

微电网分层分布式能量优化管理

郝雨辰¹, 窦晓波¹, 吴在军¹, 胡敏强¹, 孙纯军², 李桃², 赵波³

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102; 3. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 以系统经济性、环保性、供电可靠性为优化目标, 提出基于多代理系统的微电网分层分布式能量优化管理策略, 将传统集中式能量优化转变为包含细化变量定义域的微电源分布式计算、基于遗传算法的中心控制器优化、修正优化解的分布式并行调节以及生成最终解的全局协调这 4 个阶段的分层分布式能量优化, 并将各微电源的运行特性与用户控制目标以约束条件的形式, 分散到各阶段予以实现。在此基础上, 分别针对微电网单目标与多目标优化问题, 介绍了各单元代理在每个阶段的工作任务和协作关系, 并利用 MATLAB 和 JADE 平台构建针对未来 24 h 的系统优化算例。计算结果表明所提分层分布式能量优化策略能够弱化对微电网中心控制器性能的要求, 并且具有更快的运算速度和较好的优化效果。

关键词: 微电网; 能量管理; 分层分布式优化; 多代理系统; 模型

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.026

0 引言

将分布式电源和负荷以微电网的形式组合起来, 通过合理改变各类电源的工作状态, 进行必要的负荷控制, 能够减小系统环境污染, 改善客户用电可靠性, 提高能源利用经济效益, 从而实现微电网的能量优化管理, 这不仅是微电网系统不同于大电网的特殊性, 也是微电网领域研究的重点与难点^[1]。

由于微电源的功耗特性不同于传统电网中的同步发电机, 因此等微增率原则不再适用于微电网能量优化管理^[2]。文献[3-5]针对系统的经济性、环保性和供电可靠性, 建立了并/离网状态下微电网能量管理模型, 但设计的优化策略依赖于中心控制器的性能, 不能充分体现不同微电源的运行特性甚至无法反映同类微电源的不同控制目标。文献[6-9]采用线性加权法、模糊优化法、小生境进化法、2 层规划法对微电网能量管理的多目标优化问题进行了阐述。文献[10-11]从微电网结构特点出发, 提出了层次化的微电网控制与能量管理思想, 但实现手段还是传统的主从控制策略, 缺乏层间的协作与互动。文献[12-14]将多代理(Agent)系统方法用于微电网能量调度中, 描述了各 Agent 的任务并构建了多 Agent 系统平台, 但缺乏针对不同优化问题尤其是多目标优化问题, 采用不同方法的分层分布式应对机制的阐述。

本文以提高系统经济性、环保性和供电可靠性

为优化目标, 设计了并网微电网能量管理模型和相应的多 Agent 系统框架, 针对系统单目标和多目标优化问题, 基于 Agent 的自治性与协作性, 提出了分层分布式的优化管理策略, 通过 MATLAB 和 JADE 平台构建针对未来 24 h 的系统优化算例验证所提方法的正确性和有效性。

1 微电网能量优化管理模型

1.1 微电网模型

本文建立的微电网系统由光伏 PV(Photo Voltaic)电池、风力发电机 WT(Wind Turbine)、微型燃气轮机 MT(Micro Turbine)、2 组质子交换膜燃料电池 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) 和蓄电池等分布式微电源组成, 并通过联络线与配电网相连接, 其系统结构及单元间的分层分布式关系如图 1 所示。

为了体现本文提出的微电网分层分布式能量优化管理策略能够突出不同单元运行特性和控制目标的优点, 设定: 系统中 MT 和 A 组 PEMFC 工作在高效率区间; B 组 PEMFC 输出功率尽可能小, 由于

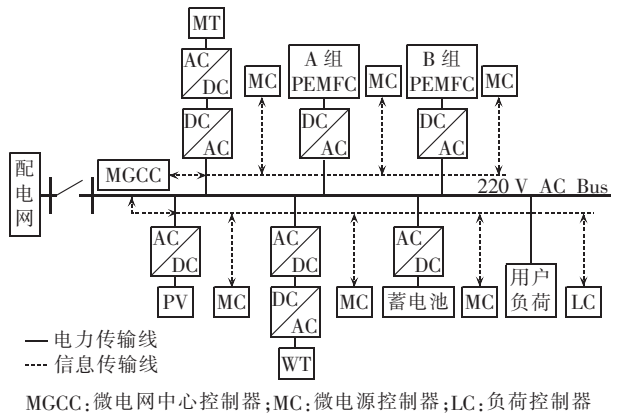


图 1 微电网模型结构图

Fig.1 Structure of microgrid model

收稿日期: 2013-03-24; 修回日期: 2013-12-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A107); 国家自然科学基金资助项目(51177015); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2010142)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A107), the National Natural Science Foundation of China(51177015) and the Prospective Research Project of Jiangsu Province(BY2010142)

PEMFC 具有低温下迅速启动的优点^[15],因此使其只在系统负荷较大时作为备用电源启动。

1.2 目标函数

由于可再生能源发电享受优先调度权和电量被全额收购的优惠^[4],因此本文微电网能量管理的对象是 MT、PEMFC、蓄电池等可控单元。分别针对系统经济性、环保性和供电可靠性定义相应目标函数。

1.2.1 微电网的经济性

微电网的经济性可定义为包含耗电源的燃料成本、各单元的管理成本以及与配电网间功率交换的购电成本或售电收益等费用的总和,如式(1)所示。

$$F_{MG} = \sum_{i=1}^n (c_{fuel,i} P_{i,t} \Delta t + c_{m,i} P_{i,t} \Delta t) + c_{p,t} P_{ex,t} \Delta t \quad (1)$$

