

节能电力市场设计初探

耿建¹, 高宗和¹, 张显², 文福拴³, 杨争林¹, 曹荣章¹, 严小文¹, 姚建国¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210003; 2. 国家电网公司交易中心, 北京市 100001)

(3. 华南理工大学电气工程学院, 广东省广州市 510641)

摘要: 节能降耗对中国电力市场运营和发展提出了新的挑战。探讨了节能优先、能耗电价、能耗约束等 3 种电力市场的解决方案。提出能耗约束的电力市场模式, 基于年度、月度中长期电力市场, 建立了市场竞价模型, 提出了简易竞价算法。算例模拟表明能耗约束是一种有效的电力市场能耗解决方式, 在电力市场中能够兼顾市场竞价和节能降耗目标的实现, 同时也便于节能降耗的实施。

关键词: 节能降耗; 能耗约束; 市场机制; 电力市场

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

电力市场运营模式是电力市场研究领域的一个重要课题^[1-10], 节能降耗是中国宏观能源利用面临的一个新问题, 同时也是中国电力市场运营和发展所面临的一个新的挑战。从理论上讲, 节能降耗和电力市场化运营在优化资源配置、提高资源利用效率的目标上是一致的。但是, 在中国电力市场实施初期, 由于各种原因, 导致市场与节能的目标并不一致, 即按照能耗成本优化发电资源和按照市场价格优化配置资源两者并不一致。本文在简要分析了节能问题对电力市场影响的基础上, 提出了考虑节能问题的新的电力市场设计方案, 建立了节能电力市场的竞价模型和算法。虽然只限于年度、月度的电量市场, 但研究方法和思路可为其他市场研究提供参考。通过简单算例分析, 说明了几种方案的特点。

1 节能问题对电力市场的影响

提高能源使用效率, 节约能源, 减少环境污染, 促进能源和电力结构调整, 是中国现阶段能源利用和电力工业发展的主题。“节能降耗”从能源综合社会价值的角度对电力市场发展提出了新的要求。当前, 电力市场设计均以微观“社会效益最大化”为基础, 即市场买卖双方间的社会剩余最大化。从理论上讲, 节能与市场竞争是一致的, 即能耗低, 生产成本低, 具备竞争优势, 在市场中能够优先被利用。因此, 通过市场能够起到资源优化配置的作用。然而, 由于诸多因素, 通过市场并不能充分发挥节能降耗的目标。主要表现在以下几个方面:

1) 投资成本。电力建设投资成本巨大, 中国实行的短期还贷政策是作为经济高速发展的发展中国家区别于发达国家的特点所决定的。投资成本分解到生产成本中, 使得低煤耗机组生产成本增加。

2) 节能环保成本。通常新建的大容量机组均配备了节能环保设备, 以降低能耗、减少排污, 但这些投资使得单位电量生产成本增加。

3) 高能耗小机组。这些机组虽然能耗高, 但大多已经完成了还贷任务, 其总生产成本较低。

4) 新能源技术成本。可再生能源(如风电、地热发电等)能耗低, 但成本高, 在市场中也不占优势。

上述问题导致机组能耗与市场价格相分离, 这是导致当前中国电力市场与节能降耗目标不一致的一个根本原因, 也是中国电力市场发展所面临的一个新课题。

国外电力工业在处理节能环保问题方面, 根据各国的能源结构采取了不同的措施。概括起来可以分为 2 类: 一是在市场化运营前, 按照宏观能源发展规划, 采用法令和投资补偿的方式, 逐步、有计划地将化石类发电资源向水电、核电等低能耗资源结构转变, 如德国、丹麦等国家^[11-12]; 二是在市场化运营后, 结合市场机制, 配合立法、财税补贴等手段, 实现节能环保目标, 如英国、美国采用投资或税收补偿鼓励新能源建设, 在市场中规定必须购买一定比例的可再生能源, 并制定了排放指标, 在市场中开辟了排放权交易品种^[13-14], 荷兰建立了绿色标签机制(green label system), 促进绿色能源的交易^[15]。

