

电力市场下水电厂竞价综述

曾勇红,王锡凡

(西安交通大学 电力工程系,陕西 西安 710049)

摘要: 针对水电机组的特点,对联营市场模式下的水电机组竞价策略和水电市场势力进行了总结和评述。在过渡时期,水电机组继承垂直一体化管理模式,配合火电运行报价,不能突出水电的效益。采用完全竞争方式则需要建立现货交易市场下的水库优化运行模型,但改进后的模型可以考虑传输网络约束、机组组合以及系统中的不确定因素。为了协调利益关系,对同属一个业主的梯级电厂,可以聚合为一个报价单元,而建立水批发市场共同调节不同业主的收入分配。对市场势力的研究发现,水电厂可以通过研究不同时段间的需求弹性差来行使市场势力,在需求的低弹性阶段不发电而在高弹性时发足够的电。纵观国内外由市场实现水电资源优化配置的研究,今后还需要在水电的市场地位、区域水电厂的竞争模式、综合利用、梯级水电竞价、弃水电量、电价预测以及电力市场环境下的流域梯级开发调度模型和算法上进行更加广泛的研究。

关键词: 竞价; 水电厂; 日前市场; 备用市场

中图分类号: TM 622;F 123.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0101-06

1 动力资源简介

电力市场化的目的是打破原有电力工业垂直一体化的垄断局面,在各电力部门引入竞争机制,实现资源的最佳分配和利用。传统电力系统的主要动力部分由火电、核电和水电构成,是电力市场中最先开放的部分。由于改革初期的电能市场是一个不完全的垄断市场,对 3 种资源究竟应该如何参与电力市场,各国的政策存在较大的分歧。目前,似乎尚无核电参与电力市场竞争的报道,原因可能有 3 个:核电在电力系统中所占比例不大;核电可调性较小,缺少灵活性;核电的运行要求极高的安全可靠。研究较为成熟的是火电机组的竞价策略,而对水电的竞价和运行方式仅有一些试探性的研究成果,尚缺乏系统严格的理论研究和实践检验。

水电是一种清洁的可再生能源,我国在制定能源政策时要求充分利用水资源,但地区分布的不均匀和区域经济的影响导致了水力资源的开发并不充分。在研究水电厂参与电力市场的竞价策略时,有必要分清水电机组区别于火电机组的特点,主要有 6 个方面的表现。

a. 能源与水库规模相关。若是径流式电厂,无竞争策略可言;若为不完全年调节,则存在该问题;若是多年调节,则可视为能源无限。

b. 机组存在汽蚀和振动区。在安排水电机组运行策略时,必须避免水电机组在这些禁止运行区长期运行。

c. 机组调节快,在备用市场中仅有旋转备用,无热备用的前导时间。这使得水电机组在系统调峰、调频中具有重要作用,是理想的备用装置。

d. 梯级之间的影响。这包括同一梯级上、下游之间的水力耦合关系及不同电站间的电力耦合联系。

e. 存在状态转移方程,即存在机会成本。水电站前一段时间的用水量直接影响后一段时间的水库蓄水量,须对可调节水库从一段时期考虑其利润大小。

f. 可以认为无运行成本。水电机组与火电机组最大的区别就是建成后几乎不需要消耗燃料成本,对于发电为主的水电站能在建成后有很高的运行利润。水电的投资主要集中在容量成本上。

随着电力体制的改革和市场化的推进,水电走向市场,按照“公平、公正、公开”的原则参与竞价上网,将是水电发展的必然趋势。在完全竞争的电力市场中,水电将在系统的调峰、调频和备用方面发挥更加重要的作用。在市场竞争体制下,水、火电联合运行规划必有重大变化,特别是水电的上网电价是一个全新的重要课题,操纵着水电的交易和投资市场。如何理顺水电的市场环境,建立水、火电协调与竞争的交易调度模式,制定水电的上网电价,解决投资市场中的水电投资与还贷等,都是当前电力改革迫切需要解决的问题^[1]。本文将对水电厂参与电力市场的竞价策略作全面的回顾,尽可能地反映该领域的最新发展动态,并指出今后技术上可行的研究方向。

