

基于博弈论的区域小水电虚拟电交易研究

陈岭¹ 蒋乐² 李俊³ 魏震波²

(1. 成都电业局, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;
3. 国家开发银行重庆分公司, 重庆 400023)

摘要: 区域间能源资源分布不均衡和经济发展及电力消费水平的不均衡, 导致小水电生产的大量优质低价电能需要通过大网外售; 而地方电网公司和省级电网公司的利益冲突, 导致电力外送困难, 未达到资源的优化配置。在虚拟电概念基础上, 通过博弈建模, 分析省级电网公司、大用电工业企业和代表小水电的地方电网公司三方的利益关系; 通过模型求解得出, 当小水电销售价格低于国网电价一定程度, 且电力可靠性相差不大时, 通过虚拟电交易不仅能引入竞争解决低价电售电难的问题, 而且能促进地方电网提高其电力可靠性及安全性, 并提高电力资源利用效率和优化电力资源配置。算例结果表明: 虚拟电交易是解决当前电力资源优化配置和合理利用的有效途径。

关键词: 虚拟电; 虚拟电交易; 博弈; 小水电

Abstract: With the unbalanced distribution of regional resources and the imbalance in economic development and electricity consumption, a large amount of electricity with high quality and lower price from small hydropower can only sell out through large power grid. And the conflicts between local and provincial power grid make the electricity with lower price from local small hydropower difficult to be sold out, leading to the non-optimal allocation of resources. The term of "virtual electricity" is proposed and it is believed that it is an effective way for the optimal allocation and rational utilization of electricity resources by developing virtual electricity trade. A game-based model is set up to analyze the profit relationships among local power grids, provincial power grid corporations and major electricity customers. The result of solving the model shows that when the selling price of small hydropower lowers to a certain extent and the reliability differs a little from provincial power grid, the virtual electricity trade not only can solve the problem of difficult-selling of electricity with lower price, but also can promote the reliability and safety of local electric power grids and improve the utilization efficiency of small hydropower resources.

Key words: virtual electricity; virtual electricity trade; game theory; small hydro-power

中图分类号: F407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)02-0037-04

0 引言

历史原因导致中国许多地方存在着地方政府牵头建设的小水电和地方电网, 这些小水电和地方电网在实现农村电气化建设、提高当地居民生活水平、促进当地经济发展起到了重要作用。近些年, 由于小水电的进一步开发及地方电网公司和省级电网公司的利益冲突, 导致小水电生产的大量电能无法通过大网外售。但在地区之间, 小水电窝电的同时, 又存在电力不足现象。例如西部水电大省四川^[1], 2004年全省建成中小水电站4 253座, 年发电量达到210.90 GWh, 同时全省中小水电站的窝电量高达43.60 GWh, 占到了总发电量的20%以上; 另一方面, 枯水期四川主网电力供需缺口却在30 000 GWh至40 000 GWh, 丰水期也难改缺电困局。小水电窝电的原因包

括小水电自身的局限(来水量不均匀)和电力需求负荷的波动性(负荷峰谷变化)等, 但大小网之间的利益冲突和大网的强势垄断地位是造成其现状的主要原因。优质可再生能源生产的低价电能未能充分利用, 不仅不符合国家节能调度政策, 而且使资源未达到优化的配置。因此, 如何处理好省级电网公司与代表地方小水电企业的地方电网之间的关系, 促进小水电发展, 使其成为水资源丰富地区地方产业优势并带动相关产业的发展, 是各级政府及相关电力企业共同关注的重大课题。

文献[2]在分析了非合作状态下省级电网公司和地方电网公司利益冲突的基础上, 提出了建立合作联盟是解决大小电网矛盾的有效途径, 并采用shapley值来分配合作得益; 文献[3]在合作博弈的基础上探讨了地方电力处理大小电网矛盾的体会。以上文献中: ①都是从合作博弈角度讨论电能输送过程的

各方利益冲突;②考虑问题出发点全部基于实际电能必须通过输电网售出或买入。

电能是生产生活的基础性资源,在以实体方式输送过程中由于各方利益协调问题而受到阻碍时,从经济学的角度,将电能以虚拟的形式“传输”,不仅可以补充实体传输的不足,而且可以缓解水电资源分配不均和电力消费水平不均的矛盾。

