

电力市场中运行备用的获取和定价机制综述

赵学顺^{1,2},汪震¹,余志伟²,文福拴^{1,3},钟德成²,钟志勇²,黄民翔¹

(1.浙江大学 电气工程学院 电力经济与信息化研究所,浙江 杭州 310027;

2.香港理工大学 电机工程学系,香港; 3.香港大学 电机电子工程学系,香港)

摘要: 运行备用在维持电力系统的安全可靠性、提高系统运行质量、缓解高峰负荷电价等方面具有举足轻重的作用。运行备用的主要获取和定价方法包括: 备用成本评估与分配方法、基于优化调度算法的定价策略、利用机制设计揭示价格的方法等。运行备用容量的需求研究、机会成本和事故停运成本的评估和分析、运行备用市场与能量市场的协调等问题有待于进一步研究。

关键词: 电力市场; 辅助服务; 运行备用; 定价机制; 停运成本

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2004)01-0052-08

Survey on operating reserve procurement and pricing in deregulated electricity market environment

ZHAO Xue-shun^{1,2}, WANG Zhen¹, YU Zhi-wen², WEN Fu-shuan^{1,3},
ZHONG De-cheng², ZHONG Zhi-yong², HUANG Min-xiang¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong;

3. Department of Electrical & Electronics Engineering, the University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract Operating reserve is one of the main ancillary services (AS). It plays an important role in maintaining power system reliability while economically efficient transactions are accommodated in an open electricity market. This paper reviews a series of operating reserve pricing mechanisms under the competitive electricity market environment. The characteristics, pros and cons of procuring and pricing mechanisms based on (i) assessment and allocation of reserve costs, (ii) extension of optimal dispatch, (iii) mechanism design and (iv) balance between economic efficiency and the reliability requirement are investigated. Lastly, the common understanding and the direction of future research on operating reserve in the deregulated electricity market environment, such as requirement determination of operating reserve, evaluation and analysis of opportunity cost and outage cost, coordination of dispatch & schedule in energy and operating reserve markets, and so on are discussed.

Key words electricity market; ancillary services; operating reserve; pricing mechanism; outage cost

电力工业改革能否成功的关键在很大程度上取决于能否保证系统的可靠性。电力系统可靠性不是一个单纯的技术、经济或者政策问题,而是这些问题

的交织。可靠性问题处理不好会直接给系统和市场带来冲击,如预想不到的停电事故和很高的电价波动风险等,甚至对整个社会的稳定造成影响,最显然

收稿日期: 2003-02-22

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2000033530)。

作者简介: 赵学顺(1974-),男,宁夏银川人,博士生,主要研究电力市场和电力经济与信息化技术的应用。

E-mail: eexszhaod@hotmail.com

的例子莫过于加州电力市场的失败^[1]。一般而言,可以通过获取一定量的辅助服务来满足系统的可靠性要求。美国联邦能量调节委员会(FERC)规定了如下一些辅助服务:调度与系统控制、无功支持与电压控制、调节与频率响应、能量不平衡、旋转备用(spinning reserve)、追加备用(supplemental reserve)等,其中后两种备用属于运行备用(operating reserve)。

运行备用作为辅助服务的一种,在维持电力系统的安全可靠性、提高系统运行质量、缓解高峰负荷电价等方面具有举足轻重的作用。在电力市场环境下,运行备用的获取和定价遇到了许多新的挑战。其主要表现为:首先,在电力工业的市场化进程中,发电公司逐渐从电网公司中剥离出来,其是否参与运行备用市场取决于发电公司自身的经营决策目标、机组技术特性以及市场的激励机制,而非系统的强制调度;第二,传统的运行备用获取往往单凭经验,例如按最大期望负荷的比例或者按系统中最大一台机组的装机容量作为系统对备用的需求,难以兼顾系统的可靠性和经济性,而在电力市场中,电能和辅助服务交易主要是在市场上进行,强调利用市场机制——尤其是定价机制来有效地配置备用容量,在保障系统安全可靠运行的前提下,实现经济上的优化;第三,电力工业改革带来了更多的随机因素,过去建立在中央统一调度基础上的确定性模型已不再适应当前市场运营模式和系统决策过程,因此有必要引入随机化模型来描述市场环境下的运行备用定价问题。

