

电力市场仿真平台的评述

黄 杰^{1,2}, 薛禹胜^{2,1}, 文福拴³, 许剑冰², 薛 峰², 董朝阳⁴

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 4. 香港理工大学电机工程学系, 香港)

摘要: 考虑能源、资金及信息流动等多种因素的电力系统与电力市场交互仿真要求,提出电力市场综合仿真平台的研究思路,强调实验经济学观点,指出综合仿真平台应支持多领域、多系统、多参与者的动态交互仿真,并提供在线风险量化分析及辅助决策功能,其架构必须灵活、开放,以适应不同应用环境。将综合仿真平台的功能归纳为信息获取、知识提取及决策支持 3 个要素,并从这 3 个方面阐述了电力市场综合仿真平台的应用目的和功能需求,分析其相关技术和研究现状。

关键词: 电力生产; 物理与经济系统的交互; 多方博弈; 实验经济学; 多时间尺度; 动态仿真; 风险预警

0 引言

电力系统是最复杂的人造系统之一,而以其为物理载体的电力市场则比其他商品市场更为复杂。文献[1]详细探讨了电力市场的特点,以及经济稳定性与物理稳定性的关系。电能的发、输、用过程离不开能源流、资金流及信息流。热、静态,动态和暂态等物理稳定约束可能使输电能力不能支持最经济的电力交易,从而降低市场效率。在电力市场领域中,习惯将电力系统热稳定越限的影响称为阻塞,反映物理与经济问题的耦合。

还有许多尚未得到足够重视的因素同样会使能源流不通畅,例如一次能源不足、排放越限、竞争不充分、资金不足、基本设施缺陷、技术支撑滞后、管理失误等。它们不但影响电力供应的可靠性和质量,并会通过减小(或放大)那些受阻的(或不受阻的)参与者的市场力,影响电力市场的效率和稳定性。文献[2]将直接影响或通过资金流及信息流间接影响能源流最优配置的情况统称为广义阻塞,它们是电力市场与其他相关领域交互的主要渠道之一。

与一般商品市场类似,电力市场是为了有效配置资源。然而,除了电力市场固有的特点外,全球范围的能源危机、生态环境的恶化、大规模可再生能源的介入、外部灾害的多样化等都是新形势下电力市场无法回避的新挑战。它们按各自的机理引发不同

的广义阻塞,降低市场效率,甚至破坏电力系统或电力市场的稳定性。

研究电力市场的方法可分为 3 类,即优化、博弈均衡和仿真方法^[3]。优化类方法一般只能有效处理单目标问题;博弈均衡类方法为了获得解析式,必须采用很强的假设(例如完全竞争及完全信息);仿真类方法可以处理复杂的数学模型,研究模型及参数对系统特性的影响,但仍然难以真实反映参与者的博弈行为。在实验经济学^[4]成功地在仿真中计及主观博弈后,仿真方法在电力市场研究中脱颖而出并推动了电力市场仿真平台的研发。文献[5]从仿真目的、模型及仿真时步的视角讨论了软件平台;文献[6]则从计算机技术出发,比较了基于 CORBA 和代理技术、基于 Java Platform,以及基于高层体系结构(HLA)的电力市场仿真平台。

本文在提炼一般仿真平台的要素的基础上,结合电力工业的发展趋势,在广义阻塞的框架下,探讨电力市场仿真平台的功能需求和研究方向。

1 一般仿真平台的回顾

仿真平台在很多科学领域都有广泛应用,涉及科学计算、现象揭示、产品设计、方案评估、沙盘推演、虚拟实境、多人博弈等。可将仿真平台的功能要素归纳为信息获取、知识提取和决策支持。

1)信息获取。静态(或动态)仿真平台根据给定的模型、参数、场景及外部交互性输入信息进行仿真,从而获得该模型在特定(或一系列)时间断面上的信息。输入信息决定了目标问题的数学描述的充分性、准确性与确定性,而外部交互信息反映了仿真过程的非自治性。而由仿真算法及软件求解数学模

收稿日期: 2011-02-28。
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217905); 国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B05); 国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]98, SG10013)。

型所获得的信息则反映了该模型的静态(或在给定场景下的动态)特性。显然,信息可靠性是“知识提取”和“决策支持”的基础。

文献[7]介绍了涉及跨领域知识的复杂产品(如航天器)的设计仿真平台,需要协调不同领域的仿真软件。虚拟现实仿真平台要根据人与计算机的交互来建立虚拟环境^[8]。博弈互动仿真平台则要处理多方博弈产生的各种难以预见的结果。

2)知识提取。从仿真结果中提取能反映目标系统特性及指导决策的知识,包括均衡特性及动态特性。定性分析虽然直观,却难以比较不同算例的效果。定量分析是机理分析和决策优化的重要前提,为此必须定义严格反映目标特性的量化指标,并保证其全局单调、连续、可微,以支持灵敏度分析。