相比而言, 国外电力市场在处理节能环保问题上有 2 个特点: 一是主要面向新能源, 并以政府补贴形式为主; 二是主要目的在于环保减排, 而对节能问题关注较少, 这主要是因为其能源结构大多以水电、

核电为主,以及其资源利用相对成熟的缘故。而中国在未来一定时期内仍以煤电为主,且高能耗小机组还占据了一定比例,因此对中国来说节能问题相对尤为突出。以下就节能问题探讨电力市场的解决方案,关于环保减排问题有待进一步的后续研究。

2 节能问题在电力市场的解决方案探讨

2.1 节能优先模式

电力市场中处理节能问题,一种最直接的方法就是采用能耗优先权方式。该方式基于2条规则:①能耗排序;②低能耗机组优先。首先按照机组的能耗数据将机组按能耗由低到高排序,然后根据负荷需求,按能耗排序由低到高分配机组电量,直到满足负荷需求为止。其中,能耗数据在市场中不再作为私有数据,而是作为公开信息加入市场竞争。能耗数据可以按照机组设计参数确定或通过市场中立机构实测确定。

该方式可以直接把系统的能耗降低到最低程度,按该方式设计电力市场,能够迅速解决节能问题。事实上,该方式修改了电力市场的竞价目标,把社会效益最大化或购电费用最低改为能耗最低,即由式(1)变为式(2):

$$\min P = \sum_{i=1}^I b_i Q_i \quad (1)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^I c_i Q_i \quad (2)$$

式中: i 为电厂序号; Q_i 为电厂 i 的投标电量; b_i 为投标价格; c_i 为能耗成本系数。

为了便于说明,本文采用按报价优化的方式。

节能优先的模式能有效降低系统能耗,但也会带来一些新问题:①将以价格为导向的市场调节机制变为以耗量为指标的集中调度体制,价格失去市场信号作用。②社会剩余分配问题。按耗量竞标和按价格结算相分离,容易导致买卖双方的结算纠纷。③信号误导。该方式下耗量决定是否中标,而报价决定收益,长此以往会误导发电厂为降低煤耗不惜代价投资,只要中标这些投资会由市场收回。

基于以上分析,节能优先方式不适合作为电力市场的主要模式,但其有效控制能耗的特点可以应用于日前市场、实时市场或辅助服务市场等少量电量竞争的市场,也可以作为特定能源(如风电、径流式水电机组)的调度原则。

2.2 能耗惩罚电价模式

在处理电力市场可变成本和固定成本问题上,文献[8]从容量成本的角度,提出了“当量电价”的思想,为处理能耗问题提出一种思路。能耗惩罚电价的方式与此类似,根据各机组的能耗参数,在其报价

的基础上增加一项能耗惩罚项,形成考虑能耗问题的综合报价,然后再参与市场竞争。竞价目标如下:

$$\min P = \sum_{i=1}^I (b_i + k_i) Q_i \quad (3)$$

式中: k_i 为电厂 i 的耗量惩罚电价,机组能耗低则 k_i 取值小,反之亦然。

与式(1)相比,式(3)在电厂报价 b_i 的基础上,叠加了一个罚电价系数,作为竞价依据。

该方式将节能问题和市场机制相结合,在市场机制下能够起到约束高耗能机组市场优势的作用,并且易于应用到辅助市场、日前市场、系统调度和双边交易等领域中。但是,不同机组的罚电价如何确定、能耗能够降到何种程度是2个棘手的问题,在这方面还需深入研究。

2.3 能耗约束模式

能耗约束模式是在现有市场模式中将系统总能耗作为约束条件,市场竞价需满足该约束条件:

$$\min P = \sum_{i=1}^I b_i Q_i \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{I_w} c_i Q_i \leq C_s \quad (5)$$