2 水电机组在日前市场的竞价策略

前面已经提到,电能市场是一个不完全的垄断市场,厂商或多或少都具有市场势力。基于成本和基于最优策略的研究是制定电厂报价的 2 种主要途

径。基于成本的方式计算简单,操作容易^[2],适合于规划阶段,但没有反映市场的实时调节功能。竞价策略则是指发电商利用电力市场的这种非完美性来增加自身利益的报价行为。竞价策略的主要目标是在考虑电力系统的各种规则和限制条件的基础上,通过合法地操纵市场势力,合理选择报价曲线,谋求自身利益的最大化。目前,国内外相关文献提出的途径大致可分为以下 4 类^[3]:

- a. 市场优化方法,即首先估计竞价交易时段的市场出清电价,然后以低于此出清电价某一微小值的价格报价,这其中包括最优潮流和市场模拟等方法;
- b. 基于博弈论的方法,要么基于博弈论得益矩阵,要么基于各种非完全竞争博弈模型;
- c. 估计竞争者的竞价行为方法,一般利用概率分析模型或者模糊集方法,这类方法应用比较广泛;
- d. 一些其他优化方法,如 Markov 决定链、模糊聚类分析和神经网络、序贯优化法、蒙特卡罗法等。

4 类方法中, b、c 2 类方法经常结合使用。

针对水电机组的特点,在制定水电机组竞价策略时,按照市场细分的不同可能采用不同的模型。本文重点研究了联营市场模式下的水电机组竞价策略。然而值得注意的是,从一些水电参与市场比较成功的国家的经验看,双边合同对水电的风险规避和可靠运行作用重大。因合同的制定和日前竞价策略形成方式有较大的区别,本文没有讨论这些内容。

根据市场化程度不同,联营市场模式下水电机组竞价模型主要有配合火电和完全竞争 2 种方式。

2.1 配合火电方式

我国目前基本采用配合火电方式研究水电机组竞价策略。文献[4]根据我国当前的能源政策,将水电在竞价上网中定位于以其调节性能好的优势降低火电系统的购电价格,最大限度地参与调峰,尽可能地保证火电机组的连续运行,利用其灵活的调节性能减少火电机组的开停机次数。这样,竞价上网中的水、火电协调的内涵是在保证水电不弃水的前提下,避开水电振动区,以水电调节灵活的优势减少火电机组开停机,配合火电的竞价上网,实现火电系统的购电费用最低和保证火电机组的高效和安全运行。该文在仔细分析了水电机组运行特点的基础上,提出了以火电机组全天购电费用最低为目标的数学规划模型。其一般结构为

$$\min_{P_i \in A_N} \sum_{i=1}^N \max_{i \in \Omega} [I_i^t f(P_i^t)] \Delta t$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} D+G=S \\ \text{与水电有关的物理约束} \end{cases}$$

式中 P_i 为火电机组的出力; A_N 为火电机组的物理约束集合; Ω 为参与竞价的水电机组集合; N 为规划时段数; I_i^t 、 $f(P_i^t)$ 分别为 t 时段火电机组 i 的开停机状态和报价曲线; D 、 G 和 S 分别为火电系统、水电系统和全系统的功率; Δt 为时段间隔长度。

很显然,这种运行协调方式采用的是市场出清结算方式,没有突出水电的效益,没有脱离传统的垂直一体化管理模式,只能作为市场走向完全竞争的过渡模式。此外,由于目标函数是一个极小极大形式的优化问题,也给计算带来了一定的困难。文献[5]率先运用博弈理论对该竞价协调方式下的水、火电竞争策略进行了分析,利用 Cournot 模型研究了多时段水、火电混合系统的 Nash 均衡策略,模型中火电系统考虑了机组最小开停机时间的限制,水电系统考虑了水电机组用水量的限制等因素。计算结果表明,当考虑水电厂用水量限制因素时,为获取最大利润,水电厂商在峰荷时段可能会持留发电量,具有一定的启发性。

