

基于多 Agent 遗传算法的水电厂机组优化组合研究与实现

孟安波¹, 刘永前², 徐海波³

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 华北电力大学, 北京 102206;
3. 广东易事特现代电力电子工程技术研究研发中心, 广东 东莞 523808)

摘要: 基于多 Agent 系统理论, 构建了一个多 Agent 机组优化组合系统。对于问题优化模型, 提出了一种新颖的多 Agent 遗传算法, 解决了大规模遗传算法的效率问题。对于机组的非线性耗水量特性, 提出了一种由 Agent 动态地管理与维护的神经网络。基于与 FIPA 兼容的多 Agent 中间件 JADE 平台, 给出了一个详细的具体实施系统。仿真结果验证了所提出的优化模型与实施方案的合理性和可操作性。

关键词: 水电厂; 多代理系统; 机组优化组合; 遗传算法; 中间件

Research and implementation of unit optimization combination of hydropower plant based on multi-Agent genetic algorithm

MENG An-bo¹, LIU Yong-qian², XU Hai-bo³

(1. Automation Faculty, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. R&D Center of Guangdong Modern Power Electric & Electronic Engineering, Dongguan 523808, China)

Abstract: Based on multi-Agent system theory, a MAS based system for unit optimization combination is built. For the optimization problem mentioned above, a novel MAS based genetic algorithm is proposed, which solves the efficiency problem for genetic algorithm with large-scale computation. As far as the nonlinear water consumption characteristic of generating units is concerned, the BP neural network which can be managed and maintained by Agent is proposed. Based on multi-agent middle ware JADE platform which is fully compliant with FIPA, a detailed implementation system is presented. The simulation results exhibit the reasonability and feasibility of the model proposed in this paper.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program(863)(No.2007AA05Z428).

Key words: hydropower plant; multi-Agent system; unit optimization combination; genetic algorithm; middle ware

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0023-06

0 引言

随着厂网分开以及电力市场的推进, 竞价上网的水力发电企业对电厂内实施经济调度表现出了极大的关注。水电厂厂内经济运行是指在满足各种约束条件下, 合理选择水电机组台数与组合, 经济分配系统负荷, 以期获得最大的经济效益。本质上, 水电厂经济调度是一个多约束条件下的非线性、高维、离散的复杂机组优化组合问题。求解此问题的传统算法主要有变分法、辨识法、拉格朗日松弛法、等微增率法、多元函数求极值法、线性规划等。这

些传统方法的一个共同特点是都依赖于数学模型的建立与推导。由于遗传算法并行全局寻优能力以及不需要导数信息仅需要适应度函数指导进化方向的特点, 使得国内外一些研究人员开始尝试运用遗传算法进行电力系统有功功率负荷分配的研究, 并取得了一定的成果^[1-4]。但是, 大多数研究往往简化约束条件, 没有考虑振动区限制问题, 这类问题往往影响水轮机效率及安全运行。此外, 考虑耗水量模型时, 大多采用近似的二次项或多次项模型模拟。实际上, 水电机组在运行中其耗水量与出力、水头存在复杂的非线性关系, 如何动态并准确地表达它们之间的数学关系对水电厂经济调度至关重要。另

基金项目: 国家863计划资助项目(2007AA05Z428)

外一个重要的问题是，传统遗传算法受串行主机的限制，其内含的并行性并没有发挥出充分的作用，当问题规模很大，特别是适应度计算复杂时，遗传算法往往需要消耗大量的时间。

针对以上问题，结合某水电厂经济运行实际工程，本文提出了一个基于MAS(Multi-Agent System, MAS)的机组优化组合系统(Multi-Agent based Genetic Algorithm applied to Unit Commitment Optimization of hydropower plant, MAGACUO)。其中，机组耗水量模型由QAgent建立，该Agent维护一组机组的耗水量神经网络模型，解决了耗水量的非线性问题；机组优化模型由一组执行遗传算法的多Agent系统实施并执行，解决了遗传算法的搜索效率问题。该系统还充分考虑了避开空蚀振动等限制运行区间、允许灵活起停机组等约束条件。