式(5)表示总能耗约束,其中 I_w 为中标电厂集, C_s 表示设定的总能耗指标。 C_s 可以在以往同期调度或无能耗约束竞价能耗总量的基础上降低一个百分率构成,也可以用降耗率表示。

在中国目前的年度、月度以电量为标的的市场竞价中,该方式在市场竞价的同时,控制年度、月度的总降耗效果,把握电力市场的降耗目标。

能耗约束方式将系统能耗作为一个约束条件引入市场模型,一方面起到节能降耗的目的,另一方面兼顾了市场机制的实现,在保证降耗的前提下,优化资源配置使总购电费用最低。同时,也给出了节能的尺度,便于量化控制,在实施过程中,通过修改降耗约束,可以逐步起到节能降耗的作用,便于长期节能目标的分步实现。

3 节能电力市场的竞价模型和简化算法

目前,中国电力市场交易按时间周期划分,有年度交易、月度交易、短期交易、日前交易等主要形式,其中绝大部分电能通过年度交易、月度交易来完成,这2种交易以电量优化分配为主要目标,并以中长期合同的形式在调度计划中分解实施。可以说年度、月度的电量市场确定了市场竞争的基本格局。下文在年度、月度市场下,建立考虑节能约束的市场竞价模型。

3.1 市场竞价模型

目标函数和约束条件如下:

$$\min P = \sum_{i=1}^I b_i Q_i \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{I_W} Q_i = Q_L \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{I_W} P_i \geq P_{Lmax} \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{I_W} c_i Q_i \leq C_s \tag{9}$$

式中： Q_L 为负荷需求电量； P_i 为电厂*i*的可用容量； P_{Lmax} 为最大负荷电力； c_i 为电厂的能耗系数。

该模型以市场购电费用最低为目标(式(6))，约束条件为电量平衡约束(式(7))、电力平衡约束(式(8))、能耗约束(式(9))。

上述竞价模型是在现有市场模型(式(6)~式(8))的基础上，增加了能耗约束(式(9))。

3.2 简易算法

上述模型可以通过以下方式分步求解：

1)无节能约束竞价。首先不考虑节能约束，以购电费用最低为目标，通过价格排队的算法确定中标电厂及电量，同时计算出全系统能耗成本。

2)节能约束优化。检查系统总能耗是否满足能源约束，不满足则在非中标电厂中确定置换电厂集合，条件是其能耗系数小于中标电厂的最大能耗系数。然后在中标电厂和非置换电厂集中组合优化，可采用动态规划算法，优化购电费用和能耗约束。

4 算例分析

4.1 算例数据

以 RTS 数据^[16]为基础进行分析，算例假定4家发电公司，共10台机组，总装机容量为1 181 MW，最大负荷水平950 MW，系统备用水平为19.55%。以该地区某月度市场为研究对象，考察不同竞价模式下系统总购买费用及能耗费用，系统总需求电量740 GW·h。各机组的容量、报价水平、能耗参数、投标电量见附录A表A1，设定发电商B的第4台机组为典型的低能耗高价格机组。