在国际上已经运行的电力市场中,不同的国家和地区根据自身的特点采用了不同的辅助服务获取与定价方式。不论采取何种方式获取辅助服务,维护电力系统的安全可靠运行始终是市场化改革得以顺利进行的必要前提,在最近进行的电力改革中更加突出了这一问题^[2~7],这事实上强调了设计一个好的辅助服务获取和定价机制的重要性。

一个好的定价机制应该从全局性的社会福利出发,能够有效地引导市场参与者进行资源的优化配置,降低成本。从某种意义上讲,定价机制不仅是电力市场中参与者各种经济行为的约束条件,还应能够提供一理性稳健的结构以减少不确定性,进而保证市场的稳定运作和交易的顺利进行。

近几年来,运行备用的获取和定价机制是一个相当活跃的研究领域,研究成果散见于各类文献中。所提出和采用的主要获取和定价方法包括:备用成本评估与分摊的方法、基于优化调度算法的定价策

略、利用机制设计揭示价格的方法,以及其他一些兼顾经济性和可靠性的定价策略。本文就这几个方面进行简要综述。

1 备用成本评估和分配的获取与定价方法

备用成本评估和分配的获取与定价方法是一种比较传统的方法,具有简单明了、可操作性强的特点。其大致思路为:首先对运行备用的供给成本和产生的效益进行评估,然后权衡备用成本和期望效益以确定需要多少备用,最后对总的成本进行合理分配,所得到的单位分配成本加上适当的利润后就可作为定价的最终依据。

1.1 成本和效益

(1) 运行备用的供给成本

运行备用的供给成本中应包括电量成本和容量成本两部分。电量成本主要指机组的变动成本,而容量成本包括固定资产成本和机会成本。具体考虑时要视不同情况而定。例如,旋转备用多为在线机组,边际容量成本几乎为零^[8],只有当被调度提供电能时消耗燃料成本;非旋转备用则还要考虑机组的启动成本。

机组容量既可以投入到主电能市场,也可以提交到辅助服务市场;正是这样的选择“机会”决定了发电公司在提交运行备用容量报价时必须充分考虑机会成本,即发电公司选择将容量投到运行备用市场就不得不放弃其在主电能市场上可能获取的收益。机组的机会成本与该机组所带负荷的运行位置有关,通常越是处于边际机组之下的机组容量就具有越高的机会成本,而边际机组或处于边际机组之上的机组容量则没有机会成本。可见,机会成本可以通过计算市场清算电价和机组的边际成本之差而得到^[9],故它与市场清算电价有很大关系。文献[10]提出了根据旋转备用边际机会成本来确定旋转备用电价,在思路上有创新,但该方法属于电价预测的范畴,并不等同于市场意义下的电价。在市场机制下,运行备用的供给成本可以通过发电公司提交的容量报价和电量报价揭示出来^[11, 12]。

(2) 间接效益——事故停运成本

运行备用所带来的效益间接地反映在由于运行备用的投入而降低停运事故所带给用户和发电公司的损失,即停运成本的相应减少。导致停运的因素包括负荷预测偏差、发电设备强迫停用或网络阻塞等。停运成本又可以分为调度调节成本、中断成本和消费者剩余损失三部分。

当出现供电不足或停电事故时,为了使社会福利损失最小,系统运行人员不得不进行紧急调度,重新配置系统中的稀缺电能,包括在发电侧启用高成本的容量,甚至从其他电源点购买昂贵的电力,由此带来的附加成本称为调度调节成本.中断成本是由于停电使用户无法消费到所需要的电量而造成的损失,其与停电持续的时间、用户所处区域以及用户类型等因素有关.消费者剩余损失则是强调事故发生后,即使没有停电,但由于供电紧张而导致市场清算电价升高,致使用户不得不为此支付更多的电费(假设采用了电价联动机制).

降低停运成本相当于为系统带来了效益.电力工业市场化后,系统运行的可靠性与经济性之间的联系更加紧密,对于停运成本的评估就越来越受到广泛重视^[13].大多数评估方法是先对消费者按类型分组,如工业、居民、商业等;然后分别对它们进行实证评估.文献[14]讨论了如何评估配电侧的停运成本,文献[15]则对发电侧的边际停运成本评估问题进行了研究,而文献[16]则提出了一种能够对发电和输电组合系统的停运成本进行分析的方法.文献[8]利用用户的支付意愿(willingness to pay, WTP)来计算停运成本,进而对运行备用进行定价.在实际应用中,通常将用户停运成本与失负荷价值(VOLL)联系起来.该指标一般是通过对用户的调查结果进行分类计算,加权平均得到的.

