

互联电力交易合同参数优化模型

王建斌¹, 康 勇², 谭忠富¹

(1. 华北电力大学 电力经济研究所, 北京 102206; 2. 邢台供电公司, 河北 邢台 054000)

摘要: 为了适应区域间的电能交易量逐步增加这一趋势, 建立了互联电力合同参数优化模型。该模型由联网调度模型和合作对策模型 2 个子模型组成。联网调度模型用于确定最优互联合同交易电量, 合作对策模型用于确定最优合同交易价格。联网调度模型以古诺模型为基础, 以社会福利最大化为目标, 在考虑了网络约束的影响下, 通过引入一阶优化条件将其转化为线性互补问题(LCP)加以求解。合作对策模型采用了 Shapley 值分配各联网成员间的效益。并以 IEEE 30-bus 系统为背景, 构造了电力市场算例, 通过模型的仿真计算表明了模型的合理性和算法的有效性。

关键词: 电力市场力; 交易合同; 古诺模型; 合作对策模型

中图分类号: F 206; F 224.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)08-0030-03

0 引言

各电网间的互联将使电网能在更大范围内实现补偿调节、错峰、调峰等功能, 从而使电网的运行更加可靠、经济^[1]。在我国, 加大跨省、跨区域电力交易力度, 充分发挥已有的全国联网工程在错峰、相互调剂和紧急事故支援等方面的作用是缓解缺电、提高能源利用效率的一条重要措施。实际上, 随着全国联网工程的推进, 跨区电能交易量已从 2000 年的 $2.3 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 剧增到 2003 年的 $3.87 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ^[2]。随着我国电力市场化改革的不断深入, 区域间的电能交易量会进一步增加。

市场环境下, 区域间的电能交易主要通过合同来实现^[3-4]。互联电力交易合同详细规定了交易量、交易时间、地点及交易价格。合同参数的优化问题引起了国内外一些学者的注意。文献[5]用人工神经网络(artificial neural networks)决定合同参数。文献[6]将合同参数优化问题建模为多目标优化问题, 并使用目标决策网络(goal decision networks)求解。神经网络虽然可以较好地抓住参数和目标之间的因果关系, 但是优化结果取决于网络的训练程度, 并且求解过程不透明, 难以为合同各参与方所接受。文献[7]通过建立联网统一调度模型得到各区域间的理性交换电能量, 而效益分配和交易电价由合作对策模型决定, 但是该文没有考虑市场环境发电商的策略性行为。

在此, 首先以古诺模型为基础建立了电力市场模型, 在此基础上提出以社会福利最大化为目标, 考虑网络约束的联网调度模型以确定最优交易电量, 并将其转化为线性互补问题 LCP(Linear Complementary Problem)求解。然后采用了基于 Shapley 值的合作对策模型来分配效益和决定交易电价。

1 联网调度模型

假定共有 Z 个区域电网组成互联电网, 系统调度员 ISO 以社会福利最大化为目标调度区域之间的能量。互联电网中有 N 个发电商, 发电商 i 在区域 z 有 $N_{i,z}$ 台机组, 用 $q_{i,z,j}$ 表示发电商 i 在区域 z 的第 j 台机组的出力。

机组的发电成本具有二次函数的性质^[8]:

$$C_{i,z,j}(q_{i,z,j}) = \frac{1}{2} a_{i,z,j} q_{i,z,j}^2 + b_{i,z,j} q_{i,z,j} \quad (1)$$

式中 $a_{i,z,j}, b_{i,z,j}$ 分别为发电商 i 在区域 z 的第 j 台机组的二次和一次成本系数。

区域 z 的逆需求函数为

$$P_z(D_z) = \frac{D_{0,z} - D_z}{\alpha_z} \quad (2)$$

式中 P_z 为区域 z 的电价; $D_{0,z}$ 为区域价格为零时的需求; $\alpha_z \geq 0$, 为区域 z 的需求弹性; D_z 为区域 z 的净消费电量。

D_z 可由下式计算:

$$D_z = - \sum_{v \in Z} r_{z,v} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{i,z}} q_{i,z,j} \quad (3)$$

式中 $r_{z,v}$ 为区域 z 到区域 v 的输出电量, 负值表示输入, 且 $r_{z,v} = -r_{v,z}, r_{z,z} = 0$ 。

发电商 i 的优化模型为

$$\max_{q_{i,z,j}} \pi_i = \sum_{z \in Z} \left(\sum_{j=1}^{N_{i,z}} q_{i,z,j} \right) P_z - \sum_{z \in Z} \sum_{j=1}^{N_{i,z}} C_{i,z,j}(q_{i,z,j}) \quad (4)$$