4.2 算例模拟

以3种市场模式进行模拟：

1)无节能约束竞价模式。当不考虑能耗约束时，仅以购电费用最小为目标函数来确定中标电厂及其电量，可采用排队法优化求解。

2)节能约束竞价模式。假定月度系统总能耗在无节能约束模式的基础上下降4%，利用上述模型和方法确定中标电厂及其电量水平。

3)能耗最低竞价模式。以系统总能耗最小为目

标函数，确定中标电厂及其电量，可采用排队法优化求解。

3种竞价模式下各机组的中标电量及系统的总购电费用、总能耗费用见附录A表A2。

4.3 市场分析

表1给出了上述3种方式下的购电费用和能耗比较。可以看出：按照纯价格竞争的方式，市场购电费用最低，但能耗高，这主要是由高能耗机组低价格的问题引起的。在市场环境下，当利用该模式来确定机组中标电量时，虽然系统总购电费用最低，但能耗较高，不利于节能。采用考虑节能约束的竞价模式，此时既满足了节能约束条件，又满足了一定的经济性。按该方式确定机组中标电量，此时能耗费用在规定范围之内，购电费用较前者升高。当加入能耗约束后，能耗降低，市场购电费用有所增加，这部分增加的费用是因为引入能耗约束所产生的，在市场中可称之为社会能耗成本，这部分成本应当由高能耗用户承担。采用能耗最低的竞价模式，以能耗最低为目标来确定机组发电量，此时总能耗费用最低，但购电费用却最高。虽然能耗降低，但市场购电费用最高，市场效率降低。

表1 不同竞价模式下的市场费用比较
Table 1 Payment comparison of different market models

竞价模式	总购电费用/万元	总能耗费用/万元
无节能约束竞价	16 811.84	6 267.98
节能约束竞价	18 376.91	5 977.64
能耗最低竞价	19 588.56	5 861.12

5 结语

节能降耗对中国电力市场运营提出了新的挑战。针对节能降耗问题探讨了节能优先、能耗电价、能耗约束3种电力市场的解决方案及其特点。其中，能耗约束的方式，在电力市场中能够兼顾市场竞价和节能降耗目标的实现，同时也便于在电力市场中分步量化实施。算例模拟表明，能耗约束是一种有效的电力市场能耗解决方式。进一步通过算例模拟，分析了引入节能约束后的市场效益变化。

节能降耗从能源综合社会价值的角度对电力市场发展提出了新的要求。它涉及电力市场的各个领域，本文仅就电量市场进行了初步探讨，还需要进一步深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 文福拴,吴复立,倪以信.电力市场环境下的发电容量充裕性问

- 题. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 16-22.
- WEN Fushuan, WU F F, NI Yixin. Generation capacity adequacy in the deregulated electricity market environment. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 16-22.
- [2] 胡朝阳, 甘德强, 沈沉. 英格兰电力市场的能量市场和实现技术分析. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 31-35.
- HU Zhaoyang, GAN Deqiang, SHEN Chen. USA New England energy market: design and implementation. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 31-35.
- [3] 沈瑜, 夏清, 康重庆. 中国电力市场模式的探讨. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 6-9.
- SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chongqing. Discussion about mode of China power market. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 6-9.
- [4] 耿建, 王锡凡, 陈皓勇. 发电侧电力市场迭代竞价机制. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 1-6.
- GENG Jian, WANG Xifan, CHEN Haoyong. Iteration bidding mechanism of generation power market. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 1-6.
- [5] 王博学, 王锡凡, 张显. 电力备用市场的竞价模型. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 7-11.
- WANG Jianxue, WANG Xifan, ZHANG Xian. Bidding model of power reserve market. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 7-11.
- [6] 张显, 王锡凡, 王博学. 分段交易在电力市场双边交易中的应用. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 13-16.
- ZHANG Xian, WANG Xifan, WANG Jianxue. Application of block trading in bilateral market. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 13-16.
- [7] 陶文斌, 张粒子, 黄弦超. 发电机组检修市场的初步设计. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 15-19.
- TAO Wenbin, ZHANG Lizi, HUANG Xianchao. Primary design of generator maintenance. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 15-19.
- [8] 言茂松, 李晓刚. 适合国情的实用当量电价法. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 1-5.
- YAN Maosong, LI Xiaogang. Practical electricity value equivalent method for pool purchase pricing. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 1-5.
- [9] 朱治中. 电力市场竞争监视机制. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 16-19.
- ZHU Zhizhong. Competition monitoring mechanism of electricity market. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 16-19.
- [10] 李扬, 王蓓蓓, 万秋兰. 基于需求侧可靠性差别定价的电力市场交易新机制. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 18-22.
- LI Yang, WANG Beibei, WAN Qiulan. A new mechanism for reliability transaction of power market based on reliability price discrimination of demand side. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 18-22.
- [11] WWF中国气候变化与能源项目组. 德国绿色电力营销政策. 中国能源, 2003, 25(12): 19-20.
- WWF China Climate Flux and Energy Project Group. Green electricity power marketing in Germany. China Energy, 2003, 25(12): 19-20.
- [12] Renewable energy rules of European Union [EB/OL]. [2007-07-05]. <http://www.cct.org.cn/cct/content.asp?ID=6349>.
- [13] Introduction on new policy of energy in England [EB/OL]. [2007-07-05]. http://www.espt.cn/new_view.asp?ID=2789.
- [14] Comparison and analysis of energy policy between China and United States [EB/OL]. [2007-07-05]. <http://www.cct.org.cn/cct/content.asp?ID=6351>.
- [15] 李霞. 国外发展绿色电力的经验. 环境保护, 2004(1): 58-61.
- LI Xia. Foreign experience on development of green electricity power. Environmental Protection, 2004(1): 58-61.
- [16] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. The IEEE reliability test system—1996. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

