

电力市场环境下运行备用问题的研究

赵学顺^{1,2}, 余志伟², 文福拴¹, 黄民翔¹

(1. 浙江大学 电力经济与信息化研究所, 浙江 杭州 310027

2. 香港理工大学 电机系, 香港)

Studies on Critical Issues Related to Operating Reserves in Deregulated Electricity Market Environment

ZHAO Xue-shun^{1,2}, YU Zhi-wei², WEN Fu-shuan¹, HUANG Min-xiang¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Operating reserve is one kind of ancillary services (AS), and plays an important role in electricity market operation, as it is required for maintaining system reliability to support economically efficient transactions in power systems. This paper provides a comprehensive survey through introducing and discussing some critical problems concerned. The state-of-the-art of practical AS markets in several countries is described and the framework of operating reserve pricing mechanism in the competitive electricity market environment reviewed. Discussions on several important issues are followed including decision-making responses and bidding strategies of operating reserve providers, interruptible load management and outage cost evaluation, and pricing scheme with balance between economic efficiency and reliability requirement.

Key words: deregulation; electricity market; ancillary services; operating reserve pricing; bidding strategies; outage cost

摘要: 运行备用作为辅助服务的一种, 在维持电力系统的安全性、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面临着许多新的挑战, 相关研究工作散见于各类文献中, 所探讨的内容主要涉及了: 运行备用定价机制的框架性研究, 发电侧对备用市场的决策响应与投标策略, 可中断负荷管理和对停运成本的分析评估, 以及如何制定出兼顾经济性和可靠性的定价策略等相关问题。对国内外在这些方面的研究工作做简要综述。

关键词: 电力市场; 辅助服务; 运行备用; 定价机制; 投标策略; 停运成本

中图分类号: F407.2

文献标识码: A

引言

电力工业改革能否成功有赖于能否维持要求的系统可靠性水平。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, 最明显的例子莫过于美国加州(加利福尼亚州)电力市场的失败^[1,2]。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。美国联邦能量管制委员会(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、旋转备用和追加备用(Supplemental Reserve)等, 其中后两种备用属于运行备用。

在国际上, 不同国家和地区的电力市场根据自身特点采用了不同的辅助服务获取与定价方式。英格兰和威尔士电力市场依托联营体经营模式, 既可以通过 ASB(Ancillary Services Business)机构与发电公司签订长期合同来获得运行备用, 也可以利用未列入调度计划的发电机的富裕容量和相邻电网的发电机富裕容量。在由挪威、瑞典、芬兰和丹麦组成的北欧电力市场, 要求发电公司提供常规的辅助服务作为其参与市场运行的必要条件, 并通过电费进行补偿。美国加州电力市场将辅助服务与电能销售分离, 在主电能市场之外设立了竞争的辅助服务市场(调节, 旋转运行备用, 非旋转运行备用, 替代运行备用), 由 ISO(Independent System Operator)管理。在美国新英格兰、新西兰、澳大利亚等地, 运行备用作为一种辅助服务, 被允

许参与市场的公开竞价。

无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,这事实上强调了辅助服务的重要性。美国纽约、新英格兰、加州等市场已为此付诸行动^[3]:在纽约,试图通过识别和解决东西部地区之间的网络阻塞问题来减少辅助服务市场上的市场势力(Market Power)^[4];在新英格兰,通过在运行备用市场中引入价格弹性和修改调度协议来消除市场中的博弈行为;加州的改革目标是增加辅助服务市场的透明度和提高效率,以降低购买成本,其中最关键的一环是将不同的辅助服务由顺序(Sequential)拍卖方式转换为同步(Simultaneous)拍卖方式,并采用了理性买家算法(Rational Buyer Algorithm)作为辅助服务市场的切除算法^[5]。自2001年3月开始,英国实施的新一轮电力改革方案简称为NETA(New Electricity Trading Arrangements),其主要目标是在维护系统安全可靠运行的同时,提高市场运作效率,并为市场参与者提供更多选择^[6-7]。新方案的最大特点是允许双向合同。文献[8]讨论了澳大利亚辅助服务市场的结构设计问题,特别强调应提高其经济有效性,这包括对特定的辅助服务应采用最有效的手段(技术有效性),调度和分配恰当的辅助服务(分配有效性),以及及时发展和采用新的辅助服务技术(动态有效性)。