1.2 成本-效益分析和停运成本分配方法

传统上,确定系统所需的运行备用容量主要是凭经验,这无法合理地兼顾系统的可靠性和经济性.可以采取基于成本-效益分析的容量配置标准^[17]来确定最优运行备用容量(R_c^*).当系统运行备用容量取最优运行备用容量(R_c^*)时,运行备用的供给成本和停运成本之和即总配置成本(TC)最小.为了使 TC 最小化,只要供给成本的增加不超过停运成本的减少,就应该增加系统的备用容量,反之亦然,最后在均衡点处,确定出系统所需的备用容量 R_c^* 和相应的总配置成本 TC .文献[18]用这种方法对亚特兰大电力系统进行了仿真计算与分析.

如何支付发电公司的运行备用费用,涉及到对总配置成本的分配.由于其中的供给成本直接对应于各个发电公司,而不需要分配,问题就简化为如何在所提供的各单位备用容量之间分配停运成本的问题.目前研究停运成本分配的方法并不多,不过可以借鉴一些固定成本的分摊方法^[19].例如考虑按各发电公司所提供的备用容量水平平均支付停运成本费用,或者根据各发电公司实际被调度的电能按某种

比例支付停运成本费用,也可以通过求解成本分摊博弈的核心(core)来实现.

分配后的单位停运成本加上单位供给成本就可以作为支付发电公司的运行备用电价.

1.3 存在的问题

这种方法是集中决策为基础的,没有考虑用户的需求弹性和发电公司针对系统需求可能作出的响应,与竞争的市场机制不太适应.此外,停运成本与可靠性指标之间的关系并不容易建立.在信息不完全的市场环境下,这种基于集中决策的获取与定价方式可能导致低效率,且给发电企业以错误的激励.由于按实际成本定价,停运成本的分配可能导致电力企业生产经营成本居高不下.

2 基于优化调度的定价策略

传统的优化调度模型一般采用确定性指标来计及系统的可靠性约束,如“N-1”、备用百分数以及备用应大于系统最大机组容量等.当然也可以采用概率指标来表示系统的可靠性要求,如失负荷概率(LOLP)等,不过这些指标缺乏经济含义.为此,最近的一些研究工作对传统的优化调度进行了改进和扩展,以期在计及系统的可靠性要求的前提下,为备用容量配置和定价提供明确的经济信号.

2.1 电力市场环境下优化调度模型的扩展

市场环境下,优化调度模型中的目标函数取决于市场规则,如购买成本最小化或社会福利最大化,后者需要用到用户的效益函数(utility function).无论采用何种目标,在模型中都需要计及发电公司的自主决策,这是与传统优化调度的最大区别.此外,对于运行备用定价,还需作一些扩展,以包括可靠性约束.

可靠性约束条件可分为两类:一类为“硬”约束,如系统运行参数约束、可用容量约束等;另一类则为“软”约束,如系统备用要求约束(system reserve requirements, SRR).由于可用容量和系统备用要求在运行备用定价中扮演着重要的角色,下面进行简要的论述.

(1) 可用容量

在电力市场环境中,不应该采用强制方式来获取运行备用的可用容量,而应该在市场机制引导下,由发电公司根据自己的经营决策自愿提供.

发电公司提交到备用市场上的可用容量,不能超过机组最大可用容量扣除其在实时电能市场上已被调度的容量的差,而且还要受限于机组的爬坡速

率(因为其决定在响应时段内所能达到的容量水平)。此外,还要考虑发电公司与系统调度员之间达成的协议,如按最大可用容量的某个比例提交备用容量^[20]。还有,有些电力市场采用了差价合约,发电公司为了规避市场价格波动风险而事先在合约市场上出售了一定比例的合约容量,故在确定备用可用容量时也需要对这部分予以考虑。

(2) 系统备用要求 (SRR)