3)决策支持。实际决策问题往往具有跨领域的多目标,而控制手段则往往需在时-空-控制对象中综合协调。若知识提取环节仅提供定性知识,就只能通过反复试探来支持决策,难以优化决策。若能掌握定量知识,就可用灵敏度分析来快速优化决策。

2 电力市场仿真的应用目的

1)事件反演。文献[9]通过仿真再现了加州电力危机的动态过程,分析可用发电容量、投资、长期合同、用户侧电价及阻塞等因素影响电力危机的机理;引入电力市场稳定裕度和稳定域的概念,以优化控制量;比较了预防、紧急和协调控制的效果,加深对教训的反思。

2)机理分析。文献[10]研究了发电容量充裕度长期振荡的机理,揭示了电厂建设时滞、政策激励及投资博弈等因素对振荡周期及幅度的影响。

3)决策优化。电力市场中的大量不确定性因素,突出了通过仿真提供决策支持的重要性。大量文献针对发电侧博弈问题,通过预测电价及模拟对手的博弈行为,优化自己的交易策略^[11-12]。相应的仿真平台有 PowerWeb^[13], SEPIA^[14], MASCEM^[15]。这些平台仅支持指定短时段的仿真,对每日的电力市场运行进行简单的重复仿真。

对发、输电扩容的决策支持必须处理更多随机因素,并采用动态仿真,其时间步长可设置为以月为单位。文献[16]提出的电力市场复杂适应系统(EMCAS)支持多个时段的仿真,包括简单的长期发电投资;文献[17]给出了20~50年的长期规划仿真模型,以年为步长计算平均电价,考察一次能源价格及碳税对发电规划的影响;文献[18]通过仿真算例反映政府扶持力度对风电投资的影响。

4)体制评估。文献[19]根据美国联邦能源管理

委员会(FERC)建议的电力市场原型^[20]搭建了仿真平台,观察该市场体制在不同的策略报价、容量持留或阻塞型市场力下的特性。文献[21]利用仿真工具来优化电力市场的设计,通过各种假想扰动来校验其鲁棒性。

5)教育培训。用仿真平台模拟电力市场;受训人员通过与其交互,了解市场规则,积累市场经验^[22-24]。

各类应用的要求各有侧重。“事件反演”要求在重现动态过程的基础上加深对物理稳定性与经济稳定性交互影响的认识;“机理分析”着重市场复杂动态行为的剖析;“决策优化”从利益相关者的立场出发搜索最优决策;“体制评估”则从政策层面评估不同的监管方案;“教育培训”要求在提供反复模拟操作环境的同时提供启发、评估与指导。它们从不同的视角出发,收集所需信息并组织仿真;从仿真结果中提取所需的定性及定量的知识;根据其控制目标提供决策支持。

要求一个仿真平台成为万能并不现实,但它应该尽量灵活与开放。为此,需从不同应用中提炼出共同的功能要素,同时充分考虑扩展的灵活性以适应各种特殊要求。

3 电力市场仿真平台的功能需求

根据电力工业的特点,按照信息获取、知识提取、决策支持这3个要素探讨电力市场仿真平台的功能需求。电力市场仿真平台的功能模块见图1。

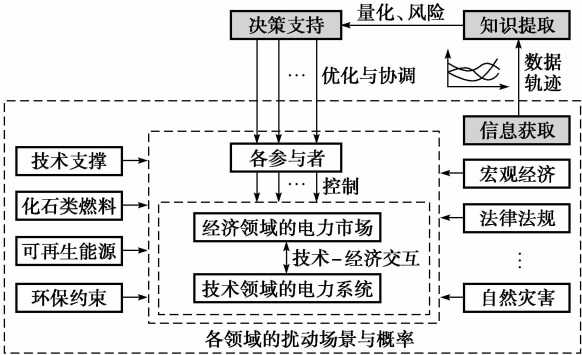


图1 电力市场仿真平台的功能模块
Fig.1 Function modules of a power market simulation platform

3.1 信息获取

电能的发、输、用过程含有能源流、资金流、信息流,及排放流。其静态与动态特性受许多因素影响,例如一次能源价格、需求侧管理、设备检修、各种运行约束、环境约束、排放权价格、市场博弈、监管约束、运行规划、发电规划和输电规划等。这些因素都

可能随时间而变,且具有不同的时间尺度。它们都会在不同范围和不同程度上影响竞争水平和市场效率,文献[2]建议将这些影响统称为广义阻塞。监管的目的是避免市场力被滥用,并保障社会福利。但监管不当也会降低市场效率,甚至危及市场稳定性或社会稳定性,故应该视做一种广义阻塞。这些广义阻塞通过不同机理影响市场竞争程度,但到目前为止只有输电静态阻塞方面的研究比较深入。

广义阻塞是不同领域间交互的途径。市场参与者通过各种广义阻塞来损害(或提高)市场效率的能力其实都是市场力,而广义市场力则反映参与者对社会福利的影响能力。由于电能输送与电力交易的特殊性,经济领域中常用的动态模型一般不能直接应用。必须重新定义状态变量,建立合理的数学模型,正确地反映利润积累、投资行为、可用发电容量和可用输电容量的动态变化^[1]。