其中, n 为微电源数量; $P_{i,t}$ 为微电源输出功率; $c_{fuel,i}$ 和 $c_{m,i}$ 分别为各微电源燃料成本与管理费用; $c_{p,t}$ 为 t 时刻配电网实时电价; $P_{ex,t}$ 为配电网与微电网间交换功率,功率注入微电网为正,反之为负。由于蓄电池只考虑管理费用,因此, $P_{i,t}$ 表示其充放电功率时,需取绝对值。

1.2.2 微电网的环保性

微电网的环保性可定义为系统内微电源输出功率以及配电网注入功率造成污染气体的排放,由此带来的污染气体治理费用的总和和如式(2)所示。

$$E_{MG} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m c_j \left[\sum_{i=1}^n (f_{i,j} P_{i,t} \Delta t) + f_j P_{ex,t} \Delta t \right] & P_{ex,t} > 0 \\ \sum_{j=1}^m c_j \sum_{i=1}^n (f_{i,j} P_{i,t} \Delta t) & P_{ex,t} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, m 为本文考虑的污染气体类型数量, $f_{i,j}$ 和 c_j 分别为第 i 个微电源或配电网产生的第 j 类污染气体的排放系数与相应治污成本,如表 1 所示^[4,16]。

表 1 污染气体排放系数与治污成本

Tab.1 Pollution gas emission coefficient and control costs

微电源/配电网	污染物排放系数 / [g·(kW·h) ⁻¹]		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
MT	724.6	0.004	0.20
PEMFC	489.0	0.003	0.01
配电网	889.0	1.800	1.60
治污成本 / (元·kg ⁻¹)	0.210	14.842	62.964

1.2.3 微电网的可靠性

文献[17]中以功率供给亏欠率作为微电网供电可靠性指标,本文在此基础上基于实时电价信息,综合文献[18]提出的分级切负荷思想、文献[19]提出的高赔偿可中断负荷的概念,以对停运负荷的补偿费用作为衡量系统供电可靠性的标准,如式(3)所示。

$$R_{MG} = \sum_{i=1}^3 \mu_{i,t} c_{p,t} P_{ls,i,t} \Delta t \quad (3)$$

其中, $\mu_{i,t}$ 为 t 时刻各类型负荷相对实时电价赔偿系数; $P_{ls,i,t}$ 为切除某类负荷的大小。

1.3 约束条件

将微电源的不同运行特性和操作人员的控制目

标作为约束条件并入微电网能量优化管理模型中。

由于合理的切负荷操作比全负荷供电具有更高的经济效益^[20],因此本文允许进行切负荷操作,但需满足功率平衡约束式(4)和负荷削减量约束式(5)。

$$\sum_{i=1}^n P_{i,t} + P_{ex,t} = P_{Load,t} - P_{ls,t} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ls,t} \leq \varepsilon_{lsmax} \quad (5)$$

其中, $P_{Load,t}$ 和 $P_{ls,t}$ 分别为 t 时刻负荷预测量和负荷削减量的大小; $\varepsilon_{ls,t}$ 为 t 时刻负荷削减量与负荷预测量的比值, ε_{lsmax} 为该比值的最大设定量。

并网状态下,微电网与配电网间的交换功率具有双向最大值约束,如式(6)所示。

$$-P_{exmax} \leq P_{ex,t} \leq P_{exmax} \quad (6)$$

由于本文只考虑电负荷需求,不考虑 MT 的热电联供效应,因此,作为输出功率可控的 MT 和 PEMFC,其约束条件主要包括输出功率上、下限约束和单位时间输出功率变化率约束,分别如式(7)、(8)所示。

$$\begin{aligned} P_{MTmin} &\leq P_{MT} \leq P_{MTmax} \\ P_{FCmin} &\leq P_{FC} \leq P_{FCmax} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{MT} \leq \varepsilon_{MTmax}, \quad \varepsilon_{FC} \leq \varepsilon_{FCmax} \quad (8)$$

由于 B 组 PEMFC 只在负荷较大时作为备用电源使用,优化计算中对其不考虑式(8)所示约束条件。

蓄电池是微电网中价格较高的单元,因此,合适的约束条件和合理的控制参数对于改善蓄电池的使用寿命具有重要作用。

a. 充放电深度约束:合理的工作区间有利于延长蓄电池使用寿命和提高工作效率^[21],因此,其荷电状态 SOC(State Of Charge)约束如式(9)所示。

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (9)$$

b. 充放电功率约束:蓄电池单位时间充放电功率 ΔP_{Bat} 受其物理性质制约,根据文献[22]所述,限定其在 **a** 中所述 SOC 工作区间内的充放电功率和蓄电池额定容量 C_{Bat} 的关系如式(10)所示。

$$\Delta P_{Bat} \leq \varepsilon_{Bat} C_{Bat} / \Delta t \quad (10)$$

c. 充放电转换次数约束:充放电深度决定了蓄电池循环总次数^[23],即使用寿命。通过限制其每天充放电转换次数 T_{Bat} 以延长工作时间,如式(11)所示。

$$T_{Bat} \leq T_{Batmax} \quad (11)$$

d. 状态一致性约束:每天 00:00 与 24:00 时蓄电池的荷电状态需保持一致,如式(12)所示。

$$SOC_0 = SOC_{24} \quad (12)$$

a—d 中,下标 max 和 min 表示变量的上、下限。

综上所述,本文中微电网能量优化管理的目标,即为根据 PV、WT 和系统电负荷的预测信息,在满足式(4)—(12)所示约束条件的基础上,采用提出的分层分布式优化策略,制定未来 24 h 每时刻各单元的调度计划,使得式(1)—(3)单独定义或组合表示的