1 虚拟电、虚拟电交易及其含义

虚拟电概念借鉴于虚拟水、虚拟土概念,并考虑电能自身的特点进行改进。虚拟水是国外20世纪90年代提出的新概念,随后引入中国^[4-6],获得商品和服务所需要的水资源数量。虚拟水不是真正意义上的水,而是以“虚拟”的形式包含在产品中的“看不见”的水,因此也被称为“嵌入水”和“外生水”,它以“无形”的形式寄存在其他的产品中,相对于实体水资源而言,其便于运输的特点使贸易变成了一种缓解水资源短缺的有用工具。因此,从经济学的角度解决水电资源分配不均及电力传输阻塞问题,虚拟电有着非常重要的现实意义。笔者认为,虚拟电是指在商品和服务生产过程中所需要的电力资源数量。虚拟电并非真正意义上的电,是指以“虚拟”的形式隐形于产品中的电。虚拟电的特征主要表现为:①非真实性。顾名思义,虚拟电不是真正意义上的电,而是以“虚拟”的形式包含在产品中,是“看不见”的电。②社会交易性。虚拟电是通过商品交易即贸易来实现的,没有商品交易或服务就不存在虚拟电。③便捷性。基于实体电贸易中的传输瓶颈,虚拟电以“无形”的形式存在于其他商品中,其易于运输的特点使贸易变成了一种可以缓解电力资源短缺的有用工具,并为充分利用可再生能源发电及传输提供了有效途径。

2 产品虚拟电的量化方法

产品虚拟电主要指在工业产品生产和加工过程中所需用的电量。虚拟电的计量方式相对虚拟水略有不同。对于虚拟水而言,目前计算农作物产品虚拟水含量的方法主要有两种^[5,6]:一种是Chapagain和Hoekstra提出的研究不同产品生产树的方法;另一种是Zimmer和Remault基于对不同产品类型进行区分

的计算方法。虚拟电主要是针对工业产品。工业产品的虚拟电计算总的来说应包括工业产品的生产、运输及服务全过程用电。在工业产品生产、运输和服务过程中,电能的消耗主要有以下几部分:原材料和燃料生产用电、原材料和燃料运输用电、生产过程中机械损耗折合生产用电、生产人员生产生活用电、生产过程中的服务性用电。根据工业产品生产中电能及虚拟电的消耗途径,从生产者角度设定虚拟电的计算公式如下。

$$W_v = W_p + W_l W_o W_l + W_s \quad (1)$$

$$W_{vpp} = W_v / Q \quad (2)$$

其中, W_v 为某工厂年产工业产品所含虚拟电总量; W_p 为年原材料和燃料生产用电; W_l 为年原材料和燃料运输用电; W_o 为年生产过程中机械损耗折合用电; W_l 为年生产人员生产生活用电; W_s 为年生产过程中的服务性用电; W_{vpp} 为单位产品虚拟电的含量; Q 为企业年产量。

3 虚拟电交易模型

3.1 模型假设

1) 假设有 m 个工业用电企业, W_{vpp}^i 表示第 i 个企业的产品单位虚拟电含量, Q_i 表示第 i 个企业的年产量。

2) 不妨设电网公司的电力供给曲线为一条直线。省级电网公司的电力供给函数 $P_1 = a_1 + b_1 W_1$, 地方电网公司的电力供给函数 $P_2 = a_2 + b_2 W_2$ 。由于地网(地方电网,下同)电力公司主要是小水电,相对于大型水电或火力发电,投资较小,即 $a_2 < a_1$;且一般情况下,地方电网公司的边际发电成本更小,即 $b_2 < b_1$,这也是区域小水电低价形成的原因,在此不再详述。如图1所示。

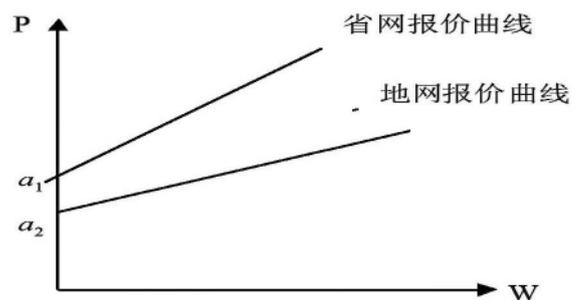


图1 电网公司电力报价比较

- 3) 假设市场完全竞争且信息对称。
- 4) 假设企业在省网(省级电网,下同)供电区域

或在代表小水电的地网供电区域内产量不变。

5) 假定社会总工业用电量不变,即省网供区的工业用电量为 W_1 ,地网供区的工业用电量为 W_2 ,而总的工业用电量 $W_{total} = W_1 + W_2$, W_{total} 总量不变。

模型分为企业用户、省级电网、小水电(地方电网)三部分。

3.2 企业用户

无论对省网还是地方电网,对企业用户而言,都不能参与电价的制定,只能被迫接受电价,但能通过对省网电价和地网电价的高低比较以及电能可靠性、电能质量等其他因素的综合评价,确定企业选址在省网或地网的供电区域。