约束条件为

$$\underline{q}_{i,z,j} \leq q_{i,z,j} \leq \bar{q}_{i,z,j} \quad j=1, 2, \dots, N_{i,z}; z \in Z \quad (5)$$

其中, $\underline{q}_{i,z,j}, \bar{q}_{i,z,j}$ 分别为发电商 i 在区域 z 的第 j 台机组出力的下限和上限。

式(4)表示发电商 i 的利润, 其中第 1 项为发电商 i 在实时市场的收益, 第 2 项为发电商 i 的发电成本。

ISO 的目标函数为

$$\max_{r_z, z \in Z} \sum \left[\int_0^{D_z} P_z(\tau) d\tau \right] \quad (6)$$

约束条件为

$$\sum_{v \in Z} r_{z,v} \leq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{i,z}} q_{i,z,j} \quad z, v \in Z \quad (7)$$

$$-K_l \leq \sum_{z \in Z} D_{l,z,v} r_{z,v} \leq K_l \quad l \in L; z, v \in Z \quad (8)$$

式中 K_l 为传输线 l 的容量; L 为区域间联络线的集合; $D_{l,z,v}$ 为潮流分布系数,表示单位调度电量对区域间联络线潮流的影响。

式(6)中的积分式表示消费者剩余。本来社会福利最大化还应包括生产者剩余,但是由于 ISO 是在给定各机组生产水平条件下调度区域间的电量,因此其调度结果不改变生产者剩余,故将该项略去。式(7)表示了区域净输出调度电量不大于该区域的总产出水平。式(8)表示网络约束,此处只考虑区域间联络线的约束,认为在区域内部不会发生阻塞的情况^[9]。

对于由式(4)~(8)形成的非线性有约束极值问题,其最优点应满足库恩-塔克 K-T(Kuhn-Tucker)条件。为此分别求解发电商和 ISO 的 K-T 条件。

发电商的 K-T 条件为

$$P_z - \frac{1}{\alpha_z} \sum_{j=1}^{N_{i,z}} q_{i,z,j} - a_{i,z,j} q_{i,z,j} - b_{i,z,j} - \bar{u}_{i,z,j} + \underline{u}_{i,z,j} = 0$$

$$0 \leq \bar{u}_{i,z,j} \perp \bar{q}_{i,z,j} - q_{i,z,j} \geq 0$$

$$0 \leq \underline{u}_{i,z,j} \perp q_{i,z,j} - \underline{q}_{i,z,j} \geq 0$$

式中 $j=1, 2, \dots, N_{i,z}; z \in Z; \bar{u}_{i,z,j}, \underline{u}_{i,z,j}$ 为式(5)的拉格朗日乘子;“ $\perp$ ”表示互补松弛(complementary slackness)条件。

ISO 的 K-T 条件为

$$-\frac{D_{0,z}-D_z}{\alpha_z} + \frac{D_{0,v}-D_v}{\alpha_v} - u_z - D_{l,z,v} \bar{u}_l + D_{l,z,v} \underline{u}_l = 0$$

$$0 \leq u_z \perp \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{i,z}} q_{i,z,j} - \sum_{v \in Z} r_{z,v} \geq 0$$

$$0 \leq \bar{u}_l \perp K_l - \sum_{z \in Z} D_{l,z,v} r_{z,v} \geq 0$$

$$0 \leq \underline{u}_l \perp \sum_{z \in Z} D_{l,z,v} r_{z,v} + K_l \geq 0$$

式中 $j=1, 2, \dots, N_{i,z}; l \in L; z, v \in Z; u_z$ 和 $\bar{u}_l, \underline{u}_l$ 分别为式(7)和式(8)的拉格朗日乘子。

将 N 个发电商的 K-T 条件和 ISO 的 K-T 条件组合到一起,形成一个 LCP 问题,并且在文中所假设的条件下,该问题有唯一解^[10]。

2 效益分配模型

从上述联网调度模型可以看出,只有对互联电网进行联合调度才能实现电网的整体效益最优。然而,互联电网中的各成员是独立的利益获得者,对任何损害其利益的行为,其都有权拒绝合作。于是实现