系统单目标或多目标优化的目标函数取得最小值,即为微电网经济性、环保性和可靠性的最优解。

2 微电网分层分布式能量优化策略

不同于广泛采用的集中式优化策略,本文根据微电网的结构特点,以式(1)—(3)最小化为优化目标,采用遗传算法作为计算方法,TCP/IP 协议作为通信手段,依靠微电网中心控制器 MGCC(MicroGrid Central Controller)、微电源控制器 MC(Microsource Controller)、负荷控制器 LC(Load Controller)间的相互协作,分别针对系统单目标与多目标优化问题,设计相应的微电网分层分布式能量优化策略。

2.1 单目标优化策略

针对微电网系统能量管理的单目标优化问题,设计了 2 种分层分布式的优化策略,如图 2 所示。

由图 2 可知,本文提出的分层分布式能量优化管理策略包含以下 4 个阶段。

阶段 1:微电源分布式计算。各 MC 将控制单元可调功率范围信息上传给 MGCC,2 种方法区别在于

方法 1 中各单元可调功率范围仅与其额定功率有关,而方法 2 中还考虑到了用户对于所控单元未来 24 h 运行目标的控制指令,因此方法 2 上传信息是方法 1 上传信息的子区间。除此之外针对不同优化目标,方法 2 还将各单元发电成本、污染气体排放系数等预测信息一并上传,由 MGCC 根据反馈结果,并参照 LC 发布的预测信息细化式(6)、(7)的约束条件。

阶段 2:MGCC 优化。MGCC 根据各微电源输出功率可调范围信息,在切负荷操作允许范围之内,考虑式(4)—(7)、(10)所示约束条件(图 2 中以①表示),采用遗传算法得到优化计算可行解,并将此解传递给各 MC。

阶段 3:分布式并行调节。MC 基于自身运行特性和用户指令要求,定义式(8)、(9)、(11)、(12)所示约束条件(图 2 中以②表示),完成对可行解的修改工作,并将修改后的可行解和 MC 所能接受的调节范围一并上传给 MGCC。

阶段 4:生成最终解的全局协调。MGCC 以 MC 反馈结果为基础,将配电网视为平衡机组,在不超过 P_{exmax} 的条件下生成最终解。如出现交换功率越限的情况,则根据 MC 发电成本或污染排放等信息,采用 MC 反馈信息中包含的可接受的调节范围进行微调。

综上所述,MGCC 采用遗传算法进行优化计算过程中,只考虑了部分约束条件,因此相对于传统集中优化而言,具有较快的运算速度,之后 MC 的调节过程属于并行计算,具有很高的计算效率。

以方法 2 为例,针对不同的优化目标,介绍相应的分层分布式优化方法。

2.1.1 微电网经济性优化

在分布式计算阶段,MC 根据用户控制要求,计算各单元运行区间以及相应的最高与最低运行成本,并与 MGCC 发送的实时电价信息进行比较,将比较结果与工作区间反馈给 MGCC,MGCC 基于此反馈信息和负荷预测值,根据图 3 所示流程图和表 2 所列管理方案,细化各电源的可调功率范围信息。图 3 中 c_{FCmax} 、 c_{FCmin} 和 c_{MTmax} 、 c_{MTmin} 分别为 PEMFC 和 MT 的最高运行成本与最低运行成本。从本文第 3 节的介绍中可知,上述 4 个变量具有 $c_{MTmax} > c_{MTmin} > c_{FCmax} > c_{FCmin}$ 的数学关系。

对于蓄电池充放电管理除了表 2 中明确表示的方案 A 中充电、方案 E 中放电,其他情况下蓄电池可充可放。B 组 PEMFC 启动原则在 2.1.2 节中介绍。

在分布式调节阶段,MC 参照优化计算可行解中各时刻输出功率间的变化关系,根据约束条件的限定要求修改此可行解,修改后的解不仅完全体现各单元的运行特性和用户的控制要求,而且与可行解具有一致的变化规律,在某些时刻甚至完全一致。