电力市场仿真涉及不同领域的计算模块,包括:技术领域的负荷预测、潮流计算、稳定计算等;经济领域的宏观预测、成本核算、利润积累等;市场领域的博弈、均衡等;环境领域的排放量核算、排放权交易等。由于广义阻塞的客观存在,仿真平台必须整合这些被长期割裂的跨领域模型,后者通过数据流和控制流交互。此外,由于存在差别极大的时间尺度,需要合理设计跨领域的多时间尺度的交互仿真协调方法。

电力市场由不同角色的众多参与者组成。他们根据跨领域仿真过程中不断产生的信息来了解电力市场的运营状态,揣测对手的行为,衡量自身的市场力,预测未来走势并选择符合自身利益的决策。参与者的主观行为不仅个体差异大,对仿真输出的中间信息敏感,且往往不符合经济学中关于“理性经济人”的假设,常规数学方法很难模拟其博弈行为。实验经济学方法将参与者的决策作为时变因素加入仿真,仿真平台必须能够予以实时处理。因此,在设计平台时各种数据和信息的开放性和接口的标准化十分重要。

3.2 知识提取

从仿真结果中提取知识是颇具挑战性的任务,特别是关于量化和风险的知识。

1)量化分析,包括各种广义阻塞的程度及对应的安全稳定域。目前电力系统物理稳定性分析已经从定性分析发展为定量分析^[25],其思路值得在电力市场动力学系统分析中借鉴。

2)风险分析。广义阻塞导致的停电威胁取决于具体工况、扰动,以及参与者的博弈等众多因素,是具有随机特征的问题,需要采用风险管理技术。

3)机理分析。以发电阻塞为例,由于发电扩容投资大、建设周期长、投资风险高,故适当水平的长期充裕度对协调供电可靠性与运营经济性而言非常重要。不当的扩容或退役都会引起市场振荡甚至崩溃。

3.3 决策支持

在有关市场力控制的研究中,一般都取消费者盈余和生产者盈余之和为社会福利,并作为控制目标。文献[2]指出还应在监管目标中加入物理、经济、环境等领域的各种广义阻塞风险,以计及节能减排和环境友好的社会贡献。例如:输电动态阻塞管理就是典型的物理-经济双目标优化问题;节能减排调度则是在化石能源的耗量、温室气体的排放量,以及购电成本间的多目标决策。

上述多目标优化问题一般可以采用2种方式处理:①将各领域的目标函数加权取和,作为折中目标函数;②通过风险概念,将各领域的目标函数分别转换为货币量纲,再取其和作为单目标规划的目标函数。从本质上看,前者只能靠主观偏好来确定权值,没有理论基础;后者则是以事件概率为隐含权值。

在防御电力系统在物理扰动下失去稳定的研究领域,已广泛采用由预防、紧急和校正控制组成的三道防线。文献[26-28]强调各道防线内的优化,并提出不同防线的时空协调解决方案。在电力经济领域,电力市场稳定性控制手段分布在发电侧、输电侧和需求侧,而控制时机则可以在扰动前、中、后,其控制特性和代价互不相同。文献[9]建议借鉴电力系统中的成熟概念,构建电力市场的三道防线。

4 电力市场仿真方法

4.1 计算经济学

计算经济学泛指所有借助仿真计算来研究经济学的方法,涉及范围很广^[29]。在电力市场研究中,初期仅针对宏观经济学和统计学,后来进入微观经济学范畴。常用的研究手段为:

1)基于博弈论的传统方法,通过完备的数学推演来研究电力市场中的博弈均衡。由于需要诸如完全信息和完全理性等很强的假设,而不能真实表达实际的竞争行为,也难以求解多方博弈。演化博弈论是把博弈理论分析和动态演化过程分析结合起来的一种理论,在电力市场中也有研究^[30]。

文献[31]介绍了一个描述迭代报价的古诺博弈模型,发电公司基于上次交易结果调整申报的发电量,直至达到均衡状态。文献[32]使用供应函数均衡仿真模型来分析市场力问题。文献[33]对日前市场进行反复仿真以辨识市场博弈均衡模式。文献

[34]介绍的长期电力市场仿真器包含 2 层博弈,即短期发电报价博弈和长期发电投资博弈。

2) 基于多代理的方法,通过交互作用的计算机代理,将经济活动描述为动态系统仿真^[35]。其核心是赋予计算机代理有一定自适应能力的算法^[36],这在一定程度上解决了多市场主体互动的均衡问题。但目前的智能算法远远不能真实反映人类的博弈行为,也难以反映价格波动及价格尖峰等动态特性。文献[37]回顾了基于代理的计算经济学方法,探讨了其基本模型、学习算法、市场规则、市场参与者的仿真;文献[36]按所采用的学习算法,比较了各种电力市场的多代理模型。

