

电力市场综合模拟系统——实验方法与系统架构研究

陈皓勇, 谭 科, 荆朝霞, 华 栋, 王野平
(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对电力市场研究内容的共性和个性进行分析, 设计并实现了基于网络的实验经济学和基于代理计算经济学的电力市场综合模拟系统。提出实验人-代理混合实验方法, 可在 3 种实验方法下切换配置多种电力市场模式开展仿真实验。系统采用客户端程序/Web 浏览器、应用服务器、数据服务器的 3 层 B/S 与 C/S 混合模式, 具备健壮的数据通信与仿真交互架构。设计管理员、教练员和学员 3 类用户, 实验过程严格统一控制, 各类用户界面清晰明确。实验参数设置清晰灵活, 结果数据直观有序, 再现了电力市场运营真实环境。通过某区域电网数据算例, 验证了模拟系统的可行性和有效性。

关键词: 电力市场; 实验经济学; 基于代理的计算经济学; 综合模拟系统; 模拟实验

中图分类号: TM 743; F 407.61

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0025-05

0 引言

综合分析国内外电力市场成功与失败的经验, 结合国内东北、华东 2 个区域电力市场试运行情况, 可以看出我国在目前条件下建立电力市场存在一定的风险。因此, 为了把风险化解在方案设计和规则制定阶段, 在电力市场正式启动之前, 有必要结合电网实际建立一套综合模拟系统, 用于研究、验证各种市场方案和规则的合理性及分析可能出现的风险。其意义和作用在于, 既可在市场启动运营前为各市场参与者进行培训提供一种有效的技术支持手段, 也可以在市场运行后运用实际的市场数据进行论证分析, 以便对市场规则提出修改意见。

目前, 国内外均已开始了电力市场仿真模拟的研究与平台开发, 如美国阿贡国家实验室的 EMCAS (Electricity Market Complex Adaptive System) 系统^[1-2]、爱荷华州立大学的 AMES (Agent-based Modeling of Electricity Systems) 仿真系统^[3-4]和康奈尔大学的 PowerWeb 实验仿真平台^[5]等对电力市场仿真问题进行了一系列极有成效的研究, 有成熟的经验可以借鉴。国内高校西安交通大学^[6]已初步开发成功电力市场交易模拟系统, 在国内学术界和工业界具有较大的影响。东南大学^[7]以电力市场运行仿真为基础, 以培训为目的构建了 PMSTS 系统。华南理工大学与香港理工大学^[8]运用 .Net 平台共同开发适用于不同电力市场行为的仿真器, 为本文奠定了研究基础。

上述提及的电力市场仿真研究有一个共性, 即均只适用于某一特定的市场模式, 当市场模式变更时, 数据库及交易平台必须进行较大的改动, 工作量大且耗时。而考虑我国实际, 电力市场建设方案尚未

最终确定, 运营规则可能频繁修改。能根据目前现有的规则与研究成果构建, 且只需通过修改参数或软切换开关提供对多种市场模式的对比研究, 这是本文提出的一个全新课题。因此在解决该难题过程中, 需对各种市场模式下数据库共性和个性要求进行分析, 并开发出支持各种市场模式下的具有工程应用实用性的交易平台, 难度及工作量均较大。

1 实验方法研究

电力市场仿真模拟是研究电力系统多个自治成员的自行决策又相互影响的复杂问题, 难以采用博弈论等传统方法建模, 实验经济学 EE (Experimental Economics) 和基于代理的计算经济学 CE (Computational Economics) 是解决这类问题的最为优秀的方法。

1.1 实验经济学

实验经济学是近几十年来在西方兴起的一个新的经济学流派, 它借鉴自然科学实验的方法, 用实验人来代理实际市场中买方、卖方进行决策, 通过可控制的实验对经济学的理论假设进行证明和对经济政策的实施效果进行检验^[9-10]。近年来, 借助网络平台实验在市场环境模拟、交易过程控制等方面具有极大的优势, 实验经济学在电力市场的研究中逐渐得到应用^[11-12]。

Vernon L. Smith 领导的“Arizona”学派和乔治·梅森大学的“实验科学跨学科中心”用实验经济学的方法研究电力工业解除规制的问题, 取得了一系列重要研究成果^[11-12]。1986 年起, Smith 等在亚利桑那大学对电力市场的机制设计、工业结构、定价、输电和市场力等问题进行了一系列研究, 研究的结果引起新西兰、澳大利亚和美国政府和电力工业界的重视^[11]。国内西安交通大学则率先建立基于 Internet 的实验经济学电力市场仿真平台, 并成功组织了较大规模的由电力工业界管理和技术人员参与的电力市

