

基于多 Agent 的风力 / 太阳能互补 发电场能量管理系统

陈璟华, 杨宜民, 张伯泉

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 为提高互补发电场能量管理的合理性, 提出采用多 Agent 技术实现其能量的分布式管理。针对一个独立供电的互补发电场, 设计该发电场能量管理系统的组织结构, 构造其能量管理 Agent 的理论模型及各组成模块。在该系统中, Agent 采用非固定主从式合作机制, 并根据当前采样时刻的最大出力确定 Agent 之间的主从关系。讨论了能量管理系统中多 Agent 的协调和协作机制, 在采用合同网合作方法的基础上引入市场竞争, 通过招、投标确定有调节能力的从 Agent。将微粒群算法作为 Agent 的决策算法, 用以确定中标 Agent 的最佳调节序列, 实现母线电压越限时的能量优化管理。最后, 采用数字仿真证明了该能量管理系统的可行性。

关键词: 多 Agent; 风力 / 太阳能; 互补发电场; 微粒群算法

中图分类号: TM 614; TM 615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)08-0081-05

0 引言

风能、太阳能等可再生能源储量巨大、分布广泛、无污染且无处不在。理论上, 较小一部分的风力和太阳能资源就可满足人类的能源需求, 因此利用风能和太阳能受到世界各国普遍重视^[1-5]。但是风能、太阳能对天气和气候都非常敏感, 随机性强。单独的风能、太阳能系统都难以提供稳定的电能输出, 即使能够做到这一点也要付出相当的代价, 即加大中间蓄能装置的容量。风力 / 太阳能互补发电的提出给这一问题带来了很好的解决方法。但是, 风电机组、太阳能电池阵列的输出功率和负荷功率受外界因素的影响, 变动范围较大, 因此对控制和优化发电场能

量管理系统也提出了较高的要求^[6-7]。目前, 在风力 / 太阳能互补发电场能量管理控制方面的研究还比较少, 国内华南理工大学的吴捷教授等人士提出采用分级模糊算法实现互补发电场的能量管理, 并做了一定研究^[8-9]。对于这方面的研究还比较匮乏, 有待进一步研究和探讨。

多 Agent 技术是近年来工业控制领域的研究热点之一, 作为一种思想, 为分析、设计、描述和实现复杂、庞大的系统提供了一种新的方式和途径^[10-12]。现针对风力 / 太阳能互补发电系统的运行特点, 拟采用多 Agent 理论和技术实现其能量管理系统, 用以管理系统的供电模式和各部分能源供电的比例。

1 风力 / 太阳能互补发电场结构

研究的对象是一个向偏远小岛或者山区供电的独立型风力 / 太阳能互补发电场, 也就是该发电场和

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534040); 广东省自然科学基金资助项目(05001819)

外部电网没有联接,其结构如图 1 所示。

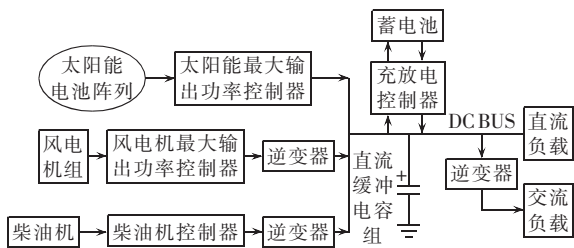


图 1 风力/太阳能互补发电场组成结构图

Fig.1 Block diagram of wind and solar hybrid power generation field

由图 1 可知,系统由以下几个部分组成:风力发电机及其控制器、太阳能电池及其发电控制器、缓冲电容、蓄电池及其充放电控制器、柴油发电机及其控制器和负载和逆变器。在这个互补发电系统中,由于风速、日照强度和其他气候条件的变化,风电机组和太阳能电池阵列的输出功率和负荷功率都存在着较大范围的波动,因而对其能量管理系统提出了较高的要求。

2 系统结构设计

2.1 系统组织结构设计

根据互补发电系统发电能源分布比较分散的特点,设计了一个基于多 Agent 的分布式能量管理系统。该系统将风力发电机分成 n 组,太阳能电池分成 m 组,柴油发电机为 1 组,每组发电装置配置 1 个能量管理 Agent,构成一个完成系统能量管理的多 Agent 系统。所设计的能量管理系统的结构框图如图 2 所示。