2.2 完全竞争方式

由于市场经济的观点在发达国家早已深入人心,完全竞争方式为国外许多国家所采用。文献[6]对传统的状态连续动态规划模型的最优性条件进行了分析,建立了解除管制市场中水库管理的多时段模型和对偶动态规划,考虑了双边合同对市场的影响,适用于市场环境下的水库中期最优管理。该文的不足之处是模型只适用于对单一水电公司(单一水库)行为进行分析。同时,没有考虑水电厂的市场力问题,对消费者的持有权行为也缺乏分析。文献[7]详细描述了新西兰电力市场的结构和计划模型,介绍了新西兰电力市场的计划、定价和调度程序。该程序分析了电能竞价,并显式地考虑了输电阻塞、线损、备用要求和爬坡率约束对市场出清的影响。该程序是竞争市场下的古典供需平衡理论的推广,考虑了新西兰电力市场的安全经济运行性。文献[8]考虑了新西兰批发电力市场中梯级水库的报价策略问题,价格采用一阶 Markov 过程,电力需求在模型中隐含地考虑。该模型适用于短期运行,这与水电厂为价格接受者的假设一致。同时,在模型中只需认为价格过程不确定,而认为来水是确定性的。模型考虑了计划期末水的价值,其 N 个阶段动态规划模型的递推方程为

$$u(t, s, H) = E \left\{ \max_{r \in A_H} [p_t q(s, r) + u(t+1, v(t, s, r), (H, p_t))] | H \right\}$$

$$t = 0, \dots, N-1$$

式中 $u(t, s, H)$ 为 t 时段的效用; s 、 r 分别为当前状态和决策; A_H 为水电可行决策域; H 、 p_t 分别为历史和当前价格。

终端条件为

$$u(N, s, H) = F(s, H)$$

式中 $F(s, H)$ 为终端余留效益,一般与水位有关。

计算分 2 步。首先,对每个 $p \in [0, \infty)$, 求解非线性优化问题

$$w(p, s, H) = \max_{r \in A_H} \{pq(s, r) + u[t+1, v(t, s, r), (H, p)]\}$$

然后,给定 H 和 p_t 的条件分布下,积分 $w(p, s, H)$ 得到 $u(t, s, H)$ 。

该文提出的模型和求解方法为研究短期现货交易市场下的水库运行策略提供了一个好的框架和思路,但该模型没有考虑安全约束和爬坡率的限制。对于多库系统,存在常规动态规划中常遇到的维数灾问题。随后,将该文的思想推广到考虑水库的长期报价策略^[9],考虑了来水的随机性。为了考虑更详细的运行约束,将动态规划递推方程分成 2 个子问题:一为阶段内问题,其当前阶段中每个交易时段的供给函数使得在给定该阶段的下泄水量的均值和方差的条件下,该阶段的期望收入最大;二为阶段间问题,使用阶段内问题计算的值选择该时段下泄量的均值和方差,使得当前阶段的收益加上将来阶段的期望收益之和最大。从动态规划的观点看,该方法具有较大的优越性。阶段可取一个合适的时间跨度,而每个阶段也只有 2 个决策变量,即下泄水量的均值和方差。即使加入其他状态变量,诸如天气和市场状态,计算也是可行的。而且,该方法克服了以往一些模型中难以考虑价格波动性的缺点。由于阶段内子问题从当前库水位中解耦出来,故可离线计算。这从运行的角度看是有利的,但不能考虑水头的影响。Pereira 从短期电力市场的单时段报价模型出发,研究了原模型和其对偶模型之间的关系,也采用了 2 级优化的方法迭代确定未知参数^[10]。由于采用了二进制扩张方式将非线性优化转化为混合整数线性规划,有望在模型中考虑传输网络(节点和直流潮流)约束,机组组合以及系统中的不确定因素,诸如价格、电量、电厂的可用性和负荷等,也能较好地处理。