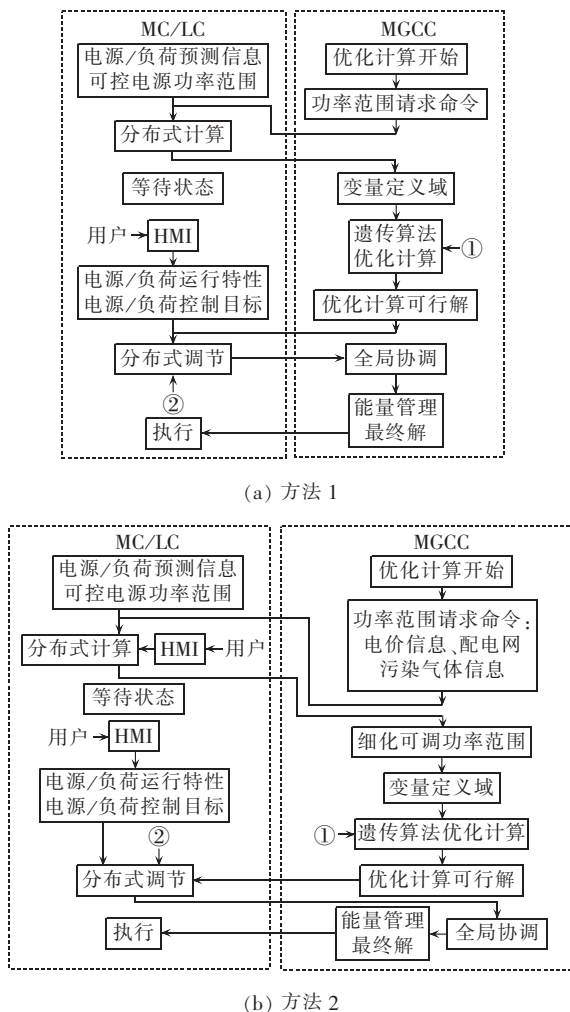


图 2 分层分布式优化策略

Fig.2 Hierarchical and distributed optimization method

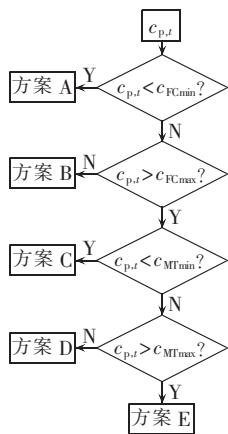


图 3 MGCC 经济性优化流程图

Fig.3 Flowchart of economical optimization for MGCC

表 2 MGCC 经济性优化管理方案

Tab.2 Scheme of economical optimization management for MGCC

方案	电源供电优先级管理
A	配电网优先,A 组 PEMFC 其次,MT 最后;蓄电池充电
B	最后利用 MT
C	A 组 PEMFC 优先,配电网其次,MT 最后
D	优先利用 A 组 PEMFC
E	A 组 PEMFC 优先,MT 其次,配电网最后;蓄电池放电

表 3 MGCC 环保性优化管理方案
Tab.3 Scheme of environmental optimization management for MGCC

方案	电源供电管理方法
F	A 组 PEMFC、MT、配电网最小化供电,配电网交换功率可为负;蓄电池充电
G	MT 配电网最小化供电
H	A 组 PEMFC 可最大化供电
I	A 组 PEMFC、MT 最大化供电
J	A 组 PEMFC、MT、配电网最大化供电, B 组 PEMFC 启动;蓄电池放电

交换功率为负时充电、为正时放电才能起到改善系统环保性的作用。为了减小蓄电池的充放电次数延长其使用寿命,在环保性优化中,蓄电池只在方案 F 中充电,方案 J 中放电,其余时刻不充不放。

当 MT、A 组 PEMFC 和交换功率最大值总和小于 t 时刻负荷值时,即为 B 组 PEMFC 启动条件定义的系统负荷较大时,如图 4 所示。B 组 PEMFC 启动原则适用于本文所有单目标、多目标优化计算。

MC 的分布式调节只与微电源运行特性和用户预期控制目标有关,与系统级优化目标无关,因此微电网环保性优化的分布式调节与经济性优化一致。

2.1.3 微电网可靠性优化

不同于经济性和环保性优化,微电网可靠性优化的分布式计算阶段,MC 仅需将各单元的可调功率范围直接上传给 MGCC,而 MGCC 也无需进行任何处理,直接以此范围作为遗传算法变量的定义域。

可靠性优化的分布式调节阶段与上述 2 种优化的分布式调节过程完全一致。

2.2 多目标优化策略

采用传统单目标加权法处理多目标优化问题时,权重系数对求解结果影响很大,无法得到全局最优的 Pareto 解集^[24]。针对系统经济性、环保性和供电可靠性构成的多目标优化问题,本文基于多目标优化计算得到的 Pareto 解集,采用下述 2 种分层分布式的优化策略获取微电网最优能量管理方案。

a. MGCC 以系统经济性、环保性作为多目标优化,采用遗传算法求取 Pareto 解集,再利用供电可靠性作为评价指标,以 Pareto 解集中可靠性最高解(对应式(3)取最小值)作为多目标优化的最优值。

b. MGCC 以微电网经济性、环保性和供电可靠性作为多目标优化,采用遗传算法求取 Pareto 解集,将此解集传递给各 MC,MC 以所控单元的运行特性和控制目标定义的约束条件作为评价指标,完成对 Pareto 解集的评定工作并反馈给 MGCC, MGCC 综合各 MC 的反馈信息最终生成多目标优化的最优值。

上述 2 种多目标优化的程序流程与图 2 中单目标优化方法 2 的流程一致。将单目标优化分布式计

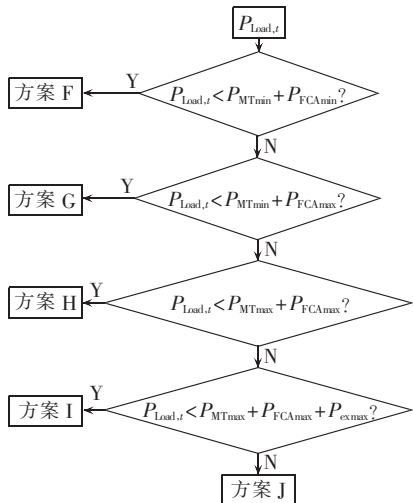


图 4 MGCC 环保性优化流程图

Fig.4 Flowchart of environmental optimization for MGCC

算所得变量定义域的并集作为遗传算法多目标优化中变量的定义域。对于 2 种多目标优化方法得到的最优值,采用与单目标优化相同的分布式调节方法。

2.3 遗传算法

MGCC 采用遗传算法进行微电网能量管理优化计算,根据各单元输出功率调节范围,以及式(5)表示的允许负荷缺电率大小,随机生成包含 100 个个体的初始种群,经过 500 代选择、交叉、变异的迭代计算得到单目标或多目标的优化解。其中选择操作采用个体数为 4 的锦标赛选择法,交叉操作与变异操作分别采用式(13)和式(14)所述数学方法。

$$x_c = x_{parent1} + p(x_{parent2} - x_{parent1}) \tag{13}$$

$$x_m = \begin{cases} x_{i,j} + (x_{max} - x_{i,j})f(d) & r_1 \geq 0.5 \\ x_{i,j} - (x_{i,j} - x_{min})f(d) & r_1 < 0.5 \end{cases} \tag{14}$$

$$f(d) = [1 - r_2(1 - d/T)^2]$$

其中, x_c 、 x_m 分别为交叉与变异操作子个体; $x_{parent1}$ 、 $x_{parent2}$ 为交叉操作父个体; p 为交叉率; $x_{i,j}$ 为种群中第 i 个个体的第 j 个基因; x_{max} 、 x_{min} 分别为相应基因的最大、最小值; d 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; r_1 、 r_2 均为随机变量。由此可见,本文采用的遗传算法是与迭代代数相关的自适应算法。

