 个体层的主导Agent形成高一级的组织层, 是为组织层的决策集体. 在该层中, 根据角色FA进一步聚集成群, 形成两大社会, 分别为能源供给社群和负荷需求社群. 在能源供给社群中, 同样设有移动Agent在WFA、PVFA和BFA中移动, 根据一定的规则, 确定三者之间的主导Agent, 是为MFA, MFA根据与ULA的通信, 获取负荷需求, 进行全局决策.

综上, MAS是一个动态结构体系, 其只具有基本的社会组织架构, 具体的成员Agent随着环境的变化, 动态构成. 在MAS的个体层. 形式上是环状的完全分散式的结构, 各个Agent之间完全的平等, 但通过主导Agent概念的引入, 实际上又形成了层次结构, 在公平的基础上, 体现了MAS的社会性和层次性, 降低了个体的计算量和通信量, 有效的解决的通信和计算能力的瓶颈问题.

### 3.3 MAS的协调求解方法(MAS coordination method)

根据MAS的体系结构, 图5给出了MAS优化与协调的流程示意图. 如图5中所示, 计划的传递和决策的产生分成两部分:

第1部分: 个体计划自底向上传递. 首先, 在个体层由Agent自身完成自我的初步规划, 形成个体计划; 其次, 给当节点聚类形成组织后, 组织中的主导Agent FA在获取其组织内Agent的计划后, 通过调用相应的优化算法, 完成该组织内的初步规划, 形成组织计划; 最后, 由各组织主导Agent FA聚类形成社会, 社会的主导Agent MFA在获取供需数据后, 通过调用相应的优化算法, 完成社会的全局优化, 形成最高决策;

第2部分: 全局最优决策自顶向下传达: 首先, MFA调用相应的优化与协调算法, 完成全局优化, 形成最高决策; 其次, MFA将最终决策通知所有的FA; 最后, FA将最终决策通知给其组织内的Agent个体.

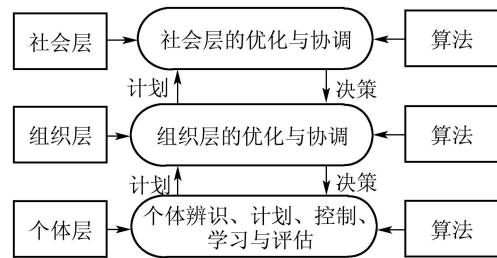


图 5 MAS优化和协调流程示意图

Fig. 5 The process of optimization and cooperation for MAS

综合MAS的体系结构和协调流程可见, 这样的体系结构和协调机制, 使得系统既自底向上的组合, 充分的尊重了Agent个体自身的意愿和自主决策权, 同时具备自顶向下的决策过程, 在尊重Agent个体意愿的前提下, 从全局出发, 得到全局最优. 这样自底向上的计划呈递和自顶向下决策的传达, 既保证了全局的最优, 又兼顾了Agent个体的利益.

#### 4 实验验证(Experiment and simulation)

本文采用有色Petri网对以上提出的结构进行验证. Petri网在1962年由C A Petri提出, 具有直观

的图形化描述方式和严格的数学基础, 可以清晰直观的表达复杂问题, 描述状态、事件、条件、同步、并行、选择和循环等形式.

有色Petri网是传统Petri网的一种扩展, 它通过对网系统中的托肯进行分类或解析, 解决了传统Petri网模拟过程中可能出现的组合爆炸问题[17].

#### 4.1 模型建立(CPN model building)

根据前述系统优化与调度的结构, 建立的有色Petri网如图6所示.