图中 WC、PC 和 DG 控制器分别为风机、太阳能电池阵列和柴油机控制器;WG、PG 和 DG 分别为风力发电机、太阳能电池和柴油发电机。SA 为二类负载控制开关,二类负载为互补发电系统中辅助设施所需的电能,当可再生能源输出电能有多余的能量时,才投入的负载。

图中每个能量管理 Agent 负责管理数台风力发电机、数台太阳能发电装置或数台柴油发电机。它们的输入分别是相应发电机、太阳能电池、柴油发电机、负载

和蓄电池的充放电状态的相关信息,经过这 $n+m+1$ 个能量管理 Agent 相互交互后,选取当前采样时刻输出功率最大的那组发电装置的能量管理 Agent 作为主 Agent,系统中其他能量管理 Agent 作为从 Agent,整个能量管理系统采用不固定主从关系的协调、协作机制。经过多个 Agent 的交互和协调,主 Agent 采用相应的优化算法作出决策,并向从 Agent 发出控制指令,控制风力发电机、太阳能电池和柴油发电机的有功输出。

在供电系统中,系统发电与负荷有功功率的平衡,是系统安全稳定运行的必要条件,由于系统负荷是由直流母线经逆变器提供的,因此直流电压的稳定性直接影响系统给负载提供电能的质量。取直流母线电压为系统的被控量,参照正在建设中的华南理工大学新能源中心分散式风力/太阳能互补发电系统,取直流母线电压工作范围为 192~240V,选择 216V 为直流部分的额定电压。由于蓄电池由其充放电控制器直接进行控制,因此能量管理系统对蓄电池的处理不予考虑。

2.2 Agent 的理论模型和功能

根据 Agent 的基本特性及能量管理系统的功能要求,设计能量管理 Agent 的基本结构如图 3 所示。

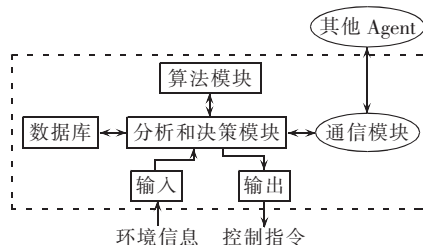


图 3 能量管理 Agent 的理论模型

Fig.3 Theoretical model of EMS agent

整个能量管理 Agent 核心部分由数据库、分析、决策模块和算法模块 3 个部分组成,它们通过输入模块、输出模块和通信模块与外界进行信息交互。

其中,数据库用于存储单个 Agent 自身的信息、整个能量管理系统中其他 Agent 的信息及环境状态信息。分析决策模块是能量管理 Agent 运行的调度中心,主要完成以下工作:执行控制任务,处理消息和状态监测。算法模块包含该 Agent 进行控制的各种候选算法,它决定一个 Agent 的能力和该 Agent 在系统

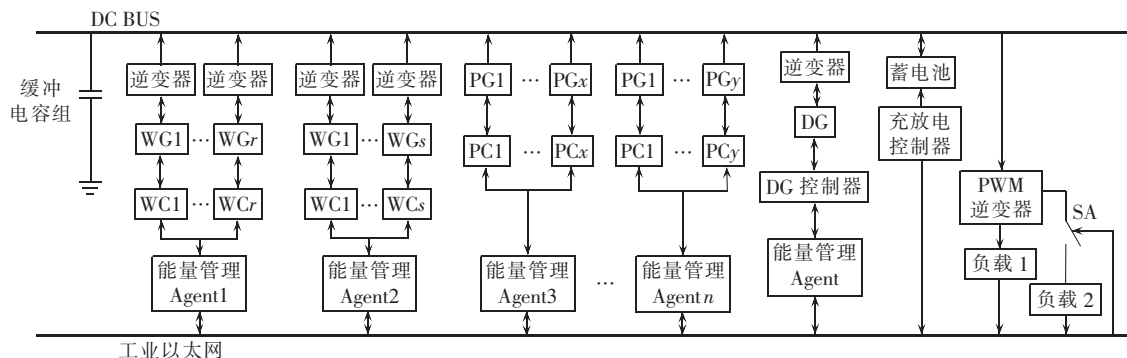


图 2 基于多 Agent 的能量管理系统结构框图

Fig.2 Block diagram of multi-agent based EMS

中的作用^[13]。不同 Agent 控制目标有差异,其算法的具体内容也随之变化。因为能量管理 Agent 是在整个互补发电场的大范围内进行协调和决策,因此这里拟采用微粒群算法作为 Agent 的智能决策算法。