运行备用作为一种非常重要的辅助服务,国内外近年来对其做了很多的研究工作,研究成果散见于各类文献中。研究工作主要集中于:运行备用定价机制的框架性研究,发电侧对备用市场的决策响应与投标策略,用户的需求弹性和停运成本的分析评估,以及如何制定出兼顾经济性和可靠性的定价策略等相关问题。本文对这几个方面的研究工作进行简要综述,但由于条件所限,所收集的资料肯定不能覆盖有关的全部文献。

1 运行备用定价机制的框架性研究

一个好的定价机制应该从能使社会福利最大化的角度出发,能够有效地引导市场参与者进行资源的优化配置并降低成本。电力市场环境下的运行备用定价机制的框架性研究主要从以下3个方面进行:

(1)运行备用的管理和定价机构。一般认为,运行备用应由系统运营机构如ISO负责管理、定价和实施。这是由于只有在系统范围内协调运行备用才能

更好地实现系统安全可靠运营的要求,同时兼顾经济有效性。但与普通商品的运营管理不同,运行备用的运营管理受到电力系统自身特性的制约,必须考虑可靠性约束,并支持由市场所驱动的电力投资。此外,系统运营机构要能够对市场中的欺诈行为进行有效监控。

(2)由于在实际市场中信息是不完备和不对称的,系统运营机构通过建立定价机制和市场规则来对发电公司行使某种控制、引导权,例如要求发电公司申报机组运行参数和激励发电公司自愿披露其真实成本等,在此基础上可以进行机组组合优化^[9]。也可以基于价值可靠性(Value-based Reliability)进行经济调度,并计入预想事故下发电备用成本、调度调节成本和负荷中断成本^[10]。文献[11]提出了一个多目标决策模型,以期获得能够兼顾经济性和技术限制的帕累托(Pareto)最优策略。而发电公司在此前提下,可以在其管理权限范围内行使一定的决策权,使自身的利益最大化。

(3)该决策系统可以通过建立基于主从(Leader-Follower)递阶决策框架来进行描述^[12]。处于高一层的系统运营机构从全局性考虑,保障系统的安全可靠运行和电力市场的稳健运营;低一级的发电公司则从自身的经济利益和机组特性出发,按照市场规则参与市场竞争。整个系统最终的决策结果往往是寻求能使两者达到某种协调的方案——既可使系统运营机构的目标达到“最优”,也可使作为其决策约束下的发电公司的目标在相应从属地位上达到某种指标下的“最优”。

2 发电侧对备用市场的决策响应与投标策略

面对备用市场,发电公司在进行决策时必须考虑两方面因素:一方面是机组的性能要求,如机组的实际可用容量和响应速度;另一方面则是关于成本的有效回收,尤其要注意机会成本。

首先是可用容量问题。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,即建立备用市场。发电公司提交到备用市场上的可用容量,除了不能超过机组最大可用容量减去其在实时电能市场上已被调度的容量外,还要受限于机组的爬坡速率,因为其决定了在响应时段内所能达到的容量水平。此外,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, 这样在确定备用的可用容量时也需要对这部分容量予以扣除。

发电机组的容量既可以参与主电能市场, 也可以提交到辅助服务市场, 正是存在这样的选择“机会”, 决定了发电公司在提交运行备用容量报价时肯定会考虑机会成本, 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, 通常是处于边际机组之下越远的机组容量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(估计)主电能市场清算电价和机组的边际成本之差而得到^[13]。文献[14]根据旋转备用边际机会成本来确定旋转备用电价, 为备用成本的计算提供了新思路, 但该方法得到的是用行政方式确定的电价, 而非市场电价。