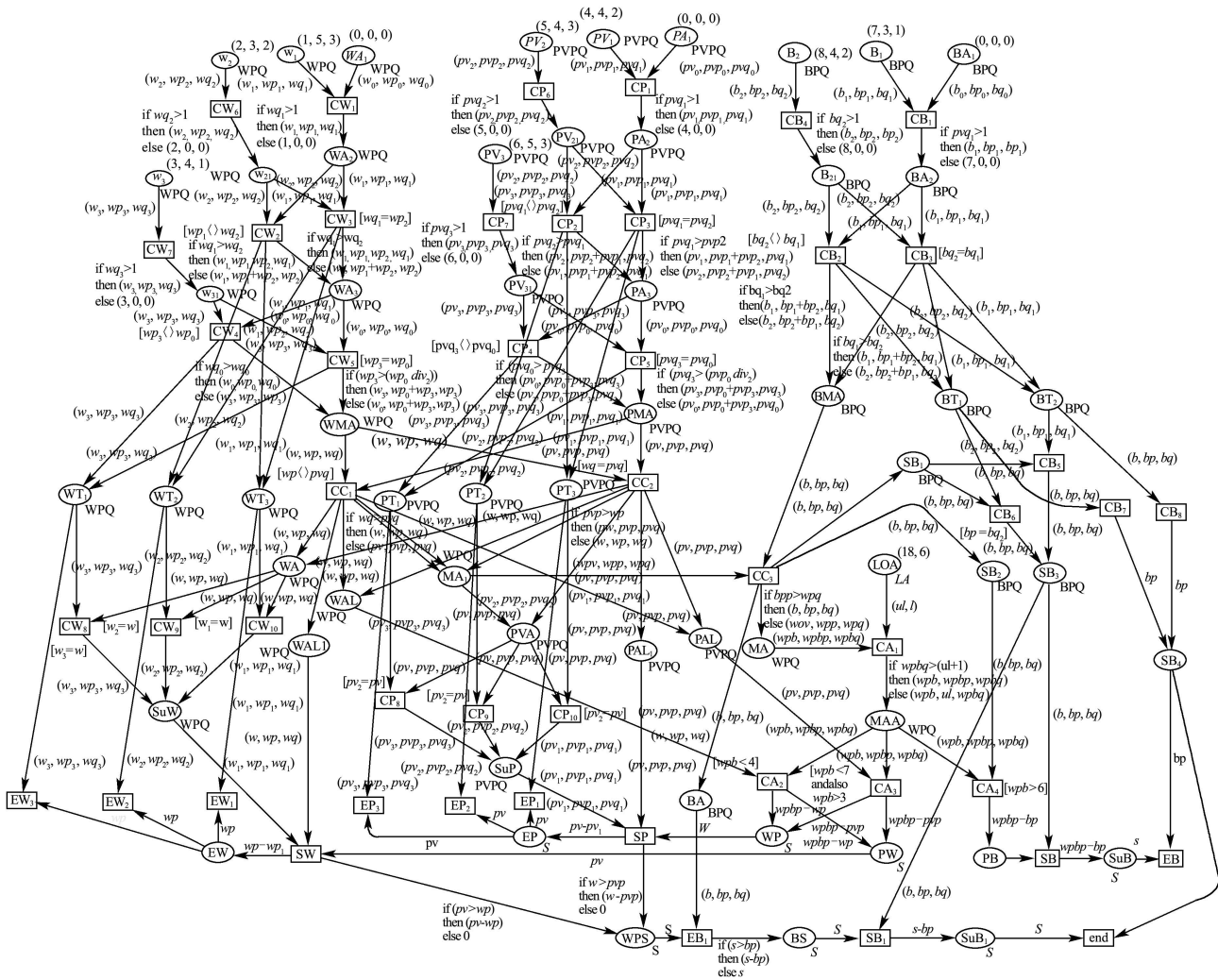


图6 基于有色Petri网的系统能量优化与调度动态过程模拟

Fig. 6 The dynamic simulation of the process in optimization and scheduling

图6中主要有色Token集、库所及变迁的定义:

1) 主要Token及变量定义:  $WPQ = (W, WP, WQ)$ ,  $PVPQ = (PV, PVP, PVQ)$ ,  $BPQ = (B, BP, BQ)$ , 分别为WTA, PVA和BA参数, 包括(Agent ID, 发电量, 电能质量).  $S$ 为经过决策或者是供电后系统应给负荷提供的剩余供电量.

2) 主要库所定义:  $W_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,  $PV_i (i =$

$1, 2, \dots, n)$ ,  $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为WTA, PVA和BA在当前环境下的基本计划(包括AgentID, 有功输出和电能质量参数); LOA为负载Agent(包括不可中断负载电量需求, 可中断负载电量需求); WA1, PA1, BA1分别表示风机Agent, 光伏阵列Agent和储能Agent个体层的移动Agent(初始值均为(0, 0, 0)); WMA, PMA, BMA分别为风力发电