1 数学模型

1.1 机组优化组合模型

1.1.1 目标函数

水电厂厂内机组优化组合的目标就是在水电厂总出力一定的条件下，通过最优负荷分配使总耗水量最小，其目标数学模型为：

$$\min W_t = \sum_{i=1}^n Q_i(P_{i,t}, H_{i,t})B_{i,t} \quad (1)$$

式中： W_t 为运行时刻 t 所有机组的耗水量之和； $Q_i(P_{i,t}, H_{i,t})$ 为机组 i 在运行时刻 t 时，当水头为 $H_{i,t}$ 、出力为 $P_{i,t}$ 时所消耗的水量； $B_{i,t}$ 为机组 i 在运行时刻 t 的起停状态，开机时取1，停机是取0。

1.1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{gt} = \sum_{i=1}^n P_{i,t} \quad (2)$$

式中： P_{gt} 为 t 时刻调度下达的指定功率， $P_{i,t}$ 为各机组需要承担的出力。显然，在任何工况下，机组不能超越机组容量上下限制，同时还必须满足避开机组震动区的要求。

2) 机组出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (3)$$

式中： $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为机组 i 的最小和最大出力。由于机组出力分别受发电机和水轮机出力限制线制约，所以，不同水头下的 $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 可能出现不同的情况。

3) 机组振动约束

$$P_{i,h,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,h,\max} \quad (4)$$

式中： $P_{i,h,\max}$ 、 $P_{i,h,\min}$ 分别为机组在水头 h 下振动区间的上下限。需要说明的是，不同水头甚至不同运行时期， $P_{i,h,\max}$ 、 $P_{i,h,\min}$ 都将可能不同。

1.2 耗水量模型

耗水量模型反映的是流量与水头和出力之间复杂的非线性关系，是实施水电厂机组优化调度的基础，目前尚不能用一完整的数学解析式来进行表述。由于人工神经网络具有本质的非线性特征和自组织自学能力，本文采用广泛使用的BP神经网络来建立机组耗水量模型，其网络结构如图1所示。其中，网络的输入为水头 H 和出力 N ，输出为流量 Q 。本质上，神经网络是根据学习样本和一定的学习算法不断调节权值和阈值，最终实现神经网络从输入空间到输出空间复杂的非线性映射。因此，学习样本合理的选取至关重要，样本的获取可从机组实际运行数据获取，亦可从水轮机运转特性曲线间接得到。随着机组的运行，其特性甚至结构都将产生变化，这时，需要更新训练样本，重新训练神经网络，以更好地反映机组的实际情况。为简化复杂程度，不同的机组都有一个神经网络对应。限于篇幅，关于神经网络本身，本文不再过多赘述。需要说明的是，在本文中，神经网络是由一个名为QAgent的Agent维护、管理，并以服务的形式提供给实施遗传算法的所有个体PSAgent使用。这种做法无疑大大提高了优化的效率，同时增加了系统的灵活性和智能性。

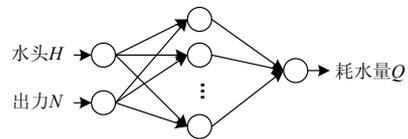


图1 耗水量神经网络模型

Fig.1 Neural network model for water consumption

2 MAGACUO系统

2.1 系统体系

MAS技术的出现被认为是一种全新的软件开发模式。MAS的自治性、社会化、主动性等特点使得MAS能够轻松地把一个复杂的问题分解成一系列简单的子问题，然后分别指派到不同的个体Agent中去，通过Agent的合作、协商最终达到共同的目标。由于MAS的应用大大增强了模块化、开发速度、可靠性、灵活性以及可重用性，近年来，国内学者开始在电力系统领域开展了多Agent研究^[5-8]，并取得了一定的进展，但是应用实现方面的研究还比较少见。针对水电厂机组优化组合问题的遗传算法实现，本文提出了一个新颖的多Agent实