除机会成本外, 运行备用的供给成本中还应包括机组的变动成本, 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^[15], 只有被调用提供电量时消耗燃料成本; 非旋转备用则还要考虑机组的启动成本。从理论上讲, 如果运行备用市场是完美竞争的, 则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^[16-17], 其中机会成本包含在容量报价中, 而边际变动成本则包含在电量报价中。

显然, 发电公司的报价与其被选中的概率是相关的, 如果报价高, 则被选中的概率低; 而报价低, 则可能达不到期望的收益。在完美竞争的市场上, 报价应该基于真实的边际成本。可是, 电力市场不是完美竞争的市场, 因此发电公司往往会采取策略性投标来增加自己的期望利润。发电公司的最优报价策略与市场价格形成的机制或方式有关。文献[18]分别对两种不同的价格形成机制下的机组组合优化问题建立了随机动态规划模型: 一种是只对运行时被调度的运行备用支付备用价格, 该价格往往高于主电能市场的清算价格; 另一种是对被调度的运行备用按主电能市场价格支付, 而对未被调度的备用容量支付少许备用价格(相当于机组的容量价格)。文献[19]从发电公司的立场出发, 探讨了如何在主电能市场和运行备用市场上进行协调投标的问题, 将其描述为随机优化过程, 并运用遗传算法(Genetic Algorithm)求解。文献[20]则从系统运营机构如ISO的角度出发, 研究了如何同时处理能量交易和运行备用交易的联合调度问题, 从而为预想事故运行备用定价。

由于电力市场是垄断市场, 发电公司具有市场势力, 特别是在负荷处于高峰而需求又缺乏弹性的时候, 发电公司会行使市场势力来牟取暴利^[21]。这时, 单纯利用市场结构设计来激励发电公司揭示其真实成本并不可行, 必须利用监管手段来及时、有效地发现投标中的欺诈行为和市场势力, 必要时给予惩罚, 以打击发电公司的投机行为。

3 可中断负荷和停运成本的分析评估

在国内外目前运行的大多数电力市场中, 用户的零售电价与现货市场的电价相隔离, 因而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, 需求侧将逐步放开, 用户对市场价格将做出反应, 此时需要考虑需求弹性。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对可中断负荷的管理, 以间接增加运行备用容量。北美电力可靠性委员会(NERC)认为可中断负荷管理属于一种预想事故下的备用服务。加拿大的阿尔伯特将可中断负荷作为一种辅助服务来保障系统的安全运行^[22]。在可中断负荷的研究方面, 需要考虑用户可中断负荷的容量(运行备用容量)、可中断负荷的赔偿价格(运行备用电价)以及何时可以中断(运行备用调度)等3个问题^[23]。文献[24]提出了一种运用最优潮流(OPF)来选择参与可中断负荷的投标者的方法, 以在高峰负荷和发生预想事故时减小负荷需求。

运行备用的效益间接地反映在由于投入了运行备用而减少停运事故所带给用户和发电公司的损失, 即停运成本的减少。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(Adjustment Cost)、中断成本(Interruption Cost)和消费者剩余损失(Consumers' Surplus Loss)3部分。

调度调节成本是指当出现供电不足或停电事故时, 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, 包括在发电侧启用更高成本的发电容量, 甚至要从其它电源点购买昂贵的电力, 而带来的附加成本。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, 即便用户没有停电, 但由于系统负荷紧张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(假设销售电价与购买

电价挂钩)。

降低停运成本相当于为系统带来了效益,故对备用容量效益的评估主要就是对停运成本的评估。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也就越来越受到重视^[25]。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[26]讨论了如何评估配电侧的停运成本,文献[27]对发电侧的边际停运成本评估问题进行了研究,而文献[28]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[15]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,较多采用的方法是将用户停运成本与失负荷价值(Value of Lost Load, VoLL)指标联系起来,该指标一般是通过调查用户对用户的调查结果进行分类计算、加权平均得到。