企业用户 i 在给定的电力报价函数情况下,根据自身利益最大化,确定企业选址。

$$\Delta S_i = Q_i W_{pp}^i (P_1 - P_2) + \Delta T_i - \Delta F_i \quad (3)$$

$$\Delta S_i \begin{cases} > 0 & \text{企业选址在地网供电区域} \\ \leq 0 & \text{企业选址在省网供电区域} \end{cases}$$

其中 $Q_i W_{pp}^i (P_1 - P_2)$ 表示企业 i 选址不同导致企业生产成本中电力成本的差异; ΔT_i 表示企业 i 在地网供电区域内享受的比省网多的政府转移支付,包括税收的优惠、政策的优惠等; ΔF_i 表示企业 i 在地网供电区域增加的费用,如原材料、产品运输中增加的费用。

因此,考虑电价的原因而导致的总的虚拟电量为愿意选址在地网供电区域内的企业的生产用电量总和。

$$W_T = f(P_1 - P_2) = \sum_{i=1}^n Q_i W_{pp}^i \mid (\Delta S_i > 0) \quad (4)$$

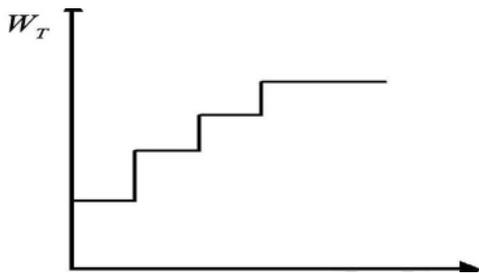


图2 总虚拟电量与电价差的关系

即,总的虚拟转移的电量 W_T 为含 ΔS_i 的条件函数,由于 ΔS_i 与 $(P_1 - P_2)$ 有关,因此 W_T 为 $(P_1 - P_2)$ 的条件分段函数,当 $(P_1 - P_2)$ 越大,即小水电电网电价与省网电价差值越大时,愿意选址在地网供区的企

业越多,实现的虚拟电转移量 W_T 越大,如图2所示。

3.3 省级电网

对省级电网而言,由于国家控股,其利润的变化直接影响税收的变化,同时,省网供电区域的负荷大小的变化也影响着电网公司对电网建设和电网投资的变化。所以,省网公司应是在电网潮流约束和投资约束条件下追求自身利益的最大化,其目标函数为

$$\text{MAX}(R_1) = P_1(W_1 - W_T) - C_1(W_1 - W_T) - I_1 - T_1 + F \quad (5)$$

其中 I_1 为电网建设投资,建设投资量应该是电网负荷量的增函数。

$$I_1 = \alpha_1 + \beta_1(W_1 - W_T) \quad (6)$$

其中,缴纳的税收 T_1 是企业利润的增函数。

$$T_1 = \nu_1 + \omega_1 R_1 \quad (7)$$

其中 F 为可靠性补偿,即省网公司协助地网公司解决电能可靠性差而获得的收益, F 为地方电网公司销售电量的增函数。

$$F = \theta(W_2 + W_T) \quad (8)$$

约束条件有省级电网电价约束、发电机出力约束、潮流约束、电量约束。

$$\begin{cases} C_1 < P_1 \leq P_{MAX} \\ G_{MIN} < G_i \leq G_{MAX} \\ L_i < L_{i,max} \\ W_1 = \sum_{i=1}^m G_i \end{cases} \quad (9)$$

电力不仅具有商品的属性,同时也具有公共品的属性,因此,政府应对电力实行最高限价 P_{MAX} ,最高限价可用 Ramsey - Boiteux 公用品定价模型制定^[10]。考虑 $W_T \geq 0$,即相对之前负荷 $(W_1 - W_T) \leq W_1$,所以实际上发电机出力约束、输电约束和平衡约束都是松约束。将式(4)、(6)和(7)代入式(5),并考虑约束条件式(9)整理得式(10)。

由式(10)可知,在 P_2 一定的情况下,省网公司问题的实质是电价在一定范围内变化时,关于 P_1 的开口向下的二次分段函数的极大值求解问题。

3.4 小水电(地方电网)

由于地方电网公司和小水电企业一般属于当地政府主办的公共事业,或者由当地居民集资兴建的,

$$\left. \begin{aligned} R_1(P_1, P_2) &= \frac{P_1 \cdot W_T}{1 + \omega_1} + \frac{P_1 W_1 + (C_1 + \beta_1 + \theta) \cdot W_T}{1 + \omega_1} - \frac{C_1 W_1 + \alpha_1 + \beta_1 W_1 + \nu_1 - \theta W_2}{1 + \omega_1} \\ C_1 &< P_1 \leq P_{MAX} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