互联电网效益的基本条件是激励互联电网所有成员的合作。合作是指各成员愿意按统一调度规则由 ISO 调节交换电量,这种合作与效益分配方式可用合作对策模型描述。

将每个区域看成一个局中人,则局中人集合为 $X=\{1, 2, \dots, Z\}$ 。记区域 z 单独运行时所实现的社会福利为 F_z^0 ,以任何子结盟 $S \subseteq X$ 形成互联电网时所实现的社会福利为 F_z^S ,则特征函数 $c(S)$ 可表示为

$$c(S) = \sum_{z \in Z} (F_z^S - F_z^0) \quad (9)$$

显然,对于任何 $S_1, S_2 \subseteq X, S_1 \cap S_2 \subseteq \emptyset$,则有

$$c(S_1 \cup S_2) \geq c(S_1) + c(S_2) \quad (10)$$

式(10)表示更大结盟产生的效益不小于子结盟产生的效益之和,这实际上是更大结盟实现的必要条件。全体局中人集合 X 称为大结盟(grand coalition),理性局中人希望能促进大结盟的形成。为了促进大结盟的形成,必须有一个合理分配结盟效益的规则。在合作对策理论中,有多种分配规则,每种分配方法都称为合作对策的一种解概念^[11-12]。其中,Shapley 值的分配方法被广泛应用于实际。用此方法可以生成一个各方都认为公平、合理的唯一分配方案^[13-14]。分配到局中人 z 的效益 π_z 可用 Shapley 公式表示为

$$\pi_z = \sum_{S \in X-z} \left\{ \frac{S!(X-S-1)}{X!} [c(S \cup \{z\}) - c(S)] \right\} \quad (11)$$

分配到区域 z 的效益 π_z 与大结盟下区域 z 实现的效益 F_z^X 的差值应由合同加以补偿,因此交易电价必须满足:

$$\sum_{v \in Z} h_{z,v} r_{z,v} = \pi_z - F_z^X \quad z \in Z \quad (12)$$

其中, $h_{z,v}$ 为区域 z 到区域 v 交易电价。值得注意的是,由式(12)形成的代数方程组可能出现约束数目小于变量数目的情况,因而在理论上有无穷多个解。为保证解的唯一性,可以增加一些人为约束。

3 算例

以 IEEE 30-bus 系统为背景模拟互联电力市场^[15],如图 1 所示,系统分为 3 个区域。表 1 为市场组成数据和机组的成本数据;表 2 给出了市场需求数据;表 3 给出了区域间传输线的容量数据。

重复利用上文联网调度模型,计算在各种结盟下实现的社会福利,仿真结果如表 4 所示。大结盟下社会福利在各区域间的分配结果如表 4 最后一行所示。可以看出,分配给各区域的社会福利均大于各区域单独运行时实现的社会福利,这正是各区域参与互联的动力所在。

由式(12)可知,互联合同交易价格必须满足:

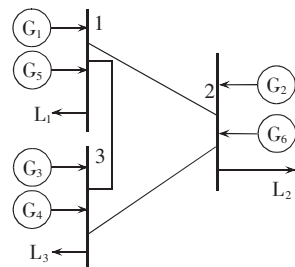


图 1 3 区域系统拓扑图
Fig.1 A 3-zone system

表 1 市场组成数据和机组成本数据

Tab.1 Market structural data and unit cost coefficients

发电商	机组	最小(最大) 出力/MW	成本函数/ $[\$/(\text{MW}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$	
			一次	二次
1	G ₁	0(80)	2	0.04
	G ₂	0(80)	1.75	0.035
	G ₃	0(50)	1	0.125
2	G ₄	0(55)	3.25	0.016 6
3	G ₅	0(30)	3	0.05
4	G ₆	0(40)	3	0.05

表 2 市场需求数据

Tab.2 Market demand data

负荷	$D_{0,z}/\text{MW}$	α_z
L ₁	80	0.5
L ₂	100	0.4
L ₃	120	0.5

表 3 区域间传输线容量

Tab.3 Transmission line capacities

起始节点	终止节点	容量/MW
1	2	20
1	3	50
2	3	20

表 4 各种结盟下实现的社会福利
及在各区域间的分配Tab.4 Social welfare and its allocations among zones for different coalition scenarios $\$/\text{h}$

结盟	社会福利		
	区域 1	区域 2	区域 3
{1}{2}{3}	3 668	7 397	8 315
{1,2}	2 225	9 566	8 315
{1,3}	1 639	7 397	10 631
{2,3}	3 668	7 029	8 840
{1,2,3}	1 346	8 567	10 319
福利分配	4 068	7 733	8 431

$$\begin{bmatrix} r_{12} & r_{13} & 0 \\ -r_{12} & 0 & r_{23} \\ 0 & -r_{13} & -r_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{12} \\ h_{13} \\ h_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\ 722 \\ -834 \\ -1\ 888 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, r_{12} 、 r_{13} 和 r_{23} 的数值分别为 -13.638 6 MW、42.353 5 MW、-20 MW。但是由式(13)形成的代数方程组不满足线性无关的条件,因此增加一个人为约束:

$$h_{12} + h_{13} + h_{23} = \sum_{z \in Z} P_z \quad (14)$$

即区域间交易价格之和等于区域电价之和。计算得出的交易价格 h_{12} 、 h_{13} 、 h_{23} 分别为 67.603 8 $\$/\text{h}$ 、86.037 9 $\$/\text{h}$ 、87.811 3 $\$/\text{h}$ 。