4 兼顾经济性和可靠性的定价策略

运行备用的获取与定价和可靠性密切相关。系统可靠性通常用可靠性指标来衡量,包括确定性指标和概率性指标。确定性指标如备用百分数以及备用应大于系统最大机组容量等;概率性指标则是在综合考虑与电力系统可靠性有关的各种因素影响的基础上,评估系统的可靠性程度,如失负荷概率(LOLP)等。这些指标缺乏经济学含义,与电力市场不太适应。目前的研究重点集中在如何设计出兼顾经济性和可靠性的定价策略,以提高定价的有效性。相关的工作大致可以分为下述3类。

4.1 基于备用的成本评估与分摊的定价方法

这是一种比较传统的方法,具有简单明了、可操作性强的优点。大致思路为:首先对运行备用的供给成本和其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。

首先,确定所需的备用容量应以是否带来经济效益为标准,通过权衡备用成本和其产生的期望效益来确定是否需要备用以及需要多少备用。例如,可以采取基于成本—效益分析的容量配置标准^[29],即最优运行备用容量(R_c^*)应该使得运行备用的供给成本和停运成本之和TC最小化。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^* 和相应的总成本TC。文献[30]用这种方法对美国亚特兰大电力系统进行了仿真计算与分析。

如何向提供备用容量的发电公司支付适当的费用,涉及到对TC补偿的分配问题。由于其中的供给成本直接对应于各个发电公司,因而不需要分配,这样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^[31]。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,或者按各发电公司实际被调度的备用容量份额支付停运成本费用,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单位供给成本就可以作为支付发电公司的运行备用电价。

这种方法是集中式的行政决策为基础的,也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,可能会导致成本居高不下。

4.2 计入可靠性约束条件下的优化算法

这类方法实质上是一种短期边际成本定价方法,它能够提供经济信号,因此与前面的基于成本的定价方法有着本质的不同。该方法通过对传统优化调度进行扩展来实现满足可靠性要求的容量配置和定价。较常采用的扩展方式是在模型的约束条件中增加可靠性约束。如文献[32]在优化调度中计及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[33]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[34]提出了一种旋转备用需求(SRR)随着价格变化自适应调节的方法,它主要包括3部分:首先,由发电公司提交电能和备用价格,系统调度员根据提交的价格来调节旋转备用需求,然后求解机组组合优化问题以确定机组的状态与出力水平,随后对电能和备用价格进行修正,如此反复,原理上可以自适应地收敛到纳什均衡解。

文献[35]和[36]均是针对竞争市场中需求侧和供给侧的投标模式来讨论系统的优化调度与可靠性问题。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,在其所扩展的优化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。在主电能市场和辅助服务市场上寻找均衡的实时价格问题方面,文献[37]提出了一种方法,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,这种方法是基于完全竞争的市场为基础的,要求完备的市场信息。

4.3 基于投标机制揭示价格的方法

通过良好的投标机制设计^[38],并配合必要的监管措施,原理上可以激励发电公司自愿揭示自己的真实成本。这便是第3类定价方法的基本出发点。简单地讲,就是基于有效的市场结构设计,发电公司通过投标提交运行备用的容量报价和电量报价,运行备用市场管理者(如ISO)根据某个最优性原则对其进行获取和定价^[39,40]。文献[41]证明了如果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,而根据电量报价来调度备用容量和确定电量价格,则该机制是激励相容的。

对于采用市场拍卖机制获取多种辅助服务的市场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,即质量高的备用价格低于质量低的备用价格。有些发电公司正是利用了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产生相当不同的效果。对此,文献[3]作了深入阐述:

(1)以社会福利最大化作为目标函数确定统一出清价格。该拍卖方式是对每种备用按统一的边际价格支付,被证明是有效的而且是激励相容的。

(2)以购买成本最小化作为目标函数确定统一出清价格。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,它有效地解决了价格背离问题。

(3)按实际报价结算。这种方法的优点在于不论是基于购买成本最小化还是社会福利最大化,市场的效率是一致的,而且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。

除上述3类主要方法外,还有其它一些方法,如文献[42]运用当量定价理论就中国目前的运行备用辅助服务市场的模式与定价进行了研究。一些文献引入期权定价的思想对运行备用进行定价^[33,43,44]。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,更主要的还是要依据系统的可靠性要求。利用服务价值(Value of Service)可靠性评估技术的思想,文献[45]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,并同时指出了实际应用该方法时的主要困难。高峰负荷定价理论^[46]是另一种引人注目的定价机制,它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变化,出现高峰负荷期和非高峰负荷期,因此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^[47]。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,仍是一个很值得研究的重要问题。

5 结束语

本文对电力市场环境下与运行备用相关的一些重要问题的研究情况做了简要综述,分析了现有的一些定价方法的优缺点。尽管已经作了很多这方面的研究工作,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。例如,运行备用容量的需求研究,即市场需要购买多少运行备用容量;运行备用机会成本和事故停运成本的评估和分析系统的开发;运行备用市场的模型、结构与报价规则;以及运行备用市场与能量市场的协调问题等。

参考文献:

- [1] 文福拴(Wen Fushuan), DAVID A K. 加州电力市场失败的教训(Lessons from electricity market failure in California)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(5): 1-5.
- [2] HOGAN W W. Electricity market restructuring: reforms of reforms

- [J]. *Journal of Regulatory Economics* 2002, 21: 103—132.
- [3] OREN S S. Design of ancillary service markets[C]. Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2001.
- [4] SCHULER R E. Electricity and ancillary services markets in New York State: market power in theory and practice[C]. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2001. 783—792.
- [5] LIU Y, ALAYWAN Z, ROTHLEDER M, et al. A rational buyer's algorithm used for ancillary service procurement[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2000.
- [6] STRBAC G. Trading electricity and ancillary services in the reformed England and Wales electricity market[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2001.
- [7] PETTIGREW J. Trading in ancillary services[C]. IEE Seminar on Electricity Trading (Ref. No. 2000/038), 2000.
- [8] HUGH O. The design of efficient market structures for ancillary services[C]. Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2001.
- [9] BILLINTON R, FOTUHI—FRUZABAD M. Composite systems operating reserve assessment using a reliability framework[C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Canada, 2001.
- [10] YOON Y T, ILIC M D. A possible notion of short-term value-based reliability[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2002.
- [11] SCHMITT A, VERSTEGE J F. A multi-criteria optimization of ancillary services in a competitive energy market[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2001.
- [12] KEYHANI A, CRUZ J Jr, SIMAAN M A. Market monitoring and leader follower incentive control of ancillary services[C]. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 1999.
- [13] PINDYCK R S. Volatility and commodity price dynamics[EB/OL]. <http://web.mit.edu/ceepr/www/2001-007.pdf>, 2001—08—07.
- [14] 张国全, 王秀丽, 王锡凡 (Zhang Guoquan, Wang Xiuli, Wang Xifan). 电力市场中旋转备用的效益和成本分析 (Study on benefits and costs of spinning reserve capacity in power market)[J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power System)*, 2000, 24(21): 14—18.
- [15] JOSE F P. The value of reliability in power systems: pricing operating reserves[EB/OL]. <http://lee.mit.edu/publications/PDF/el99-005wp.pdf>, 1999—06—05.
- [16] BUSHNELL J B, OREN S S. Bidder cost revelation in electric power auctions[J]. *Journal of Regulatory Economics* 1994, 6: 5—26.
- [17] 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.
- [18] ALLEN E H, ILIC M D. Reserve markets for power systems reliability[J]. *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15(1): 228—233.
- [19] 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.
- [20] RASHID-NEJAD M, SONG 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] DAVID A K, WEN F S. Market power in electricity supply[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2001, 16(4): 352—360.
- [22] KEHLER J H. Procuring load curtailment for grid security in Alberta[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.
- [23] 王建党, 王锡凡, 别朝红 (Wang Jianxue, Wang Xifan, Bie Chaohong). 电力市场中的备用问题 (Reserve in the power market)[J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2001, 25(15): 7—11.
- [24] TUAN L A, BHATTACHARYA K. Interruptible load management within secondary reserve ancillary service market[C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, 2001.
- [25] Energy Research Institute Chulalongkorn University. Electricity outage cost study. <http://www.nepo.go.th/power/ERI-study-E/ERI-ExecSummary-E.html>, 2001—12—21.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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[C]. Proceedings, PowerCon 2000. International Conference on Power System Technology, 2000.
- [29] ALLAN R N, BILLINTON R. Probabilistic assessment of power systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(2): 140—162.
- [30] 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.
- [31] MENDES D P, KIRSCHEN D S. Assessing pool-based pricing