4.2 实验经济学

人的主观行为对环境敏感,个体差异大,要建立实用的数学模型或计算机代理都非常困难。实验经济学为研究涉及人的决策行为的经济问题提供了方法论^[4]。若将电力市场中能用数学模型表达的那些环节构成实验环境,将市场参与者的具体博弈作为实验环境的外部输入,则人的主观行为就可与反映客观规律和市场规则的模型互动仿真。这样,就可以根据仿真结果探究在一定社会环境中支配人的经济行为的内在规律。最早的尝试是组织电力市场报价策略的简单实验^[38],然后逐渐发展为在仿真平台上实验^[13,39-40]。

4.3 方法的互补性

博弈论需要实证,而实验经济学的结果也需要博弈论的解释,两者的互补性很强。可以用博弈论实现计算机智能代理,以代替实验研究中较次要的参与者。这样可以减少真实参与者的数目,提高仿真效率。

5 研究现状

5.1 关于信息的获取

5.1.1 多尺度动态信息

仿真平台除了处理一般仿真程序都需要的数学模型、背景数据、场景数据、仿真和分析结果外,在整个仿真时段内还需要实时处理这些多时间尺度数据的随机及不确定性变化,支持不同领域的程序之间的交互,支持与多角色多参与者的动态博弈。

静态仿真平台只支持对电力市场在确定时刻或平稳过程中的报价策略、博弈均衡、市场力等的静态研究^[41-42]。若要研究电力市场长期动态(例如长期投资及充裕性),仿真平台必须能够支持动态模型的仿真及系统动力学研究。文献[17]介绍了系统动力学在电力工业政策研究中的应用。文献[43]描述了发电投资的动态行为,评估不同因素对于年平均电

价的长期影响。文献[44]所建立的电力市场动力学模型包括了电力需求、发电投资、电力生产、结算、市场成员、监管者等模块,其中考虑了容量持留、长期合同、需求弹性等因素;该项研究还开发了仿真平台,辅助电力工业的政策设计和规划决策。

5.1.2 跨领域信息

技术领域的电力系统仿真和经济领域的电力市场仿真一直被割裂,而技术-经济的交互仅限于电力交易后的潮流分析^[45]及输电静态阻塞管理。在动态安全阻塞及其管理,以及电力市场风险和电力系统稳定性的交互影响方面鲜有报道。

目前对电力工业外部因素的考虑集中在以减排为目标的排放交易体系,还未见同时考虑多种广义阻塞的报道。文献[46]将年排放权总量平均分摊到每日并以日为步长,采用多代理仿真理性的发电公司通过排放权交易达到平衡;发电公司参考排放权市场价格,以决定采取挪用(或积存到)下时段的排放权,还是直接购买(或出售)排放权。文献[47]则是按年负荷率将排放权分摊到每日,以周为步长进行平衡,并考虑了发电公司更多的策略行为。然而,交易周期的硬性设定不能正确反映排放交易体系关于总量约束的本质,会造成排放权价格随短期不确定性因素而不必要地剧烈波动。

仿真平台除了需要真实反映各相关领域的系统特性外,还应提供灵活而标准的接口,提高容纳更多潜在领域介入的开放性及友好程度。

5.1.3 参与者的行为信息及其计算机代理

以往的电力市场仿真平台采用博弈论^[11]、智能算法(如遗传算法、进化规划、粒子群算法)^[48],或强化学习算法(如 Erev Roth 算法和 Q-learning 算法)^[36]来模拟人的行为。随着实验经济学的兴起,开始允许真实的实验人与数学模型进行互动仿真,参与博弈^[13,39-40]。到目前为止,实验研究仍局限于平稳环境中的交易,有待扩展到长期动态博弈。

5.2 关于知识的提取

5.2.1 量化分析

一个研究领域的量化分析水平在相当程度上反映了该项研究的成熟度;严格的量化指标则是优化决策的重要基础。目前,电力市场定量分析的成果局限于静态范畴,包括分析市场力的 HHI (Herfindahl-Hirschman Index), PSI (Pivotal Supplier Index), RSI (Residual Supplier Index) 和发电容量充裕度等指标^[49]。

关于电力市场仿真平台 LREMS^[34], EMCAS^[16], NEMSIM^[50], MASCEM^[15] 及 AMES^[19] 方面的文献,则分别介绍了它们的建模、

仿真,及对仿真结果的直接展示能力,但很少探讨从仿真结果中提取知识的方法。

5.2.2 动态分析

稳定性是动态系统最基本的品质,研究时变非线性动力系统的稳定性离不开数值仿真。但从仿真所得的时间响应曲线中提取严格的定性和定量知识却不是容易的事,使用者一般只能凭经验来解读仿真结果。轨迹保稳降维理论解决了这个难题^[51];据此而建立的扩展等面积法在电力系统物理稳定性量化分析中已经得到广泛的工业应用^[25]。