与机组爬坡速率等“硬”约束不同,系统备用要求约束是“软”约束,可以短期少量越限。该约束从本质上讲具有模糊特性,清晰化处理往往会导致保守结果^[21]。

如何适当确定 SRR 是一个相当重要而困难的问题。直觉地,可以采用试探性的方法,即由高到低依次给定 SRR,计算带该约束的机组组合问题,求出相应的备用边际成本。显然 SRR 越大,成本一般也越高。如此反复试探,就可以找到较合理的期望成本所对应的 SRR。不过,这种方法由于要多次求解机组组合问题,计算成本很高。文献 [22] 提出一种旋转备用需求随着相应价格变化自适应调节的方法。其主要包括三部分:首先,由发电公司提交电能和备用的价格,由系统调度员根据提交的价格来调节 SRR,然后求解机组组合优化问题确定机组的状态与出力水平;随之对电能和备用的价格进行修正。如此反复,可以自适应地收敛到纳什均衡解。

除上述两种最常用的可靠性约束外,有的文献还特别强调了机组自身的可靠性约束^[23]的重要性。因为在市场环境下,机组一旦出现意外事故而强迫停运,可能给系统带来一系列的连锁反应,包括甩负荷,所以承担备用任务的发电公司有责任确保所选中的备用容量在需要的时候能够及时提供电能。这样,发电公司在提交备用容量和电能报价时就需要考虑机组可能出现的强迫停运概率和爽约后将受到的惩罚。总之,考虑机组的可靠性约束,有利于反映提供备用的机组的运行特性,计及可能出现的意外事故。

2.2 定价方法述评

文献 [23] 在优化调度中计及了发电机组的可靠性指标,建立了一个增广拉格朗日对偶函数,采用了递归神经网络进行求解,得到主电能市场和备用市场的价格;该价格权衡了提供备用的成本与不提供备用的风险。文献 [24] 计算了两次最优潮流:一次是基准情况(未采用辅助服务),另一次是采用了辅助服务的情况。这两次计算得到的影子价格之差再经过期权定价公式的处理,就可以得到期望的辅助

服务价格。文献 [25] 和 [26] 均是针对竞争市场中需求侧和供给侧投标的模式来讨论系统的优化调度和可靠性问题。前者的目标函数是使社会效益最大化,据此计算出区域市场清算价格和相应的电能及辅助服务的供需量;后者的目标函数则是使消费者的购买成本最小化,在其所扩展的经济调度模型中考虑了线路容量备用和机组备用对系统节点备用需求的影响。不过,由于供给侧和需求侧的投标曲线并不一定反映供需双方的实际成本和效用,所以,这两种方法得到的解是否为最优解值得商榷。文献 [20] 讨论了能量和运行备用联合调度下的预想事故运行备用的定价问题。文献 [27] 提出了一种在主电能市场和辅助服务市场寻找均衡价格的方法;其假设发电商和零售商都追求自身利益最大化,当市场清算条件得到满足时,可以获得两个市场上各自最优的容量及其均衡价格。不过,这种方法是完全竞争的市场为基础进行的,要求完备的市场信息。

2.3 存在的问题

基于优化调度算法的定价方法,实质上是一种短期边际成本定价方法;其能够提供经济信号,因此与前面的基于成本的定价方法有着本质的不同。但这类方法也有一些不足:

(1) 算法复杂。该方法需要进行最优潮流甚至机组最优组合计算,计算量大,而且计算结果对系统运行条件很敏感,求得的价格波动很大。

(2) 为了保证这种方法能够求得最优解,常常需要作大量的简化假设,其中最重要的一点就是成本已知。但在电力市场环境下,信息是不完全的或不对称的,这样如何衡量真正的边际成本就成了相当困难的问题,下文还会对此作进一步的探讨。

(3) 由于在该方法中,投入运行备用的容量成本并不能在价格中得到完全反映,不能补偿运行备用的全部成本,这会严重影响发电公司参与运行备用市场的积极性。对此,通常不得不求助于一些传统的管制办法来补偿发电公司在边际成本定价中所受的损失,但这会削弱市场机制的效能。

3 利用机制设计揭示价格的方法

电力市场运营机构和发电公司在电力市场中获得的信息是不对称的。发电公司的成本信息是私人信息。除非存在有效的激励机制,否则发电公司不会申报自己的真实成本,而更可能采用策略性投标来增加自己的利润^[28,29]。电力市场不是一个完美竞争的市场,或更确切的说,是寡头垄断市场;发电公司

可能会行使市场力^[30]来牟取高额利润.这些都会给电力市场的运营带来负面效应.从理论上讲,可以利用机制设计 (mechanism design) 来削弱这些问题.