施方案,该体系如图 2 所示。

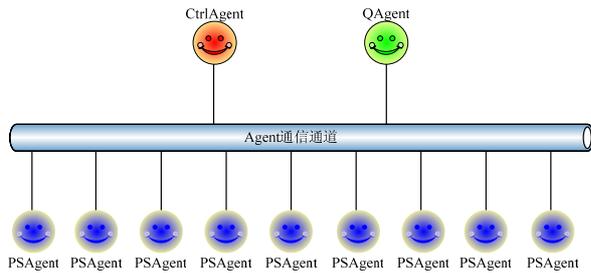


图 2 多 Agent 系统体系
Fig.2 Architecture of MAS

可以看出,该系统存在三种类型的 Agent。

CtrlAgent 是实施遗传算法的核心 Agent, CtrlAgent 负责创建由若干 PSAgent 组成的初始种群,以建立进化环境。这些 PSAgent 分别代表问题域一个潜在解(即一种机组组合)。在进化环境成功构建后, CtrlAgent 将获得每一代种群的遗传操作的控制权(不是全部的)。换句话说, CtrlAgent 将负责调度遗传算子如复制、交叉以及变异的操作。特别地,该 Agent 将根据每个 PSAgent 的性能好坏来控制进化的方向。

PSAgent 是遗传算法的承担者,它们能够感知外部世界信息(如来自 CtrlAgent、QAgent 或其他 PSAgent 的信息),同时是遗传操作如交叉,变异的执行者。

QAgent 负责管理、维护水电厂所有机组的耗水量神经网络,机组在运行过程中,随着时间以及运行条件的变化,机组的特性可能会发生变化。这时必须对机组的一些特征数据进行及时的更新。当 QAgent 接受到这些更新的数据,就会重新训练相应的神经网络,使得网络的特性能够准确地反映机组的实际特性。QAgent 的另一个重要功能是为 PSAgent 提供服务,当 PSAgent 需要计算适应度时,可以请求 QAgent 计算并提供相应的耗水量。

2.2 遗传算法的多 Agent 实现

传统遗传算法的实现在问题规模很大,特别是适应度计算复杂时其效率并不高。本文设计的基于多 Agent 系统的遗传算法,不仅可以解决效率问题,还增加了灵活性和智能性。图 3 是基于 AUML (Agent Unified Modeling Language, AUML) 的顺序图,用来描述多 Agent 的遗传算法实现过程以及表达 Agent 间的消息传递。

遗传算法过程以及消息解释如下:

- 1) CtrlAgent 等待机组优化组合命令。
- 2) CtrlAgent 创建初始种群,即产生一定数目的被称之为 PSAgent 的个体 Agent。

3) PSAgent 随机产生一条染色体,表示一种机

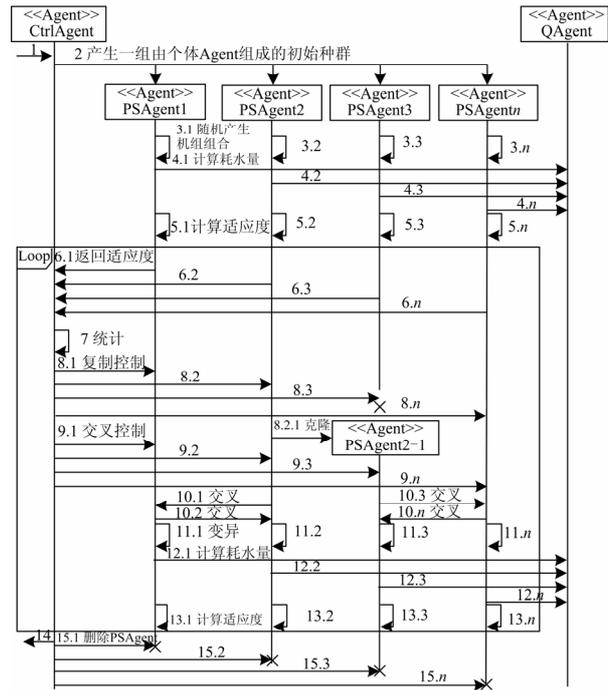


图 3 基于 AUML 的顺序图

Fig.3 AUML based agent sequence diagram

组组合或一个潜在解。

4) PSAgent 解码染色体(如果超出振动区间或出力限制, PSAgent 将重新产生新的染色体),把机组出力组合发送给 QAgent, QAgent 收到消息后,分别启动所有参与优化机组的耗水量神经网络模型,最后返回给 PSAgent 总的耗水量。

5) 所有的 PSAgent 根据公式

$$Fitness = k_1 \frac{P_r}{\left| P_{gr} - \sum_{i=1}^n P_{i,t} \right|} + k_2 \frac{Q_r}{\sum_{i=1}^n Q_{i,t}}$$