耿建(1971—),男,博士,工程师,从事电力市场和电力系统优化方面的工作。E-mail: Gengj@naritech.cn

高宗和(1962—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析和优化控制等方面的工作。

张显(1977—),男,博士,工程师,从事电力市场运营和分析方面的工作。

A Preliminary Investigation on Power Market Design Considering Social Energy Efficiency

GENG Jian¹, GAO Zonghe¹, ZHANG Xian², WEN Fushan³, YANG Zhenglin¹,

CAO Rongzhang¹, YAN Xiaowen¹, YAO Jianguo¹

(1. NARI Technology Co Ltd, Nanjing 210003, China)

(2. Trade Center of State Grid Company China, Beijing 100001, China)

(3. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Social energy efficiency has posed a new challenge for the operation and development of the power market. Three solving methods, i.e. bidding by energy cost, by energy-embedded price and by energy-consumption-constraint, are discussed. The energy-consumption-constraint bidding mode is proposed and the bidding model and algorithm are presented based on the yearly or monthly medium-and long-term power market. A simple numerical analysis is made with RTS data, the results of which show that the energy-consumption-constraint bidding mode is effective in improving energy efficiency and market efficiency, while also a feasible method for the actual power market.

This work is supported by the Key Project of State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]207).

Key words: energy efficiency; energy-consumption-constraint; market mechanism; power market

附录 A

表 A1 机组容量、能耗、中标电量及报价水平

Table A1 Unit capacity, cost, price and energy

发电公司	机组编号	容量/MW	报价/ (元·(kW·h) ⁻¹)	平均能耗/ (元·(kW·h) ⁻¹)	投标电量 (MW·h)
A	1	12	0.264	0.22	8 640
	2	12	0.264	0.22	8 640
B	1	12	0.264	0.22	8 640
	2	76	0.18	0.115	54 720
	3	76	0.18	0.115	54 720
	4	155	0.33	0.093	111 600
C	1	12	0.24	0.22	8 640
	2	400	0.09	0.048	273 600
D	1	76	0.168	0.115	54 720
	2	350	0.15	0.091	237 600

表 A2 不同竞价模式下各机组中标电量情况

Table A2 Unit win energy of different market model

发电公司	机组编号	中标电量/(MW·h)		
		无节能约束 竞价模式	节能约束 竞价模式	能耗最低竞 价模式
A	1	8 640	0	0
	2	8 640	0	0
B	1	8 640	0	0
	2	54 720	54 720	54 720
	3	54 720	54 720	7 760
	4	30 080	63 600	111 600
C	1	8640	1 040	0
	2	273 600	273 600	273 600
D	1	54 720	54 720	54 720
	2	237 600	237 600	237 600
总购电费用/万元		16 811.84	18 376.91	19 588.56
总能耗费用/万元		6 267.984	5 977.64	5 861.12