3 多 Agent 的协调和协作

在风力、太阳能、柴油机和负荷构成的发电、用电系统中,由于风速、日照强度和其他气候条件的变化,风电机组、太阳能电池阵列的输出功率和负荷功率都存在较大范围的波动。因此,基于多 Agent 的互补发电场能量管理系统的基本任务是在互补发电系统容量已经确定的情况下,选择互补发电系统的运行控制策略,根据系统发电和负荷用电状况,调节各部分供电量的比例,使得系统的发电满足负荷的功率需求。

在实际的大型互补发电场中,所包含的风力发电机、太阳能电池阵列和柴油发电机等发电装置较多,其管理和控制比较复杂。如果仅采用点对点的请求/响应方式进行主 Agent 和从 Agent 之间的交互,很难满足实时多 Agent 协调的要求。这里拟采用广播通信方式实现多 Agent 之间的交互,在此基础上,Agent 之间的协作采用合同网协调机制实现,主 Agent 作为管理 Agent,负责发布能量管理任务的标书和决定合同执行者。在合同网的基础上,将市场机制引入多 Agent 能量管理系统。整个能量管理系统的目标是以较少的代价在较短时间内得到合格的直流母线电压水平。而每个从 Agent 的管理目标则是在自己发电出力许可的情况下,协助完成整个系统的任务。

整个多 Agent 系统的协调和协作过程描述如下:

a. 正常工作时,每个 Agent 在采样期间对所管理的发电装置的运行状态进行监测并采样各台发电装置当前出力,用广播的形式将采样数据传送给每个能量管理 Agent,由此确定能量管理系统中 Agent 的主从关系,主 Agent 确定之后,除监测自身的运行状况外,还要采集负荷、直流母线电压和蓄电池充放电状态等数据,招、投标机制由母线电压越限触发;

b. 当主 Agent 检测到直流母线电压越限且无法通过自身的调控能力使越限行为消失时,用广播的形式向所有从 Agent 发送招标通告,并发送电压越限程度等信息,进入招标状态;

c. 从 Agent 收到招标通告后,针对标书中的任务,根据自身运行限制、发电装置的工作状态等情况估计自己的能力,决策是否投标,如果决定投标,则将投标书发送给主 Agent,投标书包含自己的发电出力和发电备用等信息,从 Agent 进入投标状态;

d. 主 Agent 接收到多个从 Agent 的投标信息,用智能优化算法选择其中的一个从 Agent 向其发送中标信息和任务执行合同,请求其协助调节母线电压,接收到中标消息的从 Agent 向主 Agent 发送确认信息并发出控制指令,投、切发电装置,进入执行状态;

e. 在给定时间内没有接收到中标消息的从 Agent 由投标状态转回检测状态,提供能量管理协助

的从 Agent 执行完任务后,由执行状态返回正常时监测状态;

f. 主 Agent 接收到中标 Agent 完成任务的确认消息后,主 Agent 检测母线电压,如母线电压越限消失,则返回监测状态,否则重新进入招标状态,寻求新的从 Agent 进行母线电压调节,协助完成能量管理任务。

在上述基于多 Agent 的能量管理协调和协作过程中,最重要和最难实现的步骤是各从 Agent 对自身电压调节能力的估计和主 Agent 如何从众多投标书中选择合适的 Agent 执行合同任务,使能量管理系统以最有效的控制手段完成母线电压调节,这实际是一个优化问题,下面探讨它的实现方法。

4 采用微粒群算法实现互补发电场能量优化管理

针对直流母线电压越限时的电压恢复,存在若干种发电装置的投、切控制序列。因此,能量管理系统的任务是通过多个 Agent 的协作,主 Agent 能够从中确定一个最优的控制序列,实现电压母线调整。