分别计算各自的适应度,其中: $\sum_{i=1}^n Q_{i,t}$ 表示总的耗

水量, $\left| P_{gr} - \sum_{i=1}^n P_{i,t} \right|$ 表示一种机组组合下的总出力与调度给定出力的偏差,显然,耗水量越小,偏差越小,其适应度就越大,这符合遗传算法要求的适应度条件。 P_r 、 Q_r 指水电厂额定出力和额定流量,它们的引入可以消除单位的影响。另外, k_1 、 k_2 是两个比例因子,反映了在优化过程中对耗水量和出力偏差的重视程度。

6) PSAgent 向 CtrlAgent 发消息,以告之适应度。

7) 当收集到来自所有的 PSAgent 的适应度信

息后, CtrlAgent 会执行一些统计工作, 如计算总的适应度, 平均适应度, 以及最小适应度等。

8) CtrlAgent 应用轮盘赌法来决定上一代种群中的 PSAgent 在下一代中存活的机会。也就是说, 性能最差的 PSAgent 将会结束生命周期, 而性能较好的 PSAgent 在下一代中可能有机会被复制(克隆)好几次。如图 3 所示, PSAgent3 由于适应度很差而结束了生命周期, 而 PSAgent2 被允许复制一次即 PSAgent2-1。

9) 复制操作结束后, CtrlAgent 还得负责交叉操作。细一步说, CtrlAgent 负责配对需要交叉的 PSAgent, 然后向所有配对的 PSAgent 发送交叉信息, 包括需要交叉的 PSAgent 名字, 交叉的位置。

10) 当要求执行交叉操作时, 所有配对的 PSAgent 根据收到的交叉信息, 从自身染色体中提取需要交换的信息, 然后相互发送。最终, 根据收到的交换信息重新组装成新的染色体。

11) PSAgent 根据一定的变异概率进行变异操作。

12) 重复第 4) 步。

13) 一旦三个遗传操作执行完毕, 新一代种群中的 PSAgent 再一次计算适应度, 随后重复第 6) 步到第 13) 步, 直到得到期望的解或达到指定的代数为止。

14) CtrlAgent 把最优机组组合结果发送给调整机组出力的控制器, 以执行调度命令。

15) 结束所有的 PSAgent 的生命周期, 完成整个优化过程。

3 MAGACUO 系统实现

3.1 实现平台

目前能提供多 Agent 系统开发环境的 Agent 平台主要有 Voyager, Zeus, JADE, FIPAOS 等^[9]。由于 JADE (Java Agent DEvelopment Framework) 采用的是与平台无关的 JAVA 语言, 而且与制定 Agent 国际标准的 FIPA 完全兼容, 因此, JADE 便成为了开发 MAGACUO 系统的首选。从图 4 可以看出, 在 MAGACUO 系统中, Agent 平台由若干不同主机构成, 每台主机有一个 JAVA 虚拟机作为 Agent 的基本容器, 为 Agent 提供完整的运行环境, 并且允许几个 Agent 同时运行在同一主机上。在主容器里, 运行着 JADE 提供的系统 Agent: AMS 和 DF。其中 AMS 负责管理整个 Agent 平台的生命周期, DF 提供黄页服务, 以便为提供服务的 Agent 注册。MAGACUO 系统中所有的 Agent 使用 ACL (Agent Communication Language, ACL) 进行沟通与交互,