地方政府的有关意志以及当地居民的利益一般都会通过地方电网公司来反映,因此,将小水电抽象为代表地方政府利益的地方电网公司和代表当地居民利益的地方电网公司。其目标函数为

$$\begin{aligned} \text{MAX}(R_2) &= P_2(W_2 + W_T) \\ &- C_2(W_2 + W_T) - I_2 - T_2 - F \end{aligned} \quad (11)$$

其中 I_2 为电网建设投资,建设投资量应该是电网负荷量的增函数。

$$I_2 = \alpha_2 + \beta_2(W_2 + W_T) \quad (12)$$

缴纳的税收 T_2 是企业利润的增函数。

$$T_2 = v_2 + \omega_2 R_2 \quad (13)$$

F 为可靠性补偿,对地网公司而言,是依靠省网公司解决电力可靠性问题而支付的成本。

约束条件同前。

$$\left\{ \begin{aligned} &C_2 < P_2 \leq P_1 \\ &g_{\text{MIN}} < g_i \leq g_{\text{MAX}} \\ &l_i < l_{i,\text{max}} \\ &W_2 + W_T = \sum_{i=1}^m g_i \end{aligned} \right. \quad (14)$$

将式(4)、(12)和(13)代入式(11),考虑约束条件式(14)简单数学推导可得

$$\left. \begin{aligned} R_2(P_1, P_2) &= \frac{P_2 \cdot W_T}{1 + \omega_2} + \frac{P_2 W_T - (C_2 + \beta_2 + \theta) \cdot W_T}{1 + \omega_2} \\ &- \frac{(C_2 W_2 + \alpha_2 + \beta_2 W_2 + v_2 + \theta W_2)}{1 + \omega_2} \\ C_2 < P_2 \leq P_1 \cdots \cdots f(P_1 - P_2) &= \sum_{i=1}^m g_i - W_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式(15)知,在 P_1 一定的情况下,代表小水电的地方电网问题的实质是在潮流约束下,电价 P_2 在一定范围内变化时,关于 P_2 的开口向下的二次分段函数的极大值求解问题。

3.5 模型求解

对式(10)利用拉格朗日极值法求极值,考虑约束条件,得省网公司最优电价为

$$P'_1 = f(P_2) = \left\{ \begin{aligned} &C_1 \quad C_1 \geq P \\ &P_1 \quad C_1 < P_1 \leq P_{\text{MAX}} \\ &P_{\text{MAX}} \quad P_1 > P_{\text{MAX}} \quad P_1 = (W_1 - \\ &(W_T) \cdot \frac{\partial P_1}{\partial W_T} + C_1 + \beta_1 + \theta \end{aligned} \right. \quad (16)$$

对方程(15)利用拉格朗日极值法求极值,考虑

约束条件,得地方电网公司最优电价为

$$P'_2 = f(P_1) = \left\{ \begin{aligned} &C_2 \quad C_2 \geq P_2 \\ &P_2 \quad C_2 < P_2 \leq P_1 \\ &P_1 \quad P_2 > P_1 \quad P_2 = -(W_2 + \\ &(W_T) \cdot \frac{\partial P_2}{\partial W_T} + C_2 + \beta_2 + \theta \end{aligned} \right. \quad (17)$$

再联解式(16)和(17),即可得到完全信息下省网公司和地网公司的博弈达到均衡时的最优解组合 (P_1^*, P_2^*) 。将 (P_1^*, P_2^*) 代入式(4),求得均衡时虚拟电交易总量 $W_T^* = f(P_1^*, P_2^*)$ 。同时,将 (P_1^*, P_2^*) 分别代入式(10)和(15),均衡时省网公司的利润为 $R_1^* = R_1(P_1^*, P_2^*)$,地网公司的利润为 $R_2^* = R_2(P_1^*, P_2^*)$ 。