初始种群生成与迭代进化过程中,确保种群中每个个体均满足各单元输出功率范围的要求,以及允许切负荷大小的约束,这种进化思想既使得优化解可行,也减轻之后 MC 分布式并行调节的负担。

3 多 Agent 系统结构

将多 Agent 系统方法用于微电网分层分布式能量优化管理中,赋予系统中每个单元 Agent 的角色,定义各 Agent 的任务。利用代理的自治性,在优化解的生成过程中,体现了各单元的运行特性和控制目标;利用 Agent 的协作性,将传统集中优化转为效率更高的分布式并行计算,弱化了对 MGCC 性能的要求。

基于图 1 中微电网结构,建立满足图 2 分层分布式优化策略要求的多 Agent 系统框架,如图 5 所示。

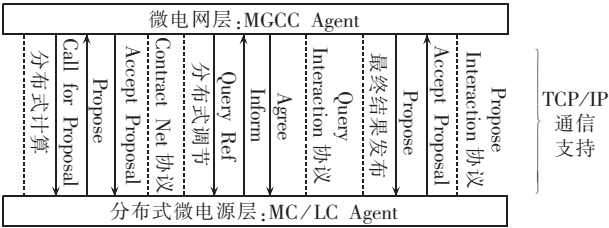


图 5 多代理系统框架

Fig.5 Framework of multi Agent system

从图 5 中可见,健全的通信网络和完善的 Agent 通信语言和协议是实现本文提出的优化策略的基础,采用满足 FIPA 国际标准的 Agent 通信语言 ACL

和 Contract Net 等协议进行交互,并利用 TCP/IP 协议确保不同层次、不同单元间协作信息的可靠传输。

基于表 4 所列微电网系统的参数信息,设计各 Agent 的工作任务。

表 4 微电网系统主要单元参数信息

Tab.4 Parameters of key units in microgrid

单元	参数信息
负荷	$\varepsilon_{load} = 3\%$
配电网	$P_{cmax} = 30\text{ kW}$
MT	$P_{Mfmax} = 30\text{ kW}, P_{Mfmin} = 0, \varepsilon_{Mfmax} = 5\%$
A 组 PEMFC	$P_{FCAmx} = 18\text{ kW}, P_{FC Amin} = 0, \varepsilon_{FCmax} = 5\%$
B 组 PEMFC	$P_{FCBmax} = 20\text{ kW}, P_{FCBmin} = 0$
蓄电池	$C_{Bat} = 20\text{ kW}\cdot\text{h}, T_{Batmax} = 5, \varepsilon_{Batmax} = 20\%,$ $SOC_{min} = 40\%, SOC_{max} = 80\%$

a. MGCC Agent:负责与系统中各单元 Agent 通信,了解各单元的基本信息,采用遗传算法进行优化计算,并根据各微电源 Agent 的反馈信息进行全局协调,由此形成最终的发电和切负荷计划。

b. PV Agent 和 WT Agent:根据气象预测信息,将其输出功率预测值上传给 MGCC Agent。

c. 蓄电池 Agent:分布式计算阶段,将蓄电池基本信息和式(10)所示约束条件上传给 MGCC Agent;分布式调节阶段,按照式(9)、(11)、(12)所示约束条件修改 MGCC 优化计算的可行解,并将修改后的值反馈给 MGCC Agent;对于多目标优化,蓄电池 Agent 综合考虑充放电转换次数与充放电功率 2 个因素,按照式(15)所示评价函数完成对 Pareto 解集中解的评价工作。

$$G = a_4 T_{Bat}^2 + a_3 T_{Bat} \Delta P_{Bat} - a_2 T_{Bat} - a_1 \Delta P_{Bat} + a_0 \tag{15}$$

其中, a_0 — a_4 取值 1.072、0.082、0.063、 2.387×10^{-3} 、 8.505×10^{-4} ,相应的评价函数曲线如图 6 所示。

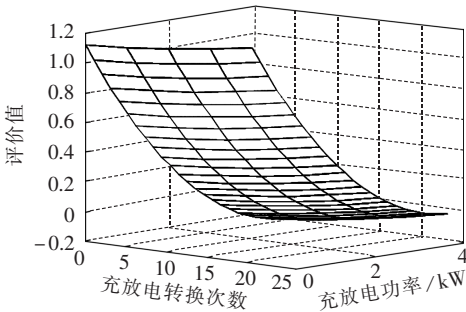


图 6 蓄电池综合评价函数曲线

Fig.6 Curve of battery comprehensive evaluation function

d. MT Agent:分布式计算阶段,用户根据图 7(a)所示 MT 效率曲线设定其工作区间,本文设定 MT 工作效率不低于 28.5%,对应输出功率范围为 26~30 kW。MT Agent 将此调节范围与 MT 运行成本或污染气体排放情况上传给 MGCC Agent。