通过良好的机制设计,并配合必要的监管措施,以激励发电公司自愿揭示其真实成本,从而为定价提供必要条件,这就是下述的利用机制设计揭示价格方法的基本出发点.

3.1 利用机制设计揭示真实成本

机制设计,就是指通过设计有效的市场规则来诱导市场参与者按监管机构所期望的目标参与市场的活动.好的机制设计至少要满足以下两个约束:一是个人理性约束 (individual rationality),指在均衡点处,参与者申报真实信息将不会带来损失,这样才愿意讲真话;二是激励相容约束 (incentive compatibility),即按监管机构所设计的激励方案,在其他人都申报真实成本的前提下,自己也申报真实成本时获利最大.监管机构不能直接干预参与者的行为,而只能通过对激励性报酬的选择来影响这一行为.

在电力市场环境下,监管机构虽然不能观察到发电公司具体的经营活动,但可以根据发电公司提交的报价等一些能够部分地反映其生产情况的数据,来设计出一套有效的机制,以激励发电公司提供系统所需的运行备用并揭示其真实成本.文献 [31] 设计了一种支付发电公司激励性报酬的函数 (payment function); 它由成本补偿和信息补偿两部分组成,且均为发电公司真实边际成本的函数,然后利用博弈理论得到期望的结果.文献 [11] 针对两种不同的拍卖形式,即第一价格拍卖和第二价格拍卖,分别设计了“计分”系统 (scoring system) 以激励投标者揭示真实成本,并证明了这种最优激励方案能够实现贝叶斯-纳什均衡.文献 [12] 指出 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 拍卖方式能够从理论上保证发电公司在追求利润最大化的前提下申报自己的真实成本,但这种方法应用起来有相当的难度.

3.2 市场投标机制下运行备用获取和其价格发现

机制设计最主要的应用领域之一是拍卖机制的设计^[32].备用市场可以采用一种特殊形式的多部制拍卖机制,发电公司通过报价来参与市场的竞争; ISO 根据某种最优性原则获取运行备用并发现价格^[33, 34].文献 [35] 证明了如果 ISO 按发电公司的运行备用容量报价排序来获取容量并据此确定容量价格,并根据电量报价来调度备用容量和确定电量价格,那么这种机制的设计是激励相容的.

对于采用拍卖方式获取多种辅助服务的拍卖机制的设计问题,目前主要采用了两种方法:一种是顺

序拍卖机制,另一种是同步拍卖机制.早期的加州市场采用了顺序拍卖方法,在运行中发现这种方法会引起严重的价格背离 (price reversals) 现象,即质量高的备用的价格远低于质量低的备用的价格.有些发电公司正是利用该方法的缺陷牟取暴利.目前采用了同步拍卖机制,允许高质量的备用充当低质量备用.不过,同步拍卖机制会因为所选择的目标函数、结算方式以及对用户侧的定价方式不同,而具有不同的效果.对此,文献 [2] 作了深入阐述:

A. 基于社会成本最小化的统一出清价格的拍卖方式.该拍卖方式是对每种备用按统一的边际价格支付,被证明是激励相容的.

B. 基于购买成本最小化的统一出清价格的拍卖方式.这种方式就是目前加州辅助服务市场所采用的理性买家算法 (rational buyer's algorithm),有效地解决了价格背离问题.

C. 按实际报价结算的拍卖方式.优点在于不论是基于购买成本最小化还是社会效益最大化,市场的效率是一致的,而且是在信息充分的情况下,可以逼近边际成本.英国新的电力市场模式采用了这种方法,但美国的电力市场 (包括能量市场和辅助服务市场) 尚没有采用这种方法.

3.3 值得注意的问题

在美国的几个电力市场,如加州、新英格兰、德克萨斯等,都是由 ISO 在拍卖市场上获取运行备用,目的是满足北美可靠性委员会 (NERC) 所制定的可靠性要求.但在选用可靠性标准方面,大多还是以确定性方法为主,所以这类方法并不能保证在经济上是最有效的.理想的拍卖机制应该是双向拍卖,即允许需求侧和供给侧同时参与,这是未来电力市场改革的方向.