并且消息结构完全与 FIPA 标准兼容, 语义使用 protégé-2000 设计的 ontology 来定义。

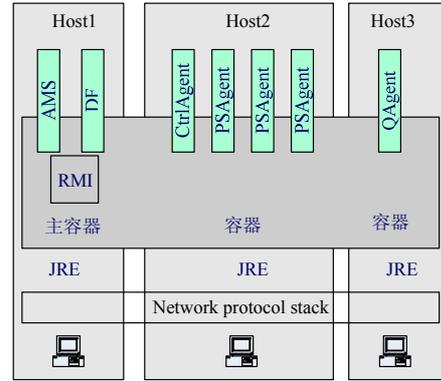


图 4 基于 JADE 的 MAGACUO 平台

Fig.4 MAGACUO platform based on JADE

3.2 MAGACUO 系统中的 Agent 行为模型

JADE 行为模型允许 Agent 执行并行任务以响应不同的外部事件。其隐藏的调度器运用轮循非抢占的策略对 Agent 活动行为队列中的并行行为进行调度。图 5 给出了基于 JADE 行为模型的 MAGACUO 中 Agent 的行为类层次, 其中 SequentialBehavior 是一个复合行为类, 该类顺序执行它的子行为直到所有子行为执行完毕为止, 因此实际行为执行是定义在子行为类中。抽象类 CyclicBehavior 类派生出的原子类能够循环执行。抽象类 OneShotBehavior 类派生出的原子类仅执行一次且不能阻塞。表 1 是 MAGACUO 系统中每个 Agent 主要任务的描述, 所有这些任务被实施成 JADE 行为。

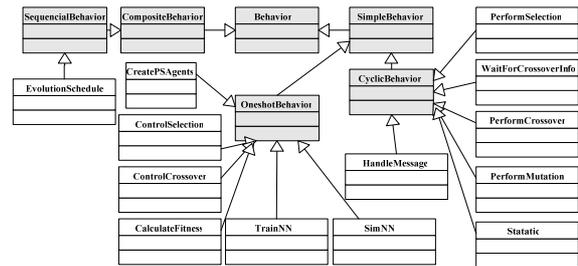


图 5 基于 JADE 的行为类图

Fig.5 JADE based behavior class

3.3 仿真结果

某一水电厂仿真数据如下: 该电站共有 6 台机组, 运转综合特性曲线由于篇幅原因没有给出, 部分振动区数据设置见表 2。遗传算法参数设置如下: 种群规模 population 40, 染色体长度 l_chromosome=48, 繁殖代数 generations=60, 交叉概率 p_crossover=0.9, 变异概率 p_mutation=0.03。

表 3 给出了部分不同给定出力不同水头下的机组出力优化分配结果。需要说明的是表 3 中符号#表示该机组为停止状态,*表示该机组满载,上述情况的机组不参与优化。

表 1 MAGACUO 系统中的 JADE 行为类型
Tab.1 JADE based behaviors in MAGACUO

Agent名称	行为名和类型	任务描述	
CtrlAgent	CreatePSAgents : OneshotBehavior	该行为产生由若干PSAgent构成的初始种群,以构建进化环境。	
	Static : CyclicBehavior	该行为执行一些统计工作,依据这些统计数据,该行为可控制进化周期。	
	EvolutionSchedule : SequentialBehavior	该行为用来调度其中的子行为,使其能够顺序执行。	
	ControlSelection : OneShotBehavior	EvolutionSchedule的子行为,该子行为使用轮盘赌算法控制PSAgents在下一代的存活机会。	
PSAgent	ControlCrossover : OneShotBehavior	ControlCrossover是EvolutionSchedule的子行为,该子行为对PSAgent进行随机配对并决定其交叉位置,值得注意的是并不是所有的PSAgent都需要进行交叉操作,这取决于交叉概率。	
	Initialize : OneShotBehavior	Initialize行为随机产生一种机组组合(代表问题域内的一个初始解)。	
	CalculateDischarge : OneShotBehavior	CalculateDischarge计算耗水量。	
	CalculateFitness : OneShotBehavior	CalculateFitness行为计算PSAgent的适应度。	
	PerformSelection : CyclicBehaviour	PerformSelection行为具体负责执行复制遗传操作,该行为根据来自CtrlAgent的命令,可能克隆PSAgent自身或者令PSAgent自杀。	
	WaitForCrossoverInfo : CyclicBehavior	该行为接受来自CtrlAgent的交叉信息,然后准备需要交叉交换的信息,最后发送给配对的PSAgent。	
	PerformCrossover : CyclicBehaviour	该行为具体执行交叉遗传操作,也就是说,它需要重新组装染色体。	
	PerformMutation : CyclicBehaviour	该行为根据变异概率执行变异遗传操作。	
	QAgent	HandleMessage : CyclicBehaviour	接受、识别和处理消息。当有新数据来临,启动TrainNN行为对相应机组的耗水量神经网络模型重新进行训练;当PSAgent请求计算耗水量,根据相应机组组合参数,启动SimNN行为,分别计算各机组的耗水量,最后返回总的耗水量消息。
		TrainNN : OneShotBehavior	根据机组特性数据,动态地执行神经网络训练任务。
SimNN : OneShotBehavior		启动神经网络进行耗水量计算。	