通常对于可再生能源发电装置的投资较大,为了充分发挥其发电的效率,缩短系统成本的回收周期,发电装置多采用最大功率输出为控制目标。因此可再生能源的能量管理 Agent 参与系统有功功率的调节时,只能通过投切发电装置进行调节,而没有办法进行平滑的调节,对应于不同情况,每个能量管理 Agent 的电压调节能力各不相同。因此,在选择从 Agent 的调节顺序时,一般要求综合考虑各能量管理 Agent 的电压调节能力、运行、发电成本等因素,获得一个最佳从 Agent 调节序列,按照此序列进行调节,能够充分合理利用可再生能源,达到系统有功供需平衡。

设第 i 个能量管理 Agent 为某采样周期内的从 Agent,则该 Agent 关于上述指标的描述向量为 L_i ,用其表示第 i 个从 Agent 关于母线越限时的调节能力指标,其大小可由该 Agent 管理的发电装置的当前出力与系统有功缺额之间的相对比值表征。在对原始数据进行归一化处理后,可直接用于选择优化排序,其结果是关于母线电压越限的最佳调节序列。因此,互补发电场的能量管理问题可归结为一个优化问题。

微粒群 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法是一类新兴的、模拟生物群落行为的启发式搜索算法^[14-15]。该算法具有并行处理和鲁棒性好等特点,能以较大概率找到所求问题的最优解。因此拟采用这种智能搜索算法解决互补发电场母线电压越限时的能量优化管理。

互补发电场能量优化控制序列由该采样周期的主 Agent 和从 Agent 的交互信息完成,是主 Agent 选择从 Agent 控制序列的主要参考,其实现步骤如下:

a. 根据从 Agent 传送的信息确定其特征指标向量 L_i ;

b. 确定微粒群优化搜索算法的参数,包括群体规

模、最大速度、最大代数、惯性权重、加速常数等,随机产生初始群体进行计算,直到达到最大代数;

c. 输出当前风速、日照强度和母线电压越限情况下的最优控制序列,最优控制序列确定后,主 Agent 根据这一控制序列依次向相应的从 Agent 发出中标信息和能量管理任务执行合同,直到母线电压恢复到正常范围内。

5 仿真试验与分析

为验证方案的可行性,采用某一天(0:00~24:00)的功率供需状况,对所设计的能量管理系统进行仿真研究。互补发电场的风机由 5 台 15 kW 的风机组成,太阳能电池阵列也分为 5 组,每组太阳能电池阵列的峰瓦为 3 kW,柴油发电机为一台功率为 16 kW 的机组,其功率输出变化范围为 4.8~16 kW。将 5 台风机、5 组太阳能电池和柴油发电机各配置一个能量管理 Agent,构成互补发电场的能量管理系统。

取直流部分的缓冲电容组的容量 $C=10\text{ F}$,风能和太阳能发电控制装置组使得投入工作的风力发电机和太阳能电池发电组工作在最大功率输出状态。能量管理系统控制目标是在母线电压越限时,寻找一个最优控制序列,使直流母线电压工作在 192~240 V 范围内。微粒群算法中参数的设置如下:加速常数 $c_1=2, c_2=2$,群体规模 $s=20$,总进化代数 N 为 200,惯性权重 $\omega=1-i \times 0.6 / (N-1)$,其中 i 为当前进化代数。

设系统中太阳能电池阵列、风力发电机组和负载功率在一天内变化情况如图 4 所示。

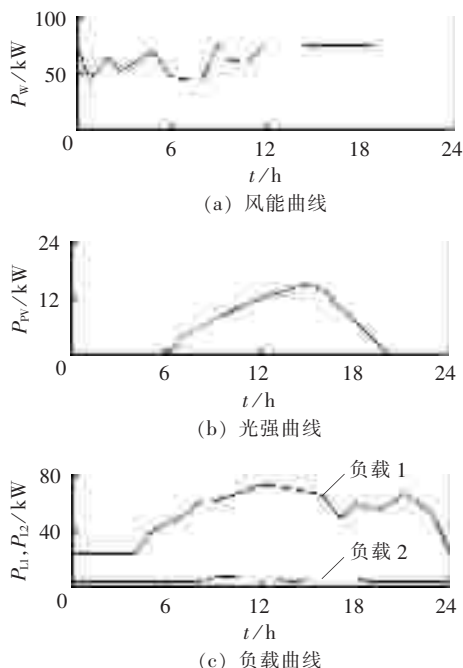


图 4 系统各部分输出功率变化曲线

Fig.4 Output power curves of different parts

由图 5 可得风力发电机组和太阳能电池阵列一天内所输出的功率和负荷功率变化曲线之间的对比。由图可知,负载功率在部分时间大于风能和太阳能输出功率之和,部分时间负载功率远小于风能和太阳能输出功率之和,如果不加以控制,直流母线的