3 梯级水电厂竞价方式

单独考虑梯级电厂的竞价行为在于梯级电厂的相互联系导致了更加复杂的问题。梯级水电在运行方式和发电量方面有着紧密的耦合关系。在电力交易中,由于梯级水电厂追求自身利益的最大化,可能导致梯级水电之间缺乏协调,影响梯级水电的资源优化利用。文献[11]根据我国电网水调的经验认为,对同属一个业主的梯级,报价时可将所有机组合成为 1 台报价机组,计划下达到这台模拟机,然后由发电企业根据自己制定的梯级优化调度方案将总的发电计划分解到各个梯级电站及每台机组。

文献[12]在文献[4]的框架下,对文献[4]所介绍的出清费用优化负荷法加以变化和补充,提出了同时段优化出力网络流法,加快了计算速度。随后,作者讨论了影响水电电价的水价及水电机组启停费用因素^[13],提出了将水、火电混合动力系统划分为 2 个独立的竞价子集,在各子集内部依据购电费用最低的原则竞价上网的思想。求解过程首先按照水电配合火电竞价上网的方式,采用网络流法初步优化梯级水电站的出力;然后在梯级水电站竞价子集内部按照购电费用最低的原则竞价上网,采用同时段调整法优化水电的出力。

文献[14]以巴西电力系统中一个小水电系统的

运行数据验证了在完全竞争市场中,当水电厂位于不同水系时,基于市场的水电厂调度将收敛到以成本最小为目标的集中调度方式下的解;对于梯级电厂,电力现货市场的支付机制将不能给上游水库提供调节下游电站生产的动机,从而恶化运行效率。假设某一梯级由一个水库和一个径流式电站组成,其中水库在上游,则在现货市场中,一个直观的理解是,因水库没有发电,该水库不能从市场中获取任何回报,尽管它对下游的电站有很好的调节径流的作用。即使该水库装有发电设备,甚至在垂直一体化的管制情形下,这种恶化仍然会发生。针对这种利益分配上的不公平问题,该文提出了建立一个水批发市场的思路,该市场和电能批发市场的结构基本相同,共同调节不同业主的利益分配。此外,作者也给出了另外一个在巴西电能市场中正在运用的利润分配规则,即在正常运行条件下,按电站对电力系统的贡献比例重新分割总生产。值得注意的是,在现货市场中,算例表明,对于同属于一个公司的梯级水电厂,按照各自利润最大化竞价并不会影响公司的总收入,对照文献[11]的建议,这为梯级电厂如何参与电力市场提供了一个研究思路,但其正确性有待实践的检验。

文献[15]考虑了电力联营市场中的水电公司计划问题。该公司由一条水系上的几个梯级水电厂组成,目标是使公司从日前市场中售电收益最大,采用二进制变量和连续变量描述每个电厂的性能曲线,考虑开机成本,建立了一个混合整数规划模型。该模型考虑了实际水电厂的运行计划和约束,对水电厂参与市场竞争起到很好的决策支持,但随着水电厂数目的增加,计算时间增加很快。

4 水电机组在备用市场的竞价策略

辅助服务对于系统可靠性和商业功能至关重要。由于许多服务由同一发电机组提供,所以电能和辅助服务市场紧密耦合。运行备用是一种辅助服务,当大发电机组或输电线路故障时用于维持平衡。