MT 运行成本与其效率有关,因此式(1)中的 MT 燃料费用^[25]采用式(16)进行运算。

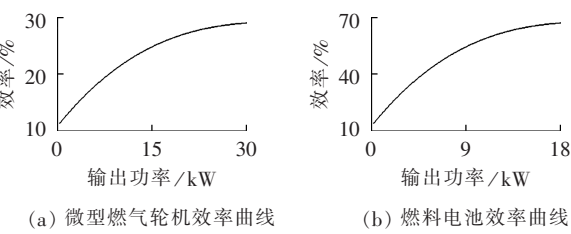


图 7 微型燃气轮机和燃料电池效率曲线
Fig.7 Efficiency curves of micro-turbine and fuel cell

$$F_{MT}=c_{fuel}\frac{P_{MT}\Delta t}{\eta_{MT}\times V_{LH}}\tag{16}$$

其中, c_{fuel} 和 V_{LH} 分别为天然气单价和低热值, 分别取 2.05 元/ m^3 和 9.7 $kW\cdot h/m^3$; η_{MT} 为 MT 运行效率。
在分布式调节阶段, MT Agent 根据输出功率变化率约束式(8)修改 MGCC 优化计算可行解。

对于多目标优化, MT Agent 综合运行效率与输出功率变化率 2 个因素, 按照与图 6 类似的评价函数曲线完成对 Pareto 解集的评价工作。

e. A 组 PEMFC Agent: 根据图 7(b)所示效率曲线设定其工作效率不低于 61%, 对应输出功率为 7.4~11.2 kW。A 组 PEMFC Agent 的其他任务, 如燃料费用计算与多目标评价函数, 与 MT Agent 基本一致。

f. B 组 PEMFC Agent: 利用 Agent 自治性突出各单元不同特性和控制目标, 彰显多 Agent 系统优点。区别于 A 组 PEMFC 任务, B 组 PEMFC Agent 使其尽可能少发电或不工作, 仅在负荷较大时参与调节。对于多目标优化, B 组 PEMFC Agent 按照输出功率尽可能小的原则完成对 Pareto 解集的评价工作。

g. 负荷 Agent: 分层分布式优化计算开始前, 将不同类型负荷的预测信息和赔偿系数上传给 MGCC Agent; 优化计算之后, 按时执行最终的切负荷计划。

4 仿真与分析

采用 MATLAB 作为系统能量优化计算工具, 在实验室百兆以太网环境下, 利用 JADE 平台在多台计算机上构建分层分布式的多 Agent 系统框架。根据图 8 所示的 PV、WT 和负荷预测信息, 分别针对不同优化目标实现相应的分层分布式能量优化管理。

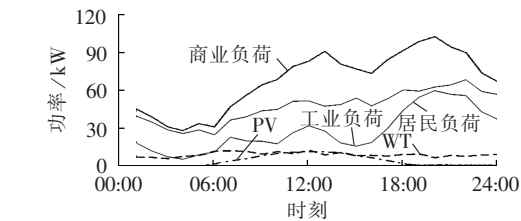


图 8 微电网系统功率预测信息
Fig.8 Predicted power information of microgrid

4.1 微电网单目标优化

基于微电网能量优化管理模型, 针对系统经济

性、环保性和供电可靠性的优化目标, 采用分层分布式的优化策略和遗传算法进行迭代计算, 并传统集中式的优化结果进行比较, 如表 5 所示。

表 5 微电网单目标优化结果
Tab.5 Results of microgrid single-objective optimization

性能	方法	生成初始种群 耗时/s	迭代计算 耗时/s	优化结果
经济性	方法 1	0.066	117.285	820.039
	方法 2	0.092	70.792	812.542
	集中式	3.031	199.905	805.811
环保性	方法 1	0.056	99.270	243.927
	方法 2	0.066	44.056	242.484
	集中式	0.266	134.025	240.911
可靠性	方法 1	0.132	72.360	0.563
	方法 2	0.146	69.968	0.393
	集中式	4.832	137.569	0.302

由表 5 可见, 本文设计的微电网分层分布式能量优化管理策略, 由于迭代计算环节并不考虑所有的约束条件, 而将部分约束条件在各单元 Agent 的分布式调节中通过并行计算予以实现, 因此, 相对于传统集中优化而言, 具有更高的运算效率和相近的计算结果。

从表 5 中不难发现, 单目标优化方法 1 相对于方法 2 在生成初始种群环节具有更快的速度, 但在迭代计算过程中耗时更长, 这是因为方法 1 初始种群中各电源的额定输出功率即为各变量的定义域, 而方法 2 中经过各 Agent 的分布式计算, 各变量的定义域已是考虑了微电源运行特性和用户控制要求的功率区间, 因此方法 1 变量的取值范围更广, 更易生成满足式(5)约束的初始种群。而在迭代计算过程中, 随着迭代次数的增加, 式(14)中 $f(d)$ 取值增大, 并且变异操作需与该变量的最大、最小值进行减法操作, 方法 1 由于变量取值范围更广, 因此变异操作易造成个体中某变量突变, 从而不满足式(5)所示的负荷的范围要求, 所以方法 1 在迭代计算环节耗时更长。

上述研究是针对包含 4 个可控微电源的并网系统, 为了进一步说明本文提出的分层分布式能量优化策略相对于传统集中式优化的优越性, 在运算参数完全相同的条件下, 针对包含 40 个可控微电源的并网系统的经济性进行优化计算, 从表 6 所列结果中可见所设计的分层分布式策略具有更加显著的运算速度优势, 并且优化结果也优于传统集中式优化。