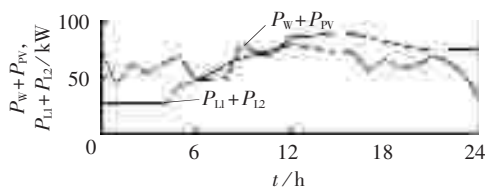


图 5 负载和可再生能源功率对比曲线

Fig.5 Power comparison between renewable energy and load

电压将出现较大波动,使系统无法正常工作。

假定采用基于多 Agent 的能量管理,其系统直流端电压 U_{dc} 如图 6 所示(种群规模为 20,进化 200 代),从图中可以看出,该能量管理系统在可再生能源发电出力大于和小于负载功率时,均可及时地对发电装置进行控制,维持直流部分电压在设定的 192~240 V 范围内。

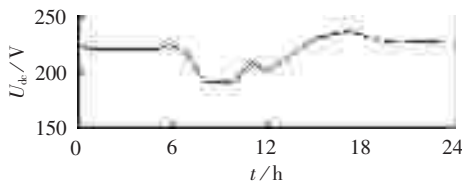


图 6 系统直流端电压

Fig.6 Curve of DC voltage

6 结论

基于多 Agent 的互补发电场能量管理系统,探讨了互补发电场直流母线电压越限情况下能量的优化管理方法。在多个能量管理 Agent 协调和协作的基础上,给出了一种求取管理 Agent 最优调节序列的方法,使能量管理系统以最有效的控制手段,使直流母线电压恢复正常。通过数字仿真分析看出:能量管理系统在可再生能源发电出力大于和小于负载功率时,均可以及时地对发电装置进行控制,维持直流部分电压在设定的范围内。

参考文献:

- [1] 杨秀媛,梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景[J]. 电网技术, 2003,27(7):78-79.
YANG Xiu-yuan, LIANG Gui-shu. Development of wind power generation and its market prospect[J]. Power System Technology, 2003,27(7):78-79.
- [2] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.
CHEN Shu-yong, DAI Hui-zhu, BAI Xiao-min, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(3):26-29.
- [3] 陈振千. 欧洲各国风力发电发展情况及有关政策的考察和几点建议[J]. 能源技术,2004,25(1):14-16.
CHEN Zhen-qian. Report and suggestion on the development and the policies relating to wind power generation in European countries[J]. Energy Technology, 2004,25(1):14-16.
- [4] 李文婷,刘宏,陈慧玲. 国内外太阳能光伏发电发展综述[J]. 青海电力,2004,23(4):3-6.
LI Wen-ting, LIU Hong, CHEN Hui-ling. Developing summarization of domestic and international solar energy PV generation [J]. Qinghai Electric Power, 2004,23(4):3-6.