组、光伏组和储能组的主导Agent(包括Agent ID表示该组所有Agent提供的总有功输出, 电能质量参数); MA1是WMA与PMA的主导者(包括Agent ID, 所有风机和PV Agent提供的总有功输出, 电能质量参数); MA表示所有发电Agent的主导者(包括Agent ID, 所有发电Agent提供的总有功输出, 电能质量参数); MAA表示决策参数(包括Agent ID, 系统应提供的电量, 发电装置中主导者的电能质量参数); WP(PW)表示WTA组织(PVA组织)优先供给, 储存有WTA组织(PVA组织)供电后负荷Agent所缺电量; WPS表示当风机Agent组织和PV Agent组织所提供的电量仍不能满足负载需求时, 储能系统所需提供的电量; PB表示储能Agent组织优先供给。

### 3) 主要变迁定义:

$CW_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为MA在风机Agent中移动比较;  $CP_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为MA在PV Agent中移动比较;  $CB_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为MA在储能Agent中移动比较; CA1为MFA与负荷Agent交互, 进行全局决策; CA2为MFA将全局优化决策传达给WFA; CA3为MFA将全局优化决策传达给PVFA。

## 4.2 实例验证与分析(Simulation and analysis)

按照上文定义, 假定各Agent初始值: 风力发电机Agent分别为(1, 5, 3), (2, 3, 2), (3, 4, 1); 光伏阵列Agent分别为(4, 4, 2), (5, 4, 3), (6, 5, 3); 储能Agent分别为(7, 3, 1), (8, 4, 2); 负荷Agent为(18, 6); 各群体中的移动Agent初始值均为(0, 0, 0)。

说明: ① 主导Agent的选择过程中, 电能质量优先级高于发电量; ② 只有当电能质量参数大于1时, 才认为该节点是合格的电源节点, 可参与此次决策; ③ 移动Agent在比较的过程中, 移动Agent中储存最优节点的ID和电能质量参数, 而中间的发电量参数储存所有电能质量大于1的个体Agent的发电量总和。

该模型在CPN Tools(Version2.2.0)中运行正常, 主要库中所Token变化:

WA1: (0, 0, 0)  $\rightarrow$  (1, 5, 3)  $\rightarrow$  (1, 8, 3)  $\rightarrow$  (1, 8, 3);

PA1: (0, 0, 0)  $\rightarrow$  (4, 4, 2)  $\rightarrow$  (5, 8, 3)  $\rightarrow$  (5, 13, 3);

BA1: (0, 0, 0)  $\rightarrow$  (7, 0, 0)  $\rightarrow$  (8, 4, 2)。

以上表明: 在个体层, MA最终选择1号Agent作为风机主导Agent, 风机群体总有效发电量为8; 选择5号Agent为光伏主导Agent, 光伏群体总有效发电量为13; 选择8号Agent作为储能主导Agent, 总有效供电量为4。

MA : (0, 0, 0)  $\rightarrow$  (1, 8, 3)  $\rightarrow$  (5, 21, 3)  $\rightarrow$  (5, 25, 3),

表明全局主导Agent为5号Agent, 总的有效供电量为25。

负荷Agent的电量随Agent分配变化如下:

(18, 6)  $\rightarrow$  (14, 6)  $\rightarrow$  (9, 6)  $\rightarrow$  (5, 6)  $\rightarrow$

(0, 6)  $\rightarrow$  (0, 3)  $\rightarrow$  (0, 0),

表明当前系统能够提供足够的有效电量供给。

最终剩余电量S(1), 表明尚有一个单位的电量剩余, 满足负荷需求。该模型在CPN Tools(Version 2.2.0)中运行正常。从以上分析表明, 本文所提出的面向可再生能源分布式发电系统的能量管理的优化与协调方法可行, 所建立的结构合理有效。

## 5 结论(Conclusions)

本文从实际系统出发, 在理论层面上全面分析了面向可再生能源分散式发电系统顶层能量管理系统的优化与协调控制问题的复杂性, 提出采用ABMS对系统进行建模。针对系统特点, 提出了智能混合控制Agent的概念, 以分散式发电系统的实体节点的映射来封装Agent, 综合建立了3层混合Agent的内部结构模型。针对面向可再生能源的分散式发电系统能量管理的要求和特点, 提出了个体层、组织层和社会层3层动态层级结构的MAS宏观结构, 提出了主导Agent和移动Agent辅助系统优化与决策, 并通过有色Petri网建模动态模拟了遵从所提出的结构的优化与协调过程, 表明所提出结构的合理性和有效性。本问的研究从原理上对基于可再生能源的分散式发电系统顶层的能量管理子系统进行了分析与研究, 为下一步研究建立了基础框架, 是后续具体协调控制策略研究和系统实验进行的基础和主体。