目前对电力市场的仿真分析主要针对特定的时间断面或平稳过程,而基于博弈均衡的研究则着重于对均衡点的静态分析。关于经济稳定性,特别是动态稳定性的研究工作尚不多见,并停留在定性描述。文献[9]选取了电网公司利润积累的良性程度来反映电力市场的经济动态稳定性,并给出了计算电力市场长期稳定域的方法。

5.2.3 随机分析

电力市场涉及大量不确定性及随机因素,然而每次动态仿真却只能针对一个确定的场景。解决这个矛盾的一种方法是采用2层计算框架:下层用确定性方法对指定场景进行仿真;上层则按概率概念或风险概念来高效地选择场景,并综合下层分析的结果,评估随机因素的影响。例如:负荷、降水、机组可用率、发电公司报价策略等大量不确定性及随机因素都会引起电价波动。可以采用基于蒙特卡洛仿真的风险价值(Value at Risk, VaR)计算^[52-53]来分析。

文献[54]比较了确定性分析、概率分析及风险分析方法,指出只有基于风险的方法才能有效地协调经济性与稳定性。

5.3 关于决策的支持

5.3.1 决策目标

发电公司在按利润最大化进行报价的同时,还必须优化长期投资决策,并考虑物理约束和排放市场。这是个复杂的多目标决策问题。但当前的研究多局限于发电收益最大化的单目标问题^[23,41]。文献[46-47]将排放成本作为发电成本的一部分,统一为售电收益的单目标问题。

电力系统可靠性和经济性的协调,要求在保证系统可靠性的前提下使购电成本最小。输电阻塞管理是输电可靠性管理在电力市场环境下的延伸,包括静态输电阻塞和动态输电阻塞^[55]。

当前的仿真平台可以支持静态阻塞管理,例如在静态安全约束下优化潮流^[45]。文献[56]提出电力市场与电力系统动态交互仿真的框架,通过定义

风险控制代价,将输电稳定性对市场交易的影响转化为风险责任者的上网成本。据此,文献[57]通过预交易迭代来管理输电动态阻塞。

5.3.2 决策手段

发电公司为了保证自身良性运营的前提下得到最大利润,需要优化多市场报价、检修、投资等决策,其中必然尽量利用其市场力。电力市场运营机构为保证经济可靠供电,需要不断优化电力系统及电力市场的预防-紧急-校正控制决策。监管部门需要通过市场机制及价格上限等措施,来优化对市场力的控制,并保障社会福利。为了协调处理实际存在的多种广义阻塞,仿真平台必须提供灵活开放的接口,以支持多角色、多参与者的动态交互。

5.4 关于平台实现技术

5.4.1 软件实现

电力市场仿真的应用软件一般以解决市场优化和博弈均衡的计算为主,而人机交互和软件开放性则尚未提上日程。一般选择适合科学运算的编程语言,如 MATLAB 来实现仿真平台^[34,58]。可以预期,一旦电力市场仿真进入实用化阶段,关于平台架构的探讨和设计就会引起更多的关注。

随着功能需求和计算机技术的发展,电力市场仿真的底层支持软件逐渐从函数式编程语言,面向对象的编程语言,发展到应用商业软件技术平台,例如 Java 2 Platform^[40]和 .Net Framework^[59-60]。

多代理建模可以在多代理辅助建模软件平台^[61]上实现,而无需重新开发多代理框架。目前应用较多的多代理建模平台包括 OAA^[15], RepastJ^[45], JATLite^[62]和 JADE^[63-64]。

为了整合仿真平台与已有的仿真资源,并实现分布式交互仿真,已有文献研究异构仿真系统的重复利用和互操作问题。HLA 就是这样一种高层体系结构;文献[65]用 HLA 建立了电力市场的一个原型仿真系统。

5.4.2 硬件实现

仿真平台的硬件实现一般以配合软件实现和提升仿真速度为目的。对多代理仿真平台而言,由于仿真过程无需人的参与,且计算密集度不高,单台普通 PC 即可满足硬件需求。对于采用商业技术平台的仿真平台,多以 C/S(客户端/服务器),B/S(浏览器/服务器)或其混合形式的架构出现。文献[40]提出的电力市场竞价仿真平台采用基于 Internet 技术构建的3层 B/S 架构,除需配备应用服务器、数据库服务器之外,还需为管理员、教练员、报价员和交易员提供配备 Web 浏览器的硬件设备。文献[22]提出的电力市场仿真和培训系统包含了教员台和学

员台 2 个体系,教员台采用 C/S 结构,而学员台采用 B/S 架构,此外还需配备服务于仿真的数据库服务器,所有设备采用以太网连接。

随着富互联网应用(RIA)技术的快速发展,B/S 架构在界面复杂性上的缺陷已逐步被克服,诸如 Flex/Flash 技术^[66]已经可以支持在浏览器内运行带有复杂图形的人机交互应用。因此,在开展电力市场仿真平台的硬件架构设计时,采用 RIA 的 B/S 架构是较好的选择。由于仿真计算密集度的进一步增强,可配置多台服务器,采用并行、网格、云计算等大规模计算框架提高运算速度。为保证多角色多参与者与仿真进程的动态交互,还需配备相应数目的 PC 终端,以保证仿真参与的客观需求。