联邦能源管理委员会(FERC)和北美电力可靠性组织(NERC)对运行备用服务的定义存在差异。NERC(1997)定义运行备用由旋转和非旋转备用组成,其中旋转备用指无负荷发电量,同步并立刻提供附加需求;非旋转备用指没有与系统相连但能在短时间内满足需求,或者在短时间内从系统中切除的中断负荷。NERC 规定运行备用至少一半为旋转备用。FERC(888)定义运行备用为:当出现意外事件,诸如电量不足时,可用于带负荷的额外的发电量。FERC 定义旋转备用为:在线机组或以不到最大出力发电的机组提供的服务,可在意外事故发生时立即提供负荷。FERC 定义非旋转备用为:用于事故情况下的发电容量,但不能立即使用,必须经过一个短时间(通常 10 min)。非旋转备用由在线无负荷机组、快速启动机组以及用户中断负荷(协商削减负荷)提供。

由此可见,FERC比NERC定义得窄^[16]。NERC事故备用的定义与FERC运行备用的定义大致相等。然而即便如此,FERC的定义在实际操作时仍然存在许多模糊甚至混淆的地方,这给研究备用市场的运营带来了一定的困难。

在备用市场,水电厂因其调节性能好而占据着重要地位。随着一些新能源(如风能和潮汐能)的发现和深入开发,构成电力系统动力部分的高度不确定性使得这种地位更加突出。由于水电机组没有备用前导时间,按照FERC或NERC的定义,一般在系统中承担旋转备用。对于在线机组,旋转备用是最大发电容量和实际发电容量的裕度。对于安装有多台机组的电厂,仅仅在线的机组用于旋转备用。

文献[17]采用0/1变量考虑机组的在线状况,建立了市场环境下的短期水电计划混合整数规划模型。该模型综合考虑了旋转备用和发电计划。文献[18]建立了北欧电能和备用市场中水电的规划模型,目标使得市场中的销售期望收入和规划期末的节水量最大。在建立水电厂模型时,电站的综合运转特性采用分段线性曲线描述,间断点为最优局部效率点,避免了在模型中引入整数变量的麻烦。在现货市场中,假设电厂为价格接受者且已经准确预报了电力现价。在北欧现货市场关闭后,根据实时运行状况和协议,实时市场竞价的有关资料上报给输电系统运营者。无论是需求侧对增加或减少的电力消费的竞价,还是供给侧对发电量的竞价,都要上报市场。每份竞价都要对电价和电量的情况进行详细说明。竞价的结果为一组价格/电量对,在规划模型中采用了线性曲线近似逼近,简化了计算。实时市场的竞价可划分为2类:一类是针对增加发电量或减少用电量的上调竞价;另一类则为针对减少发电量或增加用电量的下调竞价。对于增加发电量或减少用电量的上调竞价的情况,市场参与者会对提高一定发电量或降低一定用电量给出一个报价。此时,最低的报价即为市场电价;对减少发电量或增加用电量的下调竞价的情况,市场参与者也会对降低一定发电量或提高一定用电量给出一个报价。此时,最高的报价即为市场电价。每小时采用了2种电价:一种是上调电价,另一种是下调电价^[19]。这2种电价发生的概率不同,采用价格构想法建立其随机行为。

5 水电厂市场势力

研究市场势力实际上是一种间接研究发电商竞价策略的方式。显然,既然发电厂的竞价策略必须利用市场的不完备性,实际是研究自身能在现有的条件下行使市场势力的机会大小。前面介绍的模型均假设市场参与者没有市场势力,研究的均为完备的市场竞争行为。但是,在目前仅开放发电市场的政策下,尤其是在市场形成初期,由几家发电厂商操纵市场的情况难免发生。研究发电商的市场势力对设计公平竞争的市场至关重要。