表 6 多微电源的微电网经济性优化
Tab.6 Economical optimization of microgrid with multiple micro-sources

方法	生成初始种群耗时/s	迭代计算耗时/s	优化结果
方法 1	0.227	286.752	8 725.345
方法 2	0.846	264.628	8 724.149
集中式	19.608	470.554	8 942.400

4.2 微电网多目标优化

分别采用本文提出的 2 种分层分布式多目标优

化方法处理微电网能量管理问题,所得 Pareto 解集和相应的处理结果分别如表 7、8 所示。

表 7 方法 1 所得微电网优化 Pareto 解集
Tab.7 Pareto solution obtained by microgrid optimization method 1

Pareto 解	经济性	环保性	可靠性评价
解 1	809.104	242.278	8.353
解 2	822.065	241.491	9.443
解 3	815.360	241.552	9.272
解 4	818.599	241.507	9.413
解 5	820.673	241.505	9.425

表 8 各单元对方法 2 所得微电网优化 Pareto 解集的评价值

Tab.8 Evaluation of each unit on Pareto solution obtained by microgrid optimization method 2

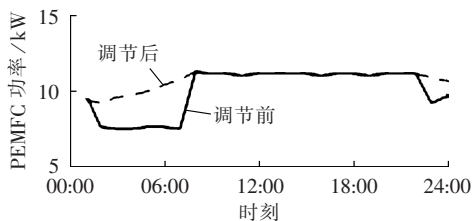
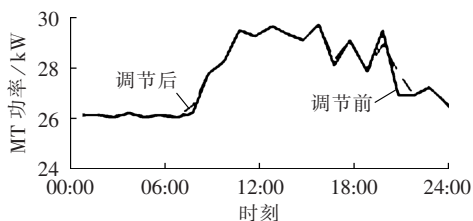
Pareto 解	MT	A 组 PEMFC	B 组 PEMFC	蓄电池
解 1	18.867	15.719	35.965	16.742
解 2	19.122	15.584	35.300	16.712
解 3	18.880	15.647	36.517	16.718
解 4	18.979	15.646	35.786	16.736
解 5	19.024	15.669	35.747	16.720

方法 1 中 MGCC Agent 针对微电网经济性和环保性的多目标优化计算后,采用供电可靠性作为评判依据选定 Pareto 解集中的解 1 作为优化可行解,对此解经过各微电源 Agent 的分布式并行调节过程之后,得到最终的电源出力与切负荷计划,此时系统经济性、环保性和供电可靠性指标分别为 818.138、249.803、8.643。由于需满足各单元的运行特性和控制目标,因此分布式并行调节后系统各项指标不同于调节前的可行解。

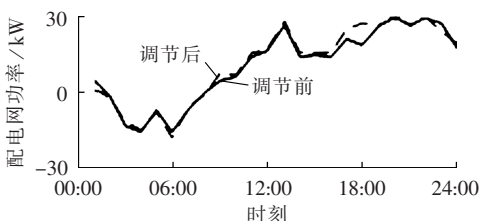
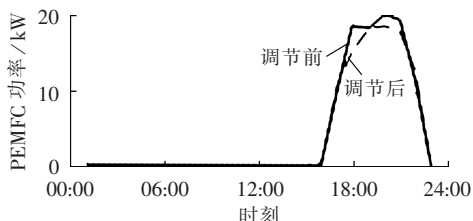
方法 2 中 MGCC Agent 针对微电网经济性、环保性和供电可靠性的多目标优化计算后,将 Pareto 解集传递给各单元 Agent 进行评价,之后 MGCC Agent 综合各 Agent 的评分,选取表 8 中得分最高的解 3 作为优化计算的可行解,在经过各 Agent 的分布式并行调节过程后,最终得到各单元的发电和切负荷计划如图 9 所示。

本文提出的微电网分层分布式能量优化管理策略,无论针对系统单目标优化还是多目标优化问题,都能得到与图 9 类似的波形曲线,从中可见分布式并行调节只是各单元 Agent 对 MGCC Agent 优化计算可行解的微调,两者具有类似的变化规律,某些时刻甚至完全一致,其优势在于既遵从了 MGCC 全局优化计算的优化结果,又能更全面地体现各单元的运行特性和控制目标,并具有更高的计算效率。

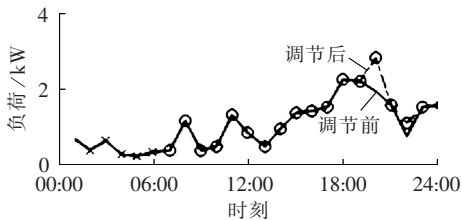
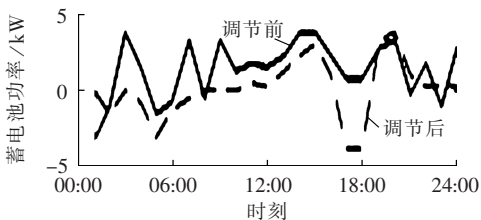
虽然本文是以预测信息为基础制定未来 24 h 每时刻各单元的调度计划,但提出的优化策略也适用于基于短期或超短期预测的微电网能量优化,通



(a) MT 和 A 组 PEMFC 输出功率



(b) B 组 PEMFC 和配电网输出功率



—○— 工业负荷, —×— 商业负荷

(c) 蓄电池输出功率和切负荷大小

图 9 微电网能量管理优化结果

Fig.9 Results of microgrid energy management optimization

过在不同时间尺度下取舍分布式交互环节的个数以提高优化速度,例如针对超短期优化可直接忽略图 2 中 MC 分布式调节环节中与各单元使用寿命相关的约束条件,而仅保证 MGCC 优化迭代计算环节与微电源性能相关的约束条件的实现。