场竞价实验^[6]。

1.2 基于代理的计算经济学

计算经济学是用计算的方法来进行经济研究的新技术,其途径是通过大量有独立机能并能相互影响的 Agents 组成的进化系统来建模和模拟真实的经济体系。

源于 20 世纪 70 年代末的分布式人工智能,其主要思想是建立一个由多个子系统构成的协作系统,各子系统之间协同工作对特定问题进行求解。多代理系统 MAS(Multi-Agent System)是分布式人工智能的一个分支,它研究独立 Agent 间如何进行智能行为的自适应和协调,能使逻辑上或物理上分散的系统并行、协调地求解问题,适合开放和动态的人类社会环境系统研究。

美国爱荷华州立大学 Leigh Tesfatsion^[4,13]首次将 MAS 的概念应用于电力市场的仿真设计中,并提出基于代理的计算经济学 ACE(Agent-based Computational Economics)方法。Leigh 采用 ACE 对电力批发市场方案进行了系统研究^[14]。

ACE 本质是使用具有有限理性的和自适应的 Agent 表示各个市场成员,并通过其进行交互作用(即仿真),获得市场运行的特征描述。ACE 电力市场仿真模型如图 1 所示。假定电力市场由 N 家发电公司和交易中心(PX)组成,Agent I 代表发电公司 I 。

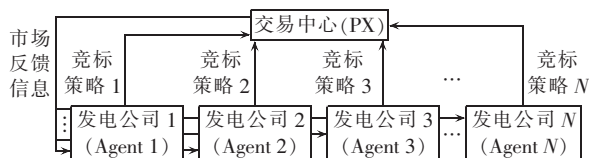


图 1 ACE 电力市场仿真模型

Fig.1 Simulation model of ACE power market

ACE 电力市场仿真可用以下逻辑步骤概括:

- 根据市场信息,Agent 以自身收益最大化为目标选择竞标策略;
- Agent 将竞标信息递交交易中心;
- 交易中心根据市场供求响应、电网传输约束等确定各 Agent 策略情况,并将市场交易结果、下一次交易信息等反馈 Agents;
- Agents 根据反馈信息准备下一次竞标策略。

ACE 电力市场仿真中,Agents 决策可选用不同的智能学习算法,如美国爱荷华州立大学的 AMES 仿真系统^[3-4]和文献^[13]中采用 VRE learning 算法,文献^[14]在 AMES 平台上构建了 Q-learning 算法并对比了 VRE learning 算法性能,本文采用改进的 VRE learning 算法。

1.3 实验经济学与 ACE 的分析比较

ACE 仿真模拟和实验经济学模拟的过程和结果具有可比性:2 种方法的模拟过程相同,只是 ACE 中,代理行为基于完全理性的利润最大化原则,而实验经济学参与人的决策行为是非常复杂的,并不符合经济理论简单的理性假设。2 种模拟方式也具有

互相参考性:2 种模拟方式的对比研究能论证 ACE 模拟的可信性,以及更复杂市场模式下 ACE 性能,同样,ACE 对于电力经济系统这一高度非线性的系统博弈均衡的求解,能验证实验经济学结论的有效性。

实验经济学方法是用实验人来代理电力市场交易,较基于代理的智能算法有更强的学习能力和判断能力,也有更灵活的策略,能更合理、真实地模拟电力市场交易,更深入地发现市场存在的一些潜在问题。因此,并构实验经济学和 ACE 仿真平台,通过有针对性的设计实验方案实现对不同市场模型的模拟,可得出的一系列结论,为真实电力市场建设提供实验依据。

2 系统架构

2.1 体系结构

电力市场综合仿真系统不同于一般的电力市场技术支持系统,一方面,应根据经济实验的要求,在忽略了一些次要的技术细节下,需具备模拟电力市场真实交易环境与过程的功能;另一方面,应能对实验过程严格监控,并具有灵活的实验市场设计、实验参数设置、结果查询等功能。本文构建的模拟系统采用由客户端程序/Web 浏览器、应用服务器、数据库服务器组成的 3 层的浏览器/服务器(B/S)和客户/服务器(C/S)混合结构,逻辑模型如图 2 所示。