4 其他方法

除上述三类主要方法外,还有其他一些方法,如文献 [36] 运用当量电价理论就我国的运行备用辅助服务市场的模式与定价进行了研究.一些文章考虑引入了期权定价的思想对运行备用进行获取和定价^[24, 37, 38].需要注意的是,电力系统中运行备用期权的交割并不是单纯由用户和发电公司的经济决策所决定,最重要的依据是系统的可靠性要求.利用服务价值 (value of service) 可靠性评估技术的思想,文献 [39] 证明了理想的备用容量价格应该等于额外容量需求的边际收益,并将该思想扩展应用于分散决策系统中,也同时指出了实际应用该方法时的主

要困难.文献 [40] 提出了一种将确定性和随机性方法相结合的方法,可以提高运行备用需求评估的有效性,并利用成本效益分析方法得到了运行备用的价格.

也有一些文献研究了可中断负荷这种特殊的运行备用的定价问题.在不少运行的电力市场中,用户的零售电价与现货市场的电价相隔离,无须考虑用户的需求对价格的弹性.随着电力工业市场化改革的逐步深入,需求侧将开放,此时需要考虑需求弹性.例如,在高峰负荷时段或出现事故致使电力供应短缺时,用户可以自行决定是否减少负荷需求量,这可以通过经济合同来实现,以间接增加运行备用容量.NERC认为可中断负荷管理属于预想事故下的备用服务.加拿大的阿尔伯特就将可中断负荷作为一种辅助服务来保障系统的安全性^[41].在可中断负荷的研究方面,需要考虑负荷可中断的容量(运行备用容量)、赔偿价格(运行备用电价)、何时可以中断(运行备用调度)等三个问题^[42].文献 [43] 提出运用最优潮流计算来选择参与可中断负荷的投标者,以减少在高峰负荷和发生预想事故时的负荷需求.

高峰负荷定价理论^[44]是另一种引人注目的定价机制,主要是针对那些不可储存的商品(如电力、电信和运输服务等).由于这些商品的需求会在供给时间内发生周期性的变化,出现高峰负荷期和非高峰负荷期,高峰负荷定价理论所强调的问题就是如何在高峰负荷期和非高峰负荷期合理地配置边际成本,以及如何确定高峰供电能力以使社会福利最大化.有学者认为,由于没有运用高峰负荷定价理论,电力工业改革已付出了沉重的代价^[45].这样,在考虑供给和需求的不确定性、停运成本以及用户侧需求弹性的基础上,建立相应的运行备用获取和定价机制,是一个值得研究的重要问题.

5 结 语

本文简要论述了在电力市场环境运行备用的获取与定价机制方面的研究现状,评估了现有主要方法的优缺点.尽管已经做了很多研究工作,而且有些方法已经在目前运行的电力市场中得到实际应用,但仍有很多重要的问题没有得到很好的解决.下面一些问题具有重要的现实意义:

(1) 运行备用容量的需求研究,即需要购买多少运行备用容量,这需要综合考虑系统的不同运行方式和负荷情况.

(2) 开发运行备用机会成本和事故停运成本的

评估和分析系统,为运行备用的定价提供合理的依据.

(3) 进一步研究运行备用市场的模型与结构,结合实际情况制定相应的运行备用报价规则.

(4) 研究运行备用市场与能量市场的协调问题,以及进行联合调度的优缺点.

参考文献 (References):

- [1] 文福拴, DAVID A K. 加州电力市场失败的教训 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 1- 5.
WEN Fu-shuan, DAVID A K. Lessons from electricity market failure in California [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(5): 1- 5.
- [2] OREN S S. Design of ancillary service markets [A]. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences* [C]. Hawaii: IEEE, 2001: 769- 777.
- [3] SCHULER R E. Electricity and ancillary services markets in New York State: Market power in theory and practice [A]. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences* [C]. Hawaii [s. n.], 2001: 783- 792.
- [4] LIU Y, ALAYWAN Z, ROTHLEDER M, et al. A rational buyer's algorithm used for ancillary service procurement [A]. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* [C]. USA: IEEE, 2000, 2: 855- 860.
- [5] STRBAC G. Trading electricity and ancillary services in the reformed England and Wales electricity market [A]. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* [C]. USA: IEEE, 2001, 1: 41- 44.
- [6] PETTIGREW J. Trading in ancillary services [A]. *IEE Seminar on Electricity Trading (Ref. No. 2000/038)* [C]. [s. l.]: IEE, 2003: 1- 6.
- [7] HUGH O. The design of efficient market structures for ancillary services [A]. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences* [C]. Hawaii: IEEE, 2001: 778- 782.
- [8] JOSE F P. The value of reliability in power systems: pricing operating reserves [EB/OL]. <http://fee.mit.edu/publications/PDF/e199-005wp.pdf>, MIT EL 99-005 WP, 1999-06.
- [9] PINDYCK R S. Volatility and commodity price dynamics [EB/OL]. <http://web.mit.edu/ceepr/www/2001-007.pdf>, WP-2001-007, 2008-08.
- [10] 张国全,王秀丽,王锡凡. 电力市场中旋转备用的效益和成本分析 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 14- 18.
ZHANG Guo-quan, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Study on benefits and costs of spinning reserve capaci-