- [5] 汤叶华,谢建. 光伏技术的发展现状[J]. 可再生能源,2005(3): 68-69.
TANG Ye-hua,XIE Jian. Status and expectation of photovoltaic technology[J]. Renewable Energy,2005(3):68-69.
- [6] KARKI R,BILLINTON R. Reliability / cost implication of PV and wind energy utilization in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2001,16(4):368-373.
- [7] BILLINTON R,KARKI R. Capacity expansion of small isolated power systems using PV and wind energy[J]. IEEE Trans on Power Systems,2001,16(4):892-897.
- [8] 张森. 风力-太阳能混合发电控制系统研究[D]. 广州:华南理工大学,2004.
ZHANG Miao. Research of wind-PV hybrid generating control system[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2004.
- [9] 杨苹,杨金明,刘永强,等. 分散式风力-太阳能混合发电系统的研制[J]. 能源技术,2002,23(3):113-117.
YANG Ping,YANG Jin-ming,LIU Yong-qiang,et al. The development of a hybrid(wind-solar) power system[J]. Energy Technology,2002,23(3):113-117.
- [10] 黄小兵,唐文胜. 基于Agent系统的概念、方法和应用[J]. 计算机与现代化,2000(4):6-11.
HUANG Xiao-bing,TANG Wen-sheng. Concept,method and application for Agent-based system[J]. Computer and Modernization,2000(4):6-11.
- [11] 盛戈皞,涂光瑜,罗毅,等. 基于多Agent的二级电压控制系统[J]. 电力系统自动化,2002,26(5):20-25.
SHENG Ge-hao,TU Guang-yu,LUO Yi,et al. Study on MAS-based secondary voltage control system[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(5):20-25.
- [12] 陈璟华,陈少华,杨宜民. 多Agent技术在母线保护系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):59-62.
CHEN Jing-hua,CHEN Shao-hua,YANG Yi-min. Application of multi-agent technology in bus protection relay system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(12):59-62.
- [13] 盛戈皞,江秀臣,范习辉,等. 基于多Agent的二级电压控制系统的实现及性能分析[J]. 电网技术,2005,29(24):42-48.
SHENG Ge-hao,JIANG Xiu-chen,FAN Xi-hui,et al. Implementation and performance analysis of multi-agent based secondary voltage control system[J]. Power System Technology,2005,29(24):42-48.
- [14] KENNEDY J,EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth,USA:IEEE,1995:1942-1948.
- [15] EBERHART R,KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proc 6th Int Symposium on Micro-machine and Human Science. Nagya,Japan:[s.n.],1995:39-43.
- [16] 张森,吴捷,侯聪玲,等. 自适应算法在光伏发电系统最大功率跟踪中的应用[J]. 电力电子技术,2005,39(2):50-52.
ZHANG Miao,WU Jie,HOU Cong-ling,et al. Application of adaptive algorithm in maximum power pint tracking of the photovoltaic[J]. Power Electronics,2005,39(2):50-52.
- [17] 刘细平,于仲安,梁建伟. 风力发电技术研究及发展[J]. 微电机,2007,40(4):76-79.
LIU Xi-ping,YU Zhong-an,LIANG Jian-wei. Research and development of wind power technology[J]. Micromotors Servo Technique,2007,40(4):76-79.
- [18] 赵群,王永泉,李辉. 世界风力发电现状与发展趋势[J]. 机电工程,2006,23(12):16-18.
ZHAO Qun,WANG Yong-quan,LI Hui. The current status and development trend of world wind power[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2006,23(12):16-18.
- [19] 吴晓朝,吴捷,杨金明,等. 基于满意度原理的风电场电能质量分析[J]. 低压电器,2006(8):12-14.
WU Xiao-chao,WU Jie,YANG Jin-ming,et al. Study on the appraisal of power quality for wind plant based on satisfactory degree theory[J]. Low Voltage Apparatus,2006(8):12-14.
- [20] 杨俊华,吴捷,杨金明,等. 风力发电系统中最优控制策略综述[J]. 微特电机,2004(3):39-42.
YANG Jun-hua,WU Jie,YANG Jin-ming,et al. Summarization on optimal control techniques in wind energy conversion system[J]. Small & Special Machine,2004(3):39-42.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

陈璟华(1974-),女,江西新余人,讲师,博士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用(E-mail:echo@gdut.edu.cn);

杨宜民(1945-),男,广东揭阳人,教授,博士研究生导师,主要从事机器人和电力系统智能控制方面的研究;

张伯泉(1974-),男,山东沂水人,博士研究生,研究方向为智能控制及可再生能源的应用研究。

Energy management system of hybrid power generation field based on multi-agent system

CHEN Jing-hua,YANG Yi-min,ZHANG Bo-quan

(Department of Automation,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510090,China)

Abstract: In order to improve the rationality of energy management system of hybrid power generation field,the multi-agent technology is used to implement its distributed management. Its architecture, theoretical agent model and different component modules are designed,in which the non-fixed master-slave cooperative mechanism is used to agents,and the master or slave agent is defined according to current power outputs. The cooperation among agents is discussed,to which the market competition is applied based on contract-net. The qualified slave agents are invited by public bidding. The particle swarm optimization algorithm is used to set the optimal sequence of selected agents. Simulation result shows the feasibility of proposed scheme.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(60534040) and Guangdong Natural Science Foundation(05001819).

Key words: multi-agent; wind-solar; hybrid power generation field; particle swarm optimization