过去几年研究火电市场势力的文章已不少,但对水电的研究并不多见。原因可能在于认为水电系统不能行使市场势力,即所有可用水量须全部使用。而且,限制水电生产反而会增加将来的水位,从而降低将来的水价值。然而,这一假设实际上是值得怀疑的。Arellano在研究智利水、火电力系统时发现^[20],水电厂可通过研究不同时段间的需求弹性差行使市场势力,在需求的低弹性阶段不发电而在高弹性时发足够的电。这一结论与一般文献不同。作者认为,既然水电厂在所有可用的来水被利用后仍然可能形成市场势力,那么总水电生产不能作为市场势力的指标,真正相关的变量还是水电调度策略。

为评估水电厂参与市场竞价时的市场势力问题,文献[21]建立了多时段市场模拟模型,模型由动态规划求解,各时段各状态下的决策为多厂商博弈的均衡点,各均衡点由迭代算法求解。通过比较分散调度与统一调度下计算结果的方法评估市场势力。算例表明,从中长期看,水电厂分散调度比统一调度电价更高且波动性大,采取双边合同可明显降低实时电价,减弱水电厂的市场势力。Anderson定义了一个市场分布函数处理价格制定者的问题^[22],该函数给出了不被充分调度竞价电力的概率,但要估计该函数似乎并不容易。Hjalmarsson研究了北欧现货市场的市场势力问题,推测该市场不存在市场势力的原因在于发电厂商低的集中度^[23]。文献[24]提出采用双边合同可以减少市场势力,随着发电商合同量的增加市场势力下降。总体而言,对市场势力的研究目前还很不充分。

6 研究展望及结论

本文总结了国内外电力市场环境下水电厂竞价策略的研究成果。近二十年来对火电的市场化研究为水电进入市场提供了很好的经验和研究方法,但水电的研究加深了对容量和电量、旋转备用以及双边合同等市场元素的理解。纵观国内外由市场实现水电资源优化配置的研究,还面临许多问题,突出表现在6个方面。

a. 需要明确水电在电力系统中的市场地位,真正实现厂、网分开,竞价上网。要对水电处于什么地位参与市场进行比较研究,这包括是单独竞价还是配合火电竞价,是采用集中竞价还是分散竞价等的研究。必须制定出一套切实可行的关于水电进入电力市场的办法和市场交易规则。这涉及到水电厂的调度权问题,如何协调电厂和电网调度中心的利益是首先必须解决的问题。

b. 区域水电厂的竞争模式研究。水资源分布的地理差异决定了水电厂在电力系统中所占的比重不同。目前,我国各大区域均建立了或拟建适合自己的区域电力市场。在联营条件下,研究水电厂竞价策略包括开展水电竞价对电网调度方式、电网安全与稳定以及区域电价的影响分析,提出改进建议与应

对措施。研究水电厂参与市场竞价对区域电力系统安全运行的影响。针对流域内的水电分布特点和水电厂类型差别,分析不同的水电厂竞争方式,并提出适用于区域特点的水电厂竞价与交易方法。

c. 综合利用问题。多数水电厂有综合利用要求。在设计市场竞争规则时,应充分发挥市场配置资源的作用,达到充分利用水电资源的目的,兼顾防洪、灌溉、供水、航运等各方面的社会和经济效益。

d. 梯级水电竞价问题。梯级电厂之间的相互制约增加了水电竞价的复杂性。如果梯级电站都以独立电厂的身份单独参与本地区或本电网的电力市场竞争,可能出现上游电站竞上而下游电站没有竞上,会导致下游电站开闸弃水(无调节能力电站),或者下游电站竞上而上游电站没有竞上,会导致下游电站无水可发,还能同时导致上游电站开闸弃水(上、下游都是径流电站)。显然,这 2 种情况都有悖于利用市场进行资源优化配置和节约资源的目的。针对梯级水电在运行方式和发电量方面紧密联系的特点,很有必要研究隶属于不同利益主体的梯级水电之间的竞价机制,从保证市场交易的公平性、合理性和兼顾资源优化配置的角度,研究梯级水电竞价中的信息披露、梯级水电竞争协调和梯级水库调度原则。