- ty in power market [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2000, 24(21): 14– 18
- [11] BUSHNELL J B, OREN S S. Bidder cost revelation in electric power auctions [J]. **Journal of Regulatory Economics**, 1994, 6: 5– 26
- [12] HOBBS B F, ROTHKOPF M H, HYDE L C, *et al.* Evaluation of truthful revelation auction in the context of energy markets with nonconcave benefits [J]. **Journal of Regulatory Economics**, 2000, 18: 5– 32.
- [13] Energy Research Institute of Chulalongkorn University. Electricity outage cost study [EB/OL]. <http://www.nepo.go.th/power/ERI-study-E/ERI-ExeSummary-E.html>, 2001-09-21.
- [14] ALLAN R N, da SILVA M G. Evaluation of reliability indices and outage costs in distribution systems [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1995, 10(1): 413– 419.
- [15] BILLINTON R, GHAJAR R. Evaluation of the marginal outage costs of generating systems for the purposes of spot pricing [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1994, 9(1): 68– 75.
- [16] CHOI J S, MOON S P, KIM H S, *et al.* Development of an analytical method for outage cost assessment in a composite power system [A]. **Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on Power System Technology** [C]. [s. l.] IEEE, 2000: 1527– 1532
- [17] ALLAN R N, BILLINTON R. Probabilistic assessment of power systems [C]. **Proceedings of the IEEE**, 2000, 88(2): 140– 162.
- [18] UDO V E, AGARWAL S K, VOJDANI A F, *et al.* Balancing cost and reliability: a quantitative study at Atlantic electric [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997, 12(3): 1103– 1111.
- [19] MENDES D P, KIRSCHEN D S. Assessing pool-based pricing mechanisms in competitive electricity markets [A]. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting** [C]. Seattle IEEE, 2000, 4: 2195– 2200.
- [20] RASHIDIN EJAD M, SON G Y H, JAVIDI-DASHT-BAYAZ M H. Contingency reserve pricing via a joint energy and reserve dispatching approach [J]. **Energy Conversion and Management**, 2002, 43: 537– 548
- [21] GUAN X H, LUH P B, PRASANNAN B. Power system scheduling with fuzzy reserve requirements [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1996, 11(2): 864– 869.
- [22] TSENG C L, OREN S S, SVOBODA A J, *et al.* Price-based adaptive spinning reserve requirements in power system scheduling [J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 1999, 21: 137– 145.
- [23] FLYNN M E, SHERIDAN P W, DILLON J D, *et al.* Reliability and reserve in competitive electricity market scheduling [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2001, 16(1): 78– 87.
- [24] GHOSH K. Electrical power system ancillary services pricing by application of options contracts and optimal power flows [D]. Illinois: Illinois Institute of Technology, 1996.
- [25] YU Z, NDERITU D G, SPARROW F T, *et al.* Optimal and reliable dispatch of supply and demand bids for competitive electricity markets [A]. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting** [C]. USA: IEEE, 2000: 2138– 2143.
- [26] AGANAGIC M, ABDUL-RAHMAN K H, WAIGHT J G. Spot pricing of capacities for generation and transmission of reserve in an extended poolco model [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1998, 13(3): 1128– 1135.
- [27] SIDDIQUI A S, MARNAY C, KHAVKIN M. Spot pricing of electricity and ancillary services in a competitive California market [A]. **Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Hawaii [s. n.], 2001: 813– 821.
- [28] ALLEN E H, ILIC M D. Reserve markets for power systems reliability [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2000, 15(1): 228– 233.
- [29] WEN F S, DAVID A K. Coordination of bidding strategies in day-ahead energy and spinning reserve markets [J]. **International Journal of Electrical Power and Energy System**, 2002, 24(4): 251– 261.
- [30] DAVID A K, WEN Fu-shuan. Market power in electricity supply [J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 2001, 16(4): 352– 360.
- [31] SILVA C, WOLLENBERG B F, ZHENG C Z. Application of mechanism design to electric power markets (republished) [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2001, 16(4): 862– 869.
- [32] KLEMPERER P D. What really matters in auction design (revised version) [J]. **Journal of Economic Perspectives**, 2002, 16(1): 169– 189.
- [33] SINGH H, PAPALEXOPOULOS A D. Competitive procurement of ancillary service by an independent system operator [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1999, 14(2): 498– 504.
- [34] PAPALEXOPOULOS A, SINGH H. On the various design options for ancillary services markets [A]. **Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Hawaii [s. n.],