## 参考文献(References):

- [1] 胡锦涛. 高举中国特色社会主义伟大旗帜, 为夺取全面建设小康社会新胜利而奋斗—在中国共产党第十七次全国代表大会上的报告[R]. 2007, <http://cpc.people.com.cn/GB/104019/6429414.html>.
- [2] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.  
(WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(20): 1-4.)
- [3] JUKKA V P, PETER D L. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(2): 216-234.
- [4] CLEVELAND F M. IEC 61850-7-420 communications standard for distributed energy resources[C] //2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Piscataway: IEEE, 2008: 1-4.
- [5] KHATTAMW E, HEGAZY G, SALAMA M M A. An integrated distribution generation optimization model for distribution system planning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 20(2): 1158-1165.

- [6] MOHAMED F A. Micro-grid modelling and online management[D]. Finland: Helsinki University of Technology, 2008: 1 – 314.
- [7] DIMEAS A L, HATZIAGYRIOU N D. Operation of a multiagent system for microgrid control[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2005, 20(3): 1447 – 1455.
- [8] LUM R, KOTAK D B, GRUVER W A. Multi-agent coordination of distributed energy system[C] // *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Piscataway: IEEE, 2005, 3: 2584 – 2589.
- [9] 徐大明, 康龙云, 曹秉刚. 风光互补独立供电系统的优化设计[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(9): 919 – 922.  
(XU Daming, KANG Longyun, CAO Binggang. Optimal design of standalone hybrid wind/pv power systems[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(9): 919 – 922.)
- [10] 王明俊. 新一代能量管理系统的开发和分布式问题求解的新途径[J]. *电网技术*, 2004, 28(17): 1 – 5.  
(WANG Mingjun. A new generation of energy management system and new approach to distributed problem solving[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(17): 1 – 5.)
- [11] 张淼. 风力-太阳能混合发电控制系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2004: 11 – 34.  
(ZHANG Miao. Research of wind and solar PV hybrid generating control system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2004: 11 – 34.)
- [12] ZENG J, WU J, LIU J F, et al. An agent-based approach to renewable energy management in eco-building[C] // *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. Piscataway: IEEE, 2008: 46 – 50.
- [13] 柳澹, 吴捷, 曾君, 等. 基于多Agent系统的分散发电调度规划[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(1): 151 – 154.  
(LIU Dan, WU Jie, ZENG Jun, et al. Dispatch management in distributed power generation on multi-agent system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 151 – 154.)
- [14] 余晓明, 曾君, 郭红霞, 等. 基于Multi-Agent和Petri网的分布式风光互补系统[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 353 – 356.  
(YU Xiaoming, ZENG Jun, GUO Hongxia, et al. Distributed wind-PV system based on multi-agent and petri nets[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 353 – 356.)
- [15] ZENG J, LIU J F, WU J, et al. A multi-agent solution to energy management in hybrid renewable energy generation system[J]. *Renewable Energy*, 2011, 26(5): 1352 – 1363.
- [16] MULLER J P. *The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach*[M]. Berlin: Springer, 1996: 283 – 289.
- [17] JENSEN K, KRISTENSEN L M, LISAWELLS. Coloured Petri Nets and CPN tools for modelling and validation of concurrent systems[J]. *International Journal Software Tools Technology Transfer*, 2007, 9(3/4): 213 – 254.

### 作者简介:

**曾君** (1979—), 女, 副研究员, 目前研究方向为可再生能源发电系统中的控制和电力电子技术, Email: junzeng@scut.edu.cn;

**刘俊峰** (1978—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电力电子驱动和控制 and 智能控制技术, Email: jf.liu@polyu.edu.hk;

**吴丽群** (1986—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为分布式发电系统中的能量管理, Email: 122381009@qq.com;

**吴捷** (1937—), 男, 博士生导师, 主要从事智能控制在电力系统及新能源中的应用方面的研究工作, E-mail: epjiewu@scut.edu.cn;

**颜汉荣** (1954—), 男, 副教授, 目前研究方向为电力市场改革、能源政策和智能电网应用技术, Email: echwngan@polyu.edu.hk.