6 结语

现有的电力仿真平台不支持电力系统和电力市场的联合仿真,没有考虑电力市场的动态行为,也不涉及一次能源、环境和宏观政策的影响。本文从信息获取、知识提取和辅助决策这 3 方面评述了仿真平台的现状,讨论了新形势下应用功能对软硬件架构的要求。后者包括:物理系统快动态与经济系统慢动态在多时间尺度上的交互;市场参与者不确定的动态博弈;从仿真结果中提取定量知识;多目标协调控制的仿真支持;不确定性因素的处理。特别强调:需要按照实验经济学观点来构建跨领域交互仿真平台;以灵活开放的软硬件架构来支持参与者在多时间尺度上与各领域数学模型的交互,并从时间响应中提取深层知识,以风险观点来处理不确定因素并辅助决策。

参 考 文 献

- [1] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6; 2002, 26(22): 1-4.
XUE Yusheng. Interactions between power market stability and power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6; 2002, 26(22): 1-4.
- [2] 薛禹胜, 李天然, 尹霞, 等. 广义阻塞及市场力的研究框架[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 1-10.
XUE Yusheng, LI Tianran, YIN Xia, et al. A research framework for generalized congestions and market power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 1-10.
- [3] VENTOSA M, BAILLO A, RAMOS A, et al. Electricity market modeling trends[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 897-913.
- [4] SMITH V. Experimental methods in economics[M]// The New Palgrave: a dictionary of economics. New York, NY, USA: The Stockton Press, 1987.
- [5] MADRIGAL M, FLORES M. Integrated software platform to teach different electricity spot market architectures[J]. IEEE

- Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 88-95.
- [6] 曾亮, 齐欢, 王小平, 等. 电力市场仿真平台综述[J]. 继电器, 2006, 34(18): 72-78.
ZENG Liang, QI Huan, WANG Xiaoping, et al. Review of the simulating platform of electricity market[J]. Relay, 2006, 34(18): 72-78.
- [7] 范文慧, 肖田元. 复杂产品协同设计、仿真、优化一体化平台[J]. 科技导报, 2007, 25(4): 15-24.
FAN Wenhui, XIAO Tianyuan. Collaboration integrated platform of design, simulation and optimization for complex products[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(4): 15-24.
- [8] Virtual reality[EB/OL]. [2011-02-01]. http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality.
- [9] 薛禹胜, 徐群, 辛耀中, 等. 加州电力危机的动态仿真和防御对策分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 24-29; 2004, 28(8): 23-26.
XUE Yusheng, XU Qun, XIN Yaozhong, et al. Dynamic simulation and countermeasure analyses of California power crisis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 24-29; 2004, 28(8): 23-26.
- [10] 彭慧敏, 薛禹胜, 朱寰, 等. 发电容量长期动态的仿真[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 7-13.
PENG Huimin, XUE Yusheng, ZHU Huan, et al. Generation capacity long-term dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 7-13.
- [11] PRACA I, RAMOS C, VALE Z A. Competitive electricity markets: simulation to improve decision making[C]// 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, September 10-13, 2001, Porto, Portugal: 1-6.
- [12] CHANDARASUPSANG T, GALLOWAY S, BURT G, et al. Bidding behavior and electricity market simulation[J]. European Trans on Electrical Power, 2007, 17(4): 333-346.
- [13] ZIMMERMAN R D, THOMAS R J. PowerWeb: a tool for evaluating economic and reliability impacts of electric power market designs[C]// Proceedings of Power Systems Conference and Exposition, October 10-13, 2004, New York, NY, USA: 1562-1567.
- [14] SAMAD T, HARP S A. SEPIA 1[R]. Phoenix, USA: Honeywell Technology Center, 1996.
- [15] PRACA I, RAMOS C, VALE Z, et al. MASCEM: a multiagent system that simulates competitive electricity markets[J]. IEEE Intelligent Systems, 2003, 18(6): 54-60.
- [16] NORTH M, CONZELMANN G, KORITAROV V, et al. E-laboratories: agent-based modeling of electricity markets [C]// Proceedings of the 2002 American Power Conference, April 15-17, 2002, Chicago, IL, USA.
- [17] QUDRA-ULLAH H. MDESRAp: a model for understanding the dynamics of electricity supply, resources and pollution[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2005, 23(1): 1-14.
- [18] SENSFUSS F, RAGWITZ M, GENOESE M. Simulating the expansion of renewable electricity generation in Germany—an agent-based approach[C]// Proceedings of the 29th IAAE