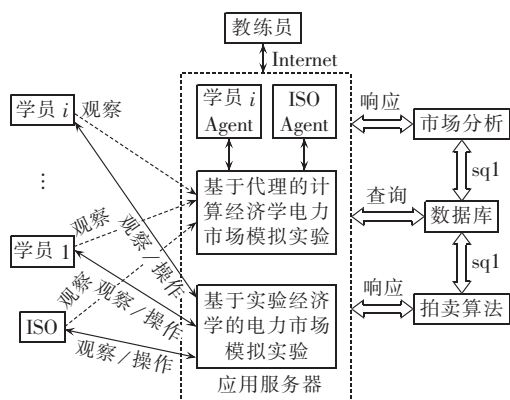


图 2 系统逻辑模型

Fig.2 Logic architecture of system

系统逻辑上可包含若干同时交易的市场,允许经过注册的合法用户选择任意市场进行交易,用户的所有操作通过客户端程序和 Web 浏览器进行。

系统用户分为 3 类,各自拥有不同的权限,以保证系统安全、有序地进行。

- 管理员在本系统中具有最大权限,负责系统的管理和维护,能看到系统所有数据。
- 教练员负责组织实验,包括创建实验市场、设置实验参数和控制实验过程,能看到所模拟的市场的的所有数据,但需向管理员提出申请,才能组织实验。
- 学员分为 3 类:发电厂商报价员,代表参与竞价的发电厂商;交易中心交易员,代表电力调度交易中心,负责市场出清;用户代表(省电网公司、大用户等),代表从市场采购电力用户。

2.2 功能模块设计

系统基于 J2EE 架构开发,具有良好的开放性、可扩展性和可移植性。采用 Oracle 数据库,整个系统运行建立在统一的数据库基础之上。电力市场综合模拟系统总体设计如图 3 所示。

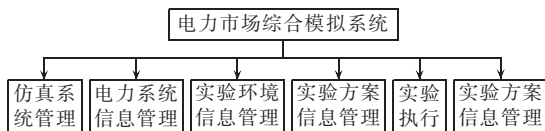


图 3 电力市场综合模拟系统功能模块设计

Fig.3 Functional structure of integrated power market simulation system

下面介绍各模块的结构与功能。

仿真系统管理:仿真系统管理与维护,包括用户管理和系统紧急情况恢复两大功能。

电力系统信息管理:电力系统物理数据管理,包括基本信息、电厂信息、机组信息及分区信息,其中电厂与机组信息包括出力、启动成本、爬坡速率等参数。

实验环境信息管理:与实验环境相关的信息配置和管理,包括分区信息(分区、区间联络信息)、负荷信息(分区、负荷曲线)、市场成员信息、合同信息 5 大模块。

实验方案信息管理:实验方案相关信息配置和管理,包括市场模式、实验轮、实验方式、智能代理类型、时段和容量管理。除教练员外,其余类型用户均无权限配置和修改实验方案。

实验执行:提供实验过程控制,对不同市场角色具有不同功能,管理员可通过本模块对实验方案进行配置,并开启和控制实验流程,其他市场参与者在管理员的控制下执行相应的职能。

2.3 系统创新点与优势

与目前国内外已经建立的电力市场实验平台相比较,本文所构建的系统功能更为完善和全面。

a. 首个同时包含实验经济学与 ACE 实验方法的仿真系统,并创新地实现实验人-代理混合实验方法。实验过程统一协调与严格控制,可提供对各种市场模型情景下 3 种实验方法的对比研究,增加了实验结果的可信度,亦可对智能代理算法性能提供参考。

b. 系统提供目前在研的各类市场模式:日前现货市场统一出清、分区边际电价出清、两部制市场模型、集中竞价送电模型。

c. 灵活、合理的实验参数设置机制,各类用户界面清晰明确。

d. 强壮、高效的网络通信架构,优秀的网络实时仿真交互数据处理性能。可支持 20 个并发市场,每个市场最大参与者数量可达 100 个,90% 的处理时间小于 5 s。

3 基于实验经济学和 ACE 的模拟实验

电力市场综合模拟系统集合了电力市场竞价交易、智能代理仿真技术等多项研究成果,可涉及如电

力市场机制设计、电价竞价、辅助服务等综合仿真研究。

3.1 模拟实验步骤流程

3.1.1 选择实验被试者(参与者)

分为实验人和智能代理 2 类,其中,实验人为实验经济学模拟被试者,从电力工业界相关人员和具备一定的电力市场交易知识的学生中选取,运用实验经济学价值诱导理论,对被试者提供实验激励(如金钱、物质或学分奖励);智能代理为 ACE 模拟被试者,选择相应的智能算法,系统中提供 VRE 强化学习和 Q-learning 2 种。