5 结论

本文以提高微电网系统经济性、环保性和供电可靠性为目标,建立了微电网能量优化管理模型及相应的多 Agent 系统框架,采用遗传算法和 TCP/IP 协议作为技术支持,在百兆以太网的实验环境下,以 MATLAB 和 JADE 作为仿真平台建立针对未来 24 h 的系统优化算例,分别针对系统单目标和多目标优化问题设计了多种分层分布式能量优化管理策略。仿真计算结果表明,相对于传统的集中式优化,本文提出的分层分布式优化策略不仅具有更高的计算效率,并且能更全面地反映不同单元的运行特性和控制目标,特别是在多微电源的微电网能量优化管理中具有更加显著的优势。同时,这种在不同阶段考虑不同约束条件的优化思路,不仅有效地减轻了对 MGCC 的性能依赖,而且为今后诸如不同时间尺度的微电网能量管理体系的建立也提供了相应的技术支持,因此,本文提出的分层分布式管理策略完全适用于微电网的能量优化管理。

参考文献:

- [1] 曹相芹,鞠平,蔡昌春. 微电网仿真分析与等效化简[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):94-98.
CAO Xiangqin, JU Ping, CAI Changchun. Simulative analysis and equivalent reduction for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 94-98.
- [2] 陈达威,朱桂萍. 微电网负荷优化分配[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):45-49.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. An investigation on optimal load distribution of microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 45-49.
- [3] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.
- [4] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [5] 石庆均,耿光超,江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):26-35.
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.
- [6] CONTI S, NICOLOSI R, RIZZO S A, et al. Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1243-1251.
- [7] 张惠卿. 配电网中基于改进多种群遗传算法的分布式发电规划[D]. 保定:华北电力大学,2011.
- [8] 王新刚,艾芊,徐伟华,等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(20):79-83.
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [9] 王守相,王慧,蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):110-115.
WANG Shouxiang, WANG Hui, CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110-115.
- [10] KANCHEV H, LU D, COLAS F, et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4583-4592.
- [11] 吴志,顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):57-61.
WU Zhi, GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 57-61.
- [12] KUMAR NUNNA H S V S K, DOOLLA S. Multiagent-based distributed energy resource management for intelligent microgrids [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [13] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M, et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(2): 925-933.
- [14] MAO M Q, WEI D, CHANG L C. Multi-agent based simulation for microgrid energy management[C]//8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1219-1223.
- [15] 胡桂林,樊建人,岑可法. 质子交换膜燃料电池动态过程的数值模拟[J]. 化工学报,2006,57(11):2693-2698.
HU Guilin, FAN Jianren, CEN Kefa. Numerical simulation of dynamic behavior of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(11): 2693-2698.
- [16] 陈光堂,邱晓燕,林伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术,2012,36(5):85-91.
CHEN Guangtang, QIU Xiaoyan, LIN Wei. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85-91.
- [17] 茆美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [18] 言大伟,韦钢,胡吟,等. 可靠性与经济性相协调的微电网能量优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):18-23,51.
YAN Dawei, WEI Gang, HU Yin, et al. Microgrid energy

- optimization with coordination of reliability and economy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 18-23, 51.
- [19] 詹昕, 向铁元, 曾爽, 等. 基于拟态物理学优化算法的微电网功率优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 44-48.
- ZHAN Xin, XIANG Tiejuan, ZENG Shuang, et al. Microgrid power optimization based on artificial physics optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 44-48.
- [20] 言大伟, 韦钢, 陈炫姿, 等. 考虑可中断负荷的微网能量优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 88-93.
- YAN Dawei, WEI Gang, CHEN Xuanzi, et al. Microgrid energy optimization considering interruptible load [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1): 88-93.
- [21] 季美红. 基于粒子群算法的微电网多目标经济调度模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- Ji Meihong. Research of multi-objective economic dispatch model for a micro-grid based on particle swarm optimization [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [22] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
- MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [23] 李军徽. 抑制风电对电网影响的储能系统优化配置及控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- LI Junhui. Research on the optimal plan and control of energy storage system to reduce the effect of wind power on the grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [24] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22.
- WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 16-22.
- [25] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- GUO Jiahuan. Study on economic operation optimization of microgrid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.

作者简介:



郝雨辰

郝雨辰(1985-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要研究方向为分布式发电与微网 (E-mail: haoldini@sina.com);

窦晓波(1979-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 通讯作者, 主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网。

Hierarchical and distributed optimization of energy management for microgrid

HAO Yuchen¹, DOU Xiaobo¹, WU Zaijun¹, HU Minqiang¹, SUN Chunjun², LI Tao², ZHAO Bo³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

3. Zhejiang Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A hierarchical and distributed optimization of energy management is proposed based on multi Agent system for microgrid, which takes the economy, environmental protection and power-supply reliability as its objectives. It converts the traditional centralized energy optimization into four sub-optimizations: the distributed computing of micro-sources to refine the domain of each variable, the GA-based optimization of central controller, the distributed parallel regulation to modify the optimization solution and the global coordination to generate the final solution, in which, the operational features and control objectives of different micro-sources are implemented as constraints. The special tasks of diverse Agents and the collaborative relationship among them are described respectively for the single-objective and multi-objective optimizations of microgrid. A microgrid optimization model for next 24 hours is built based on MATLAB and JADE. Numerical results demonstrate that, the proposed strategy of hierarchical and distributed optimization has higher optimization efficiency and better optimization results, weakening the dependence on the performance of central controller.

Key words: microgrid; energy management; hierarchical and distributed optimization; multi Agent systems; models