- International Conference, June 7-10, 2006, Potsdam, Germany: 1-12.
- [19] SUN J, TESFATSION L. An agent-based computational laboratory for wholesale power market design[C]// Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 1-6.
- [20] FERC. Notice of white paper[R]. USA: U.S. Federal Energy Regulatory Commission, 2003.
- [21] CHAO H P, ENTRIKEN R. Simulation as a tool for market design[C]// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 21-24, 2006, Dallas, TX, USA: 1354-1358.
- [22] 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.
- 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.
- [23] BEMAL-AGUSTIN J L, CONTRERAS J, MARTIN-FLORES R. Realistic electricity market simulator for energy and economic studies[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(1): 46-54.
- [24] MEEUS L, PURCHALA K, BELMANS R. Power system economics lab: European energy trading platform[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society, November 27-December 1, 2004, Clearwater Beach, FL, USA: 1-6.
- [25] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [26] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
- XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [27] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (二) 广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
- XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [28] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (三) 各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-10.
- XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part III optimization and coordination of defense lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.
- [29] HANS M A. What is computational economics[J]. Computational Economics, 1997, 10(2): 103-105.
- [30] 高洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 18-21.
- GAO Jie, SHENG Zhaohan. Elementary groping for evolutionary game theory and its application in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 18-21.
- [31] OTERO-NOVAS I, MESEGUER C, BATLLE C, et al. A simulation model for a competitive generation market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 250-256.
- [32] DAY C, BUNN D. Divestiture of generation assets in the electricity pool of England and Wales: a computational approach to analyzing market power[J]. Journal of Regulatory Economics, 2001, 19(2): 123-141.
- [33] TORRE S D L, CONEJO A J, CONTRERAS J. Simulating oligopolistic pool-based electricity markets: a multiperiod approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1547-1555.
- [34] MIGLIAVACCA G, BENINI M, GALLANTI M, et al. LREMS: a long term electricity market simulator based on game theory[C]// Proceedings of IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 1333-1340.
- [35] TESFATSION L, JUDD K L. Handbook of computational economics: Volume II agent-based computational economics [M]. Amsterdam, the Netherlands: North-Holland, 2006.
- [36] WEIDLICH A, VEIT D. A critical survey of agent-based wholesale electricity market models[J]. Energy Economics, 2008, 30(4): 1728-1759.
- [37] 袁家海, 丁伟, 胡兆光. 基于 Agent 的计算经济学及其在电力市场理论中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 47-51.
- YUAN Jiahai, DING Wei, HU Zhaoguang. A critical study of agent based computational economics and its application in research of electricity market theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 47-51.
- [38] DINGLEY C E, MCDANIEL T. Classroom simulation of an electricity market[C]// Proceedings of 2002 IEEE 6th African Conference in Africa: Vol 2, October 2-4, 2002, George, South Africa. Piscataway, NJ, USA: 881-886.
- [39] 陈皓勇, 付超. 统一价格和 PAB 竞价的实验分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 12-17.
- CHEN Haoyong, FU Chao. Experimental analysis of uniform price and PAB auctions in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 12-17.
- [40] 陈皓勇, 王锡凡, 王秀丽, 等. 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, et al. Design, implementation and application of a Java-based platform for electricity market auction experiments [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 22-26.
- [41] MARTINI A, PELACCHI P, PELLEGRINI L, et al. A simulation tool for short term electricity markets [C]// Proceedings of the 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference, May 20-24, 2001, Sydney, Australia: 112-117.
- [42] CONTRERAS J, CONEJO A J, TORRE S D L, et al. Power engineering lab: electricity market simulator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 223-228.