4 结论

通过以上模型可得到如下结论:①所提模型的实质是通过虚拟电交易,增加了地方电网和小水电销售电量,而增加的利润空间通过可靠性补偿系数 F 部分转移给省级电网公司,使双方实现了利润最大化。模型既解决了窝电问题,又淡化了电力传输过程中地网公司和省级电网公司之间的利益冲突,使可再生能源得以充分利用,资源达到了优化配置;②如果市场完全竞争,当地方电网和省级电网的电价差越大时,虚拟电转移量越大,符合比较优势理论。虚拟电交易的实行,在一定程度上缓解了电力输送压力,也是换一种形式对“西电东送”政策的补充;③地方电网和省网双方在博弈过程中各自如何定价就成了决定虚拟电交易量大小的关键因素;④虚拟电交易具有很强的可操作性和可持续性,这对大型输电工程项目来说是一种环境上的替代方法,从经济效益和环境效益角度来看,都具有明显的优越性,也为在思路解决水电资源配置予以重新审视。

虚拟电交易进一步将电力资源管理问题从单个行业拓展到整个社会经济系统,产品中的虚拟电的量化可以使人们意识到生产各种产品所需要的实际耗电量,增强生产过程中对消耗电力资源系统的认识,促使生产者增强节能意识,促使消费者优化消费结

(下转第64页)

动作的硬后备,消除了机组的安全隐患。

其次,在油枪调试中也有些小优化。由于设备老化,油角三用阀在吹扫位置已经不能保持很长时间(原设计为30s),这样使得每次程控停止油角,都存在无法退出油枪的问题。经过多次实践,对吹扫时间稍微做了些调整,优化了油角的程停逻辑,使得程控操作简单实用,降低了运行人员的劳动强度。在RB投油方面,也根据实际情况优化了自动投入BC层油的程序。主要体现在RB发生时,BC层油的顺控程序能自动走两遍,这样可以避免RB工况时突然投油,很多油枪点火枪存在卡涩导致油角跳闸不能投入油角的问题,增强了RB工况时机组的响应能力,使得BC层油枪能在RB工况时尽可能多的起到助燃锅炉的作用。

4 结 语

广安31号机FSSS系统改造,从安装接线、调试点火到并网发电,全部工作历时35d。31号机FSSS

系统改造完成后,彻底解决了原老系统存在的设备老化、抗干扰能力差、故障率高、运行风险大等问题;同时在软硬件设计方面又尽量做到与原先的设计保持一致,操作习惯保持一致。在个别软件逻辑方面又做出了优化,提高了机组的控制水平。这些工作的完成都为以后机组安全稳定继续运行打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 周姚芳. 三种典型MFT控制回路可靠性探讨[J]. 浙江电力, 2009(4): 48-51.
- [2] DL/T 1091-2008, 火力发电厂锅炉炉膛安全监控系统技术规程[S].

作者简介:

朱 静(1974),女,电厂热控专业工程师,主要从事电厂热工检修与维护工作;

崔超超(1984),男,工程师,主要从事电厂现场总线与控制技术研究;

肖 胜(1978),男,工程师,主要从事电厂现场总线与控制技术研究。

(责任编辑:2011-12-12)

(上接第40页)

构,提高电力资源的使用价值。

参考文献

- [1] 王代林. 四川大小电网之痒[EB/OL]. (2004-07-07)[2011-11-16] <http://www.sc.xinhuanet.com/content/2004-07/07/content->
- [2] 邱永志,王先甲. 省级电网公司与地方电网公司基于供区整合的合作博弈行为研究[J]. 四川水利发电, 2006, 25(2): 101-105
- [3] 何永祥,吴杰后. 国家电网与地方电力开展合法竞争的体会[J]. 四川电力技术, 2005(3): 61-62.
- [4] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260-265.
- [5] 龙爱华,徐中民,张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹[J]. 冰川冻土, 2003, 259(6): 692-699.
- [6] 徐中民,龙爱华,张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 861-869.
- [7] 罗贞礼,黄璜. 区域土地资源可持续利用的社会化管理研究——兼论虚拟水战略与区域粮食安全问题[C]//

2004 全国土地资源态势与持续利用学术研讨会论文集. 昆明: 云南科学技术出版社, 2004: 301-307.

- [8] 罗贞礼,龙爱华,黄璜,等. 虚拟水战略与区域土地资源可持续利用的社会化管理[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 624-631.

- [9] 牛树海. 虚拟水分析理论和方法[J]. 华侨大学学报, 2004, 25(3): 331-333.

- [10] 任玉珑,李俊. 基于博弈控制的需求侧分时电价研究[J]. 科技管理研究, 2006, 2(2): 180-183.

作者简介:

陈 岭(1975),女,工程师,本科,从事电力企业管理研究;

蒋 乐(1975),男,工程师,博士研究生,研究方向为电力系统分析;

李 俊(1981),男,博士,从事电力市场、电力经济评估等方面的研究工作;

魏震波(1978),男,讲师,博士,研究方向为电力系统分析。

(收稿日期:2011-12-22)