- 2001: 798– 805.
- [35] CHAO H P, WILSON R B. Multi-dimensional procurement auction for power reserves incentive compatibility evaluation and settlement rules [EB/OL]. <http://www.stoft.com/lib/papers/Chao-Wilson-2000-Spin-Auction.pdf>, Presented at the UCEI POWER Conference, Berkeley California, 1999-03.
- [36] 李晓刚, 言茂松. 我国运行备用辅助服务市场的模式与定价研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 12– 18.
LI Xiao-gang, YAN Mao-song. Market mode and pricing method for ancillary service market of operating reserve in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(9): 12– 18.
- [37] RASHIDI-NEJAD M, SONG Y H, JAVIDI-DASHT-BAYAZ M H. Option pricing of spinning reserve in a deregulated electricity market [J]. *IEEE Power Engineering Review*, 2000, 20(7): 39– 40.
- [38] OREN S S. Combining financial double call options with real options for early curtailment of electricity service [A]. HICSS-32. *Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* [C]. Hawaii: IEEE, 1999: 1– 7.
- [39] CHUANG A S, WU F. Capacity payments and the pricing of reliability in competitive generation markets [A]. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* [C]. Hawaii [s. n.], 2000: 1369– 1376.
- [40] RASHIDI-NEJAD M, SONG Y H, JAVIDI-DASHT-BAYAZ M H. Operating reserve provision in deregulated power market [A]. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* [C]. New York: IEEE, 2002: 1305– 1310.
- [41] KEHLER J H. Procuring load curtailment for grid security in Alberta [J]. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, 1: 234– 235.
- [42] 王建学, 王锡凡, 别朝红. 电力市场中的备用问题 [J], 电力系统自动化, 2001, 25(15): 7– 11.
WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, BIE Chao-hong. Reserve in the power market [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(15): 7– 11.
- [43] TUAN L A, BHATTACHARYA K. Interruptible load management within secondary reserve ancillary service market [A]. 2001 *IEEE Porto Power Tech Proceedings* [C]. Portugal: IEEE, 2001: 1– 6.
- [44] CREW M A, FERNANDO C S, KLEINDORFER P R. The theory of peak-load pricing: A survey [J]. *Journal of Regulatory Economics*, 1995, 8: 215– 248.
- [45] CREW M A, KLEINDORFER P R. Regulatory economics: Twenty years of progress² [J]. *Journal of Regulatory Economics*, 2002, 21: 5– 22.

下期论文摘要预登

一类 Lur'e 系统新的绝对稳定性与绝对二次镇定条件

鲁仁全, 苏宏业, 褚健

(工业技术国家重点实验室; 浙江大学先进控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对一类具有状态和非线性机构滞后不确定 Lur'e 时滞系统, 通过引入一种新的状态变换构造的 Lyapunov 函数, 考虑了状态滞后与具有滞后项的非线性扰动, 得出了基于线性矩阵不等式 (LMI) 方法的时滞依赖的绝对稳定性与绝对二次镇定的充分条件. 最后进行了数值仿真例子的验证, 仿真结果表明所得结论较之已有结果在保守性方面有显著改进.

关键词: 不确定; Lur'e 时滞系统; 时滞依赖; 线性矩阵不等式 (LMI)