- [43] BOTTERUD A, KOPAS M, VOGSTAD K O, et al. A dynamic simulation model for long-term analysis of the power market [C]// Proceedings of the 14th Power System Computation Conference, June 24-28, 2002, Sevilla, Spain: 1-7.
- [44] KILANC G P, OR I. A decision support tool for the analysis of pricing, investment and regulatory processes in a decentralized electricity market [J]. Energy Policy, 2008, 36(8): 3036-3044.
- [45] 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.
- [46] WEILDLICH A, VEIT D. Analyzing interrelated markets in the electricity sector: the case of wholesale power trading in Germany[C]// Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-8.
- [47] WANG J, KORITAROV V, KIM J. An agent-based approach to modeling interactions between emission market and electricity market[C]// Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-8.
- [48] GAO F, GUTIERREZ A G, SHEBLE G B. Comparison of artificial life techniques for market simulation[C]// Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, June 4-7, 2006, Kauai, HI, USA: 1-8.
- [49] 刘敦楠,陈雪青,何光宇,等. 电力市场评价指标体系的原理和构建方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 2-8.
LIU Dunnan, CHEN Xueqing, HE Guangyu, et al. General principle and constitution process of evaluating indices system for electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 2-8.
- [50] BATTEN D, GROZEV G. NEMSIM: finding ways to reduce greenhouse gas emissions using multi-agent electricity modeling [M]// Complex science for a complex world: exploring human ecosystems with agents; Chapter 11. Canberra, Australia: ANU Press, 2006.
- [51] 薛峰,薛禹胜. 多刚体受扰轨迹的保稳降维映射[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 11-15.
XUE Feng, XUE Yusheng. Stability-preserving dimensional reductions of multimachine trajectory [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 11-15.
- [52] AMELIN M, SODER L. On Monte Carlo simulation of electricity markets with uncertainties in precipitation and load forecasts[C]// Proceedings of 2001 Power Tech, September 10-13, 2001, Porto, Portugal: 1-6.
- [53] 周浩,张富强. 采用 VaR 历史模拟方法计算电力市场短期金融风险[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 14-18.
ZHOU Hao, ZHANG Fuqiang. Calculation of short-term financial risk in electricity market by VaR historical simulation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 14-18.
- [54] 赖业宁,薛禹胜,王海风. 电力市场稳定性及其风险管理[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 18-24.
LAI Yening, XUE Yusheng, WANG Haifeng. Electricity market stability and its risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 18-24.
- [55] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰,等. 关于输电阻塞及其管理的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 101-107.
PENG Huimin, XUE Yusheng, XU Jianbing, et al. A review of transmission congestion management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 101-107.
- [56] 薛禹胜,彭慧敏, WU Q H. 电力市场与电力系统交互动态仿真设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 14-20.
XUE Yusheng, PENG Huimin, WU Q H. Analysis and simulation of interaction between electricity market and power system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 14-20.
- [57] 薛禹胜,李天然, WU Q H, 等. 通过风险分摊与迭代报价来协调预防控制与紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 13-17.
LI Tianran, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Coordination of preventive control and emergency control by assigning risk cost and iterative bidding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 13-17.
- [58] MEEUS L, MEERSSEMAN T, PURCHALA K, et al. Market coupling simulator [C]// Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 150-156.
- [59] 邵丽琴,管晓宏,高峰. 基于 .Net 平台的电力市场仿真系统的实现[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 60-64.
SHAO Liqin, GUAN Xiaohong, GAO Feng. Implementation of electricity market simulation system on .Net platform[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 60-64.
- [60] HUA D, NGAN H W, WEN Fushuan. Electricity market simulator: adaptive for studies on different market behavior [C]// Proceedings of IEEE Region 10 Conference, October 30-November 2, 2007, Taipei, China: 1-5.
- [61] NIKOLAI C, MADEY G. Tools of the trade: a survey of various agent based modeling platforms[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2008, 12(2).
- [62] LAM Y C, WU F F. Simulating electricity markets with Java [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 31-February 4, 1999, New York, NY, USA: 406-410.
- [63] 刘晓光,刘晓峰,胡彬. 基于多 Agent 的电力市场仿真系统设计[J]. 计算机仿真, 2005, 22(3): 211-213.
LIU Xiaoguang, LIU Xiaofeng, HU Bin. Design of electricity market simulation system based on multi-agent system[J]. Computer Simulation, 2005, 22(3): 211-213.
- [64] OO N W, MIRANDA V. Multi-energy retail market simulation with intelligent agents[C]// Proceedings of 2005 IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, St. Petersburg, Russia: 1-7.
- [65] 张建伟,侯朝桢. 基于高层体系结构的电力市场分布交互仿真[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 8-13.
ZHANG Jianwei, HOU Chaozhen. Electricity market distributed interactive simulation based on high level architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 8-13.

(下转第 35 页 continued on page 35)

[66] Adobe Systems Inc. Adobe Flex SDK[R/OL]. [2010-03-31].
<http://learn.adobe.com/wiki/display/Flex>.

黄 杰(1983—),男,博士研究生,主要研究方向:电力
市场风险管理。E-mail: jacob.jie.huang@gmail.com

薛禹胜(1941—),男,通信作者,博士生导师,中国工程

院院士,名誉院长,主要研究方向:电力系统自动化。
E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

文福拴(1965—),男,特聘教授,博士生导师,主要研究
方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。E-mail:
fushuan.wen@gmail.com

A Review of Power Market Simulation Platform

HUANG Jie^{1,2}, XUE Yusheng^{2,1}, WEN Fushuan³, XU Jianbing², XUE Feng², Zhaoyang DONG⁴

(1. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

3. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The interactive simulation between power market and power system includes energy flow, capital flow and information flow, etc. Taking into consideration of the simulation requirements, research method of power market simulation platform is proposed. It is emphasized that experimental economics should be adopted in a dynamic interactive simulation, and multi-criteria, multi-system and multi-player simulation should be supported. The simulation platform should also be capable of providing on-line risk quantitative analysis and decision support functions. Meanwhile, the software and hardware framework of the platform should be flexible and open, in order to be implemented for different application purposes. Functions of power market simulation platform are classified into three key elements, which are information obtaining, knowledge extraction and decision support. Based on these elements, function requirements of power market simulation platform are discussed and corresponding technologies are reviewed.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905), National Key Technology Research and Development Program (No. 2008BAA13B05) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]98, No. SG10013).

Key words: power generation; interaction between physical and economic systems; multi-player game; experimental economics; multi timescale; dynamic simulation; risk early warning