3.1.2 建立实验环境

根据实验内容的不同,可按如下内容建立实验环境。

a. 建立电力市场环境,包括发电和负荷节点、输电线路、机组和物理电厂。

b. 选择实验组织形式,包括以下 4 种:简单交易模式、日前交易模式、月度交易、年度交易+月度交易+日前交易+简单交易模式。

c. 设定实验时间跨度,可以为多年、1 年、多月、1 月、多日、1 日、多时段、1 时段。

d. 设定各交易周期交易轮数。

e. 设定阻塞分区,年、月交易一般将区域内各机组、电网公司设为节点,并分为多个阻塞分区。

f. 创建实验场景数据,包括线路场景停服役管理数据,对每个场景,记录线路不同时段の開合状态;建立电力用户负荷数据,对每个场景,分别设置每个电力用户在每个节点的负荷数据;建立计划合同数据,需要输入合同的电力曲线表,根据曲线表可以得到每天每个时段的合同量。

3.1.3 配置实验方案

包括 2 个方面内容的配置方案。

a. 仿真实验的基本信息:包括开始阶段和结束阶段、实验方式(实验经济学、ACE 或实验人-代理混合模式)。

b. 市场规则:包括阻塞分区方法、交易申报规则、市场出清模式。

3.1.4 实验执行

管理员完成仿真实验建立过程后,即可开启实验模拟系统,实验参与者即教练员(tutor)、交易员(trader)和报价学员(bidder)依次登录,其过程如图 4 所示。

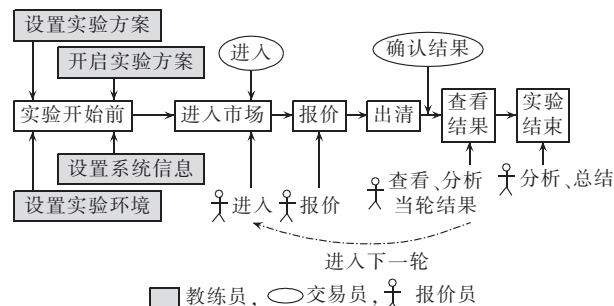


图 4 实验步骤

Fig.4 Procedure of simulative experiment

3.2 实验经济学交易竞价过程

a. 教练员发出市场启动指令后,交易员和报价员才能进入市场,当所有交易员和报价员都进入市场后,交易竞价开始。

b. 报价员根据各自机组参数和系统负荷曲线制定竞价策略。系统报价曲线采用分段阶梯形曲线,价格随容量段递增。报价容量段数由管理员统一设置,不允许修改。

c. 报价员填写好报价表后提交,系统待所有报价员提交后,方能进行市场出清。交易员确认市场出清后,系统将信息反馈给各报价员,报价员总结分析出清结果,并准备下一时段交易。至此完成一个时段的实验过程。

d. 当完成教练员设定的交易时段实验数后,一天交易结束,系统将统计各报价员代表的发电厂商售电量、出清电价、售电收入、利润、利润率等信息并反馈给各报价员。报价员准备下一天交易。

e. 因为各发电厂商机组参数存在差异,为保证竞争的公平性,可轮换实验参与者在市场中所代表的发电厂商报价员角色。

f. 当完成教练员设定的交易次数后,实验结束。教练员根据各参与者的收益给予奖励。

以上即为实验经济学模拟实验下的实验步骤,ACE 模拟过程大致相同,只在步骤 b、c 描述的报价过程中,由智能代理完全代替实验人报价。

4 仿真算例

算例数据取自国内某区域电网,取该区域电网内容大于 100 MW 的火电厂作为市场参与者,共 14 个 bidder。系统总容量 4580 MW,其中火电总容量 4110 MW,水电容量不参与报价,直接用作削峰。该区域市场集中度指数 HHI (Herfindahl-Hirschman Index) 值为 709.6,表明该区域市场竞争充分,可忽略市场力因素,利于研究竞争市场下市场参考者竞价策略、市场机制、Agent 算法性能等一系列重要问题。下面设计一组简单的实验经济学和 ACE 对比模拟实验,采用考虑网络约束的日前现货市场统一出清市场模式。

图 5、6 为实验经济学和 ACE 实验中市场总收益情况(p 为周期; R_T 为市场收益,实线表示; C_A 为平均价格,虚线表示),2 幅图中曲线表现了 2 种相同的趋势:

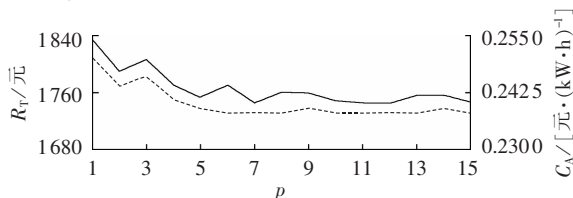


图 5 实验经济学 15 轮实验结果 (市场收益与平均价格)

Fig.5 Results of 15-period EE experiment (total market revenue & average prices)

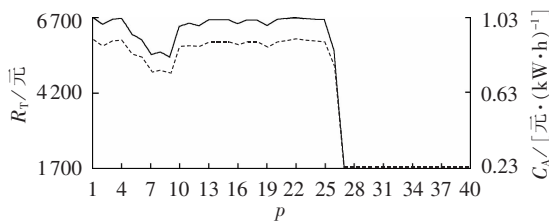


图 6 ACE 40 轮实验结果 (市场收益与平均价格)

Fig.6 Results of 40-period ACE experiment (total market revenue & average prices)

a. 市场收益与平均价格大致相同的变动趋势,反映当前竞争充分的实验市场结构下电价决定市场收益;

b. 2 幅图中曲线总体趋势是由高走低,反映实验经济学和 ACE 2 种实验方式均具有电价收缩特性。

图 7、8 为实验经济学和 ACE 实验中抽取的 4 个发电厂收益情况(R 为发电厂收益;曲线 1~4 分别对应发电厂 1~4;曲线 5 为平均价格)。由图 7 可见,各发电厂收益的无规律波动变化,一方的较高收益往往对应另一方的低收益,实验市场竞争激烈。图 8 前 27 轮表现了 Agents 更为激烈的学习与竞争过程,相比之下,实验人作为报价员竞争更为“温和”,收益变动范围在 30~110 万元之间。这与实验人多采用厌恶风险的报价策略,而智能 Agent 采用积极的学习策略有关。

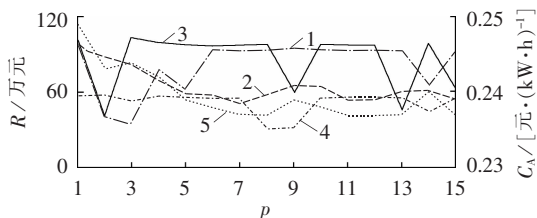


图 7 实验经济学实验中发电厂收益情况

Fig.7 Revenue of genco in 15-period EE experiment

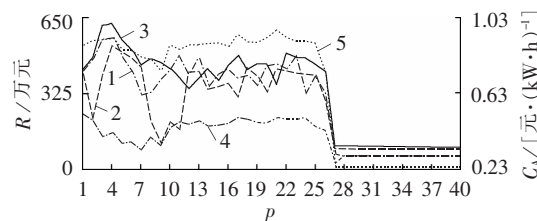


图 8 ACE 实验发电厂收益情况

Fig.8 Revenue of genco in 40-period ACE simulation

因篇幅有限,本文重点论述模拟实验方法与系统架构,并简单介绍一组对比实验数据。全面的实验编制与分析、考虑区域电力市场的风险与绩效评估^[15]、双边交易研究^[16]将在后续工作中阐述。

5 结语

电力市场综合模拟系统集成大量国内外先进的理论研究成果,具备模拟市场竞价、安全校核、节点电价计算、实验模拟和智能代理等多个功能。并结合电力市场发展趋势和区域电网的实际运行需

求,增加了跨省区送电集中采购竞价、节能调度、结合容量电价和电量电价的两部制电价计算功能等。该仿真平台可以通过评估电能市场运营效率和可能隐藏的市场风险,为电力市场理论研究提供仿真平台,为我国的电力市场建设提供坚强的技术支撑和技术服务。

参考文献:

- [1] VESELKA T,BOYD G,CONZELMANN G,et al. Simulating the behavior of electricity markets with an agent based methodology: the electric market complex adaptive system(EMCAS) model[C/CD]//Proc 2002 USA EE / IAEE Conf. Vancouver, Canada; [s.n.],2002.
- [2] CONZELMANN G,BOYD G,KORITAROV V,et al. Multi-agent power market simulation using EMCAS[C]//Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA:IEEE,2005:2829-2834.
- [3] SUN Junjie,TESFATSION L. Dynamic testing of wholesale power market designs:an open-source agent-based framework[J]. Computational Economics,2007,30(3):291-327.
- [4] SUN Junjie,TESFATSION L. An agent-based computational laboratory for wholesale power market design[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA:IEEE,2007:1-6.
- [5] ZIMMERMAN R D,THOMAS R J,GAN D,et al. A web-based platform for experimental investigation of electric power auctions[J]. Decision Support Systems,1999,24(3-4):193-205.
- [6] 陈皓勇,王锡凡,王秀丽. 基于Java的电力市场竞价实验平台设计、实现及应用[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):22-26.
CHEN Haoyong,WANG Xifan,WANG Xiuli. Design,implementation and application of electricity market auction a Java-based platform for experiments[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(17):22-26.
- [7] 王玉荣,魏萍,李庆昌,等. 电力市场仿真和培训系统的设计及实现[J]. 电力系统自动化,2007,31(12):96-99,104.
WANG Yurong,WEI Ping,LI Qingchang,et al. Design and implementation of power market simulation and training system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(12):96-99,104.
- [8] 陈皓勇,华栋,颜汉荣,等. 适用于不同电力市场行为的电力市场仿真器[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):99-108.
CHEN Haoyong,HUA Dong,NGAN H W,et al. Electricity market simulator:adaptive for studies on different market behavior[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):99-108.
- [9] DAVIS D D,HOLT C A. Experimental economics[M]. Princeton: Princeton University Press,1993:1-66.
- [10] KAGEL J H,ROTH A E. The handbook of experimental economics[M]. Princeton:Princeton University Press,1995:349-443.
- [11] RASSENTI S J,SMITH V L,WILSON B J. Using experiments to inform the privatization/deregulation movement in electricity[J]. Cato Journal,2002,21(3):515-544.
- [12] SMITH V L,RASSENTI S J,WILSON B J. California: energy crisis or market design crisis[R]. Washington D.C.,USA:George Mason University,2001.
- [13] 邹斌,李庆华,言茂松. 电力拍卖市场的智能代理模拟模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):7-11.
ZOU Bin,LI Qinghua,YAN Maosong. An agent-based simulation model on pool-based electricity market using locational marginal price[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(15):7-11.
- [14] 杨彦,张尧,陈皓勇,等. 电力市场智能模拟中代理决策模块的实现[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-5.
YANG Yan,ZHANG Yao,CHEN Haoyong,et al. Realization of decision-making module in agent-based simulation of power markets[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-5.
- [15] 李韩房,谭忠富,栾凤奎. 区域电力市场影响因素分析及市场绩效评估模型[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):31-35.
LI Hanfang,TAN Zhongfu,LUAN Fengkui. Regional electricity market factors and market performance evaluation model[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):31-35.
- [16] 张显,王锡凡,陈皓勇,等. 电力市场中的双边合同[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):77-86.
ZHANG Xian,WANG Xifan,CHEN Haoyong,et al. Survey of bilateral contracts in power market[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(11):77-86.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

陈皓勇(1975-),男,湖南华容人,教授,博士,从事电力市场、电力系统优化规划与运行、人工智能在电力系统的运用等方面的研究(E-mail:eehychen@scut.edu.cn);

谭科(1984-),男,湖南衡山人,博士研究生,从事电力市场、电力系统优化规划与运行(E-mail:tanke0614@gmail.com)。

Integrated power market simulation system: system design and experimental method

CHEN Haoyong,TAN Ke,JING Zhaoxia,HUA Dong,WANG Yeping
(South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: The general and specific characteristics of power market research are analyzed and an integrated simulation system based on experimental economics and agent-based computational economics is designed. A hybrid experimental method of experimenter and agent is proposed, and different power market models are configured under three experimental approaches to carry out the simulative experiments. The system applies a hybrid mode of B/S and C/S with three layers: Client program/Web browser, application server and database server, which has a robust architecture of data communication and simulation interaction. There are three roles with clear user interfaces: administrator, trainer and trainee, and the experimental process is strictly controlled. The real power market operation scenario is vividly reproduced by the flexible setting of experimental parameters and the visual experimental results. A regional power system is taken as an example to verify the feasibility and validity of the proposed simulation system.

This work is supported by the New Century Excellent Talents in University(NCET080207) and the Key Project of the Ministry of Education of China(109128).

Key words: power market; experimental economics; agent-based computational economics; integrated simulation system; simulation experiment