e. 弃水电量问题。研究基于激励机制的弃水电量调度和结算机制,减少弃水,贯彻国家能源政策。

f. 电价预测。电价理论是电力市场的核心理论之一,实时电价是走向电力市场化的基础。在电力市场中考虑水电厂的计划时,寻找合理的描述电价的模型本身是一个具有挑战性的任务。已经开发了许多预测电价的方法,包括时间序列分析、人工神经网络、模糊回归分析和小波预测等。无论哪种方法,为了能用在随机优化框架中,该价格模型应该简单,也应该尽可能地包括了价格过程的统计特性,极端条件的建模对于优化模型的模拟能力更是具有重要意义。研究计算简单、快速可靠的价格模型是应该继续努力的方向。

此外,由于我国已经有了比较好的水电站联合优化调度的研究成果和经验,在此基础上结合电力市场的特点,研究适合于电力市场环境下的流域梯级开发调度模型和算法,将是以后在理论和实践上得以突破的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计(三)水电上网的当量电价法[J]. 电力系统自动化,2003,27(11):1-4
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent(EVE) pricing system and relevant systems design. Part three:Electricity Value Equivalent (EVE) pricing method for hydro - units in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(11):1-4.
- [2] 王良友,赵永良,杨素萍,等. 浅谈水电如何参与竞价上网[J]. 华东电力,2004,32(4):23-26.
WANG Liang - you,ZHAO Yong - liang,YANG Su - ping,et al. Primary discussion on how hydraulic participates in on - grid price bidding[J]. East China Electric Power,2004,32(4):23-26.
- [3] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003.

- [4] 丁军威,胡畅,夏清,等. 竞价上网中的水电优化运行[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):19-23.
DING Jun - wei,HU Yang,XIA Qing,et al. Hydropower optimization in competition with thermal generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(3):19-23.
- [5] 袁智强,侯志俭,蒋传文,等. 水火电系统古诺模型均衡分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(4):17-21.
YUAN Zhi - qiang,HOU Zhi - jian,JIANG Chuan - wen,et al. Analysis of Cournot equilibrium in hydrothermal power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(4):17-21.
- [6] SCOTT T J,READ E G. Modeling hydro reservoir operation in a deregulated electricity market [J]. International Transactions in Operations Research,1996,3(3/4):243-253.
- [7] ALVEY T,GOODWIN D,MA Xing - wang et al. A security - constrained bid - clearing system for the New Zealand wholesale electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(2):340-346.
- [8] PRITCHARD G,ZAKERI G. Market offering strategies for hydro - electric generators [J]. Operations Research,2003,51(4):602-612.
- [9] PRITCHARD G,PHILPOTT A B,NEAME P J. Hydroelectric reservoir optimization in a pool market[J]. Math Program,2004,103(3):445-461.
- [10] PEREIRA M V F,GRANVILLE S,FAMPA M H C,et al. Strategic bidding under uncertainty: a binary expansion approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(1):180-188.
- [11] 赵永龙,常晓青. 电力市场模式下的水电调度探讨[J]. 中国电力,2000,33(11):62-64.
ZHAO Yong - long,CHANG Xiao - qing. Dispatch of hydropower station under power market regime [J]. Electric Power,2000,33(11):62-64.
- [12] 蔡兴国,林士颖,马平,等. 电力市场中梯级水电站优化运行的研究[J]. 电网技术,2003,27(9):6-9.
CAI Xing - guo,LIN Shi - ying,MA Ping,et al. Study on optimal operation of cascaded hydropower plants in electricity market [J]. Power System Technology,2003,27(9):6-9.
- [13] 蔡兴国,林士颖,马平. 现货交易中梯级水电站竞价上网的研究 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):56-59.
CAI Xing - guo,LIN Shi - ying,MA Ping. Study on bidding price of cascaded hydro plants in spot transaction [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):56-59.
- [14] LINO P,BARROSO L A,FAMPA M,et al. Bid - based dispatch of hydrothermal systems in competitive markets [J]. Annals of Operations Research,2003,120(1):81-97.
- [15] CONEJO A J,ARROYO J M,CONTRERAS J,et al. Self - scheduling of a hydro producer in a pool - based electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(4):1265-1272.
- [16] HIRST E,KIRBY B. Technical and market issues for operating reserves [EB/OL]. (1998-10-19). http://www.ornl.gov/sci/btc/apps/Restructuring/Operating_Reserves.pdf.
- [17] NILSON O,SÖDER L,SJELVGREN D. Integer modelling of spinning reserve requirements in short term scheduling of hydro systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(3):959-964.
- [18] OLSSON M,SÖDER L. Hydropower planning including trade-off between energy and reserve markets[C]// IEEE Bologna Power Tech Conference. Bologna,Italy:IEEE,2003:90-97.
- [19] 刘丹,王丽萍,纪昌明,等. 北欧统一电力市场的组成和运营模式介绍(1)物理市场:现货市场、平衡市场和实时市场[J]. 国际电力,2003,7(3):4-7.
LIU Dan,WANG Li - ping,JI Chang - ming,et al. An introduction to the framework and operation model of nordic uniform power market(1): the physical market — elspot,elbas and real - time market [J]. International Electric Power for China,2003,7(3):4-7.
- [20] ARELLANO M S. Market power in mixed hydrothermal electric systems:an application to Chile's deregulated industry [EB/OL]. (2003-11-25). <http://www.ios.neu.edu/ioc2004/papers/S5g3.pdf>.
- [21] 刘瑞丰,王秀丽,朱振青. 水电厂参与市场竞争下的市场模拟及