- mechanisms in competitive electricity markets[C] . IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, USA, 2000.
- [32] 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.
- [33] GHOSH K. Electrical power system ancillary services pricing by application of options contracts and optimal power flows[D] . Illinois Institute of Technology, 1996. Ann Arbor, Mich. U M I, 1997.
- [34] 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.
- [35] YU Z, NDERITU D G, SPARROW F T, et al. Optimal and reliable dispatch of supply and demand bids for competitive electricity markets[C] . IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, USA, 2000.
- [36] 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.
- [37] SIDDIQUI A S, MARNAY G, KHAVKIN M. Spot pricing of electricity and ancillary services in a competitive California market[C] . Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2001. 813—821.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] PAPALEXOPOULOS A D, SINGH H. On the various design options for ancillary services markets[C] . Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2001.
- [41] CHAO H P, WILSON R B. Multi-dimensional procurement auction for power reserves; incentive compatibility evaluation and settlement rules[C] . The UCEI POWER Conference, Berkeley California, March 1999. (Revised May 2000). Available at: <http://www.stoft.com/lib/papers/Chao-Wilson-2000-Spin-Auction.pdf>
- [42] 李晓刚, 言茂松(LI Xiaogang, Yan Maosong). 我国运行备用辅助服务市场的模式与研究(Market mode and pricing method for ancillary service market of operating reserve in China)[J] . 电力系统自动化(Automation of Electric Power System), 2000, 24(9): 12—18.
- [43] RASHIDI-NEJAD M, SONG Y H, JAVIDI M H. Option pricing of spinning reserve in a deregulated electricity market[J] . IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(7): 39—40.
- [44] OREN S S. Combining financial double call options with real options for early curtailment of electricity service[C] . Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences, Hawaii (USA), 1999.
- [45] CHUANG A S, WU F. Capacity payments and the pricing of reliability in competitive generation markets[C] . Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (USA), 2000.
- [46] CREW M A, FERNANDO C S, PAUL R, et al. The theory of peak-load pricing: a survey[J] . Journal of Regulatory Economics, 1995, 8: 215—248.
- [47] CREW M A, KLEINDORFER P R. Regulatory economics: twenty years of progress[J] . Journal of Regulatory Economics, 2002, 21: 5—22.

作者简介: 赵学顺(1974—), 男, 浙江大学博士生, 主要研究方向为电力市场和电力经济与信息化技术的应用研究; 余志伟(1952—), 男, 香港理工大学博士, 香港理工大学助理教授, 主要研究方向为电力市场、电价、电力经济和继电保护; 文福拴(1965—), 男, 浙江大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场与人工智能在电力系统中的应用; 黄民翔(1955—), 男, 浙江大学副教授, 研究方向为电力市场、电力经济和系统规划。

Papers in English Are Welcome
Orders Are Welcome