表 2 机组出力振动区间
Tab.2 Vibration intervals of generating units output

运行水头/m	1#机组振动出力区间/MW	2#机组振动出力区间/MW	3#机组振动出力区间/MW	4#机组振动出力区间/MW	5#机组振动出力区间/MW	6#机组振动出力区间/MW
70	30~55	40~90	30~60	25~40	30~55	30~80
75	40~80	50~90	30~50	35~70	20~60	30~100
79	30~60	40~80	30~60	20~45	10~45	30~70

表 3 部分机组优化组合结果
Tab.3 Results of unit commitment optimization

给定出力/MW	机组出力分配/MW						耗水量 Q/ (m ³ /s)
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	
400 (H=70 m)	91.62	102.21	0 (#)	58.28	56.91	90.87	803.9
500 (H=75 m)	122.83	0 (#)	176 (*)	0 (#)	75.45	125.67	792.14
600 (H=75 m)	143.73	0 (#)	58.76	111.39	140.06	145.97	946.89
700 (H=79 m)	147.46	133.89	91.07	115.57	83.65	128.21	1 058.13
800 (H=79 m)	151.03	147.31	72.16	136.63	141.4	151.47	1 143.87
900 (H=70 m)	150.87	151.17	168.67	140.06	140.36	148.80	1 469.50

4 结论

针对机组优化组合问题，本文提出了一个多 Agent 并行遗传算法的解决方案。其中，机组耗水量模型由 QAgent 建立，该 Agent 维护一组机组的耗水量神经网络模型，解决了耗水量的非线性问题；机组优化模型由一组执行并行遗传算法的多 Agent 系统实施并执行，解决了遗传算法的搜索效率问题。由于多 Agent 系统的引进，还增加了系统的智能性和灵活性。

参考文献

[1] SWARUP K, YAMASHIRO S. Unit commitment solution methodology using genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (1) : 87-91.

[2] 张炯, 刘天琪, 苏鹏. 基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9) : 25-29.
ZHANG Jiong, LIU Tian-qi, SU Peng. Unit commitment optimization based on genetic algorithm and particle swarm optimization hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9) : 25-29.

[3] Padhy N. Unit commitment-a bibliographical survey[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2) : 1196-1205.

[4] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2) : 82-87.
SUN Li-yong, ZHANG Yan, JIANG Chuan-wen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2) : 82-87.

[5] 杨伟, 华梁. 基于多 Agent 技术的电流速断保护自适应研究[J]. 继电器, 2008, 36(10): 5-10.
YANG Wei, HUA Liang. Study on current fast tripping

adaptive protection based on multi-agent technology[J]. Relay, 2008, 36(10): 5-10, 6.

[6] 潘爱强, 严正, 贾燕冰. 基于 COM 及多 Agent 技术的短期负荷预测系统开发[J]. 继电器, 2008, 36(9): 48-53, 86.
PAN Ai-qiang, YAN Zheng, JIA Yan-bing. Development of short-term load forecasting system based on COM and multi-agent techniques[J]. Relay, 2008, 36(9): 48-53, 86.

[7] 赵传霖, 吴文传, 张伯明. 基于多 Agent 的能量管理系统支持平台[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 47-52.
ZHAO Chuan-lin, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Multi-agent based software platform for new generation of EMS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 47-52.

[8] 章健, 艾芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 32 (24) : 80-87.
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xin-gang. Application of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32 (24) : 80-87.

[9] JUAN Y, OU Y. A process-oriented multi-agent system development approach to support the cooperation activities of concurrent new product development[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57 (4) : 1363-1376.

收稿日期: 2010-01-13; 修回日期: 2010-03-01

作者简介:

孟安波 (1971-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为自动化、系统集成与分析; E-mail: mengambo@vip.sina.com

刘永前 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为水力发电、风力发电;

徐海波 (1962-), 男, 博士后导师, 博士, 主要研究方向为水电控制、电力电子。