其市场势力削弱[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 21-24.

LIU Rui - feng, WANG Xiu - li, ZHU Zhen - qing. Hydrothermal power market simulation and the market power mitigation of hydropower plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 21-24.

[22] ANDERSON E J, PHILPOTT A B. Optimal offer construction in electricity markets[J]. Mathematics of Operations Research, 2002, 27(1): 82-100.

[23] HJALMARSSON E. Nord pool: a power market without market power[EB/OL]. (2000-07-15). <http://swopec.hhs.se/gunwpe/papers/gunwpe0028.pdf>.

[24] KELMAN R, AUGUSTO L, BARROSO N, et al. Market power assessment and mitigation in hydrothermal systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 354-359.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

曾勇红(1973-), 男, 湖北仙桃人, 在站博士后, 研究方向为电力市场和水库优化调度(E-mail: zeng_yonghong@163.com);

王锡凡(1936-), 男, 河北安平人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统分析、规划及电力市场。

Survey on bidding strategies of hydro units in electricity market

ZENG Yong-hong, WANG Xi-fan

(College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to characteristics of hydro units, bidding strategies and market power in pool market are summarized and remarked. As a heritage of vertical management mode, hydropower plants have to gear bidding strategies to assort with the operation of thermal power plants in interim period, which underestimates the efficiency of hydro units. While in completely competitive mode, an optimal operational model of reservoir in spot market is necessary. An improved model is possible to represent the transmission network restraint, unit commitment and system uncertainties. In order to harmonize benefits, cascaded plants of same firm can be aggregated as a bidding unit while the revenue allocation among different firms can be regulated by wholesale water market. The research on market power reveals that, hydro power producers may exercise market power by exploiting the price elasticity of demand across periods: allocate little supply to low periods and much to high periods. Further researches on the market position of hydropower plant, the competitive mode of local hydropower plant, the comprehensive utilization, the bidding strategy of cascaded hydropower plants, the spilled energy, the electricity price forecast, and the dispatch model and algorithm of cascaded hydroelectric plants in electricity market are needed.

This project is supported by the Special Foundation of the National Basic Research Program of China (2004CB217905).

Key words: bidding; hydropower plant; day-ahead market; reserve market