4 结论

通过建立联网调度模型,得到了以实现社会福利最大化为目标的区域间最优交易电量;通过采用基于 Shapley 值的合作对策模型得到了交易价格必须满足的约束条件。从以上的理论分析和实际算例可以得出 3 点结论。

a. 大互联能够产生最大的社会福利,这是各区域参与互联的基础。

b. 各个区域分配所得的社会福利均大于其单独运行时的社会福利,这是各区域参与互联的动力;任何成员在任何子互联网中都不会得到更大的利益,这是大互联能够得以维系的前提。

c. 为了得到唯一的交易价格,有时需要增加人为约束。但是这并不影响各区域的社会福利。

参考文献:

- [1] 张惠勤. 关于我国电网互联状况的调查及建议[J]. 中国电力, 1997,30(1):3-6.
ZHANG Hui-qin. Investigation and suggestion on China national power grid[J]. Electric Power, 1997,30(1):3-6.
- [2] 张运洲. 我国跨区域电力资源配置前景分析[J]. 中国电力, 2004,37(9):5-7.
ZHANG Yun-zhou. Prospect analysis of cross-regional power resource disposition[J]. Electric Power, 2004,37(9):5-7.
- [3] 彭涛,夏清,江健健,等. 区域电力市场交易模式的经济机理分析[J]. 电力系统自动化, 2004,28(7):20-23.
PENG Tao, XIA Qing, JIANG Jian-jian, et al. Analysis of economic mechanism of two regional electricity market models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(7):20-23.
- [4] LIU C C, SONG H, LAWARRÉE J, et al. New methods for electric energy contract decision making[C]//Proc of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London: [s.n.], 2000:125-129.
- [5] WONG K P, DAVID A K. A neural network approach to evaluate contractual parameters of incentive power contracts[C]//Proc ANNPS'93. Yokoyama, Japan: [s.n.], 1993:270-275.
- [6] ROSENWALD G W, LIU Chen-ching. Interchange contract decision making in electric power systems intelligent systems applications to power systems[C]//Proc ISAP'96. Orlando, USA: [s.n.], 1996:22-27.
- [7] 王先甲, 李湘蛟. 互联电网中电力交易的合作对策模型[J]. 电力系统自动化, 2000,24(10):21-25.
WANG Xian-jia, LI Xiang-jiao. The cooperative gamemodel for electricity transaction in interconnected power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(10):21-25.
- [8] HUSE E S, WANGENSTEEN I, FAANES H H. Thermal power generation scheduling by simulated competition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(2):472-477.
- [9] WANG X, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1348-1355.
- [10] COTTLE R W, PANG J S, STONE R E. The linear complementarity problem[M]. Boston, MA: Academic Press, 1992.
- [11] BRANZEI R, DIMITROV D, TIJS S. Egalitarianism in convex fuzzy games [J]. Mathematical Social Sciences, 2004 (47): 313-325.
- [12] BHATTACHARYA A. On the equal division core[J]. Social Choice and Welfare, 2004(22):391-399.
- [13] BAKIRTZIS A G. Aumann-Shapley transmission congestion pricing[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001,21(3):679-691.
- [14] HAVIV M. The Aumann-Shapley price mechanism for allocating congestion costs[J]. Operations Research Letters, 2001, 29(5): 211-215.
- [15] CONTRERAS J, KLUSCH M, KRAWCZYK J B. Numerical solutions to Nash-Cournot equilibria in coupled constraint electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1):195-206.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

王建斌(1973-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为电力经济(E-mail: wjb_naknor@126.com);

康勇(1975-), 男, 河北张家口人, 工程师, 研究方向为电力系统自动化;

谭忠富(1964-), 男, 吉林长岭人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力经济。

Optimization model of interchange contract parameters

WANG Jian-bin¹, KANG Yong², TAN Zhong-fu¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Xingtai Power Company, Xingtai 054000, China)

Abstract: To meet the needs of increasing energy interchanges between power grids, an optimization model is constructed for interchange contract parameters, which is comprised of two sub-models, i.e. interchange scheduling model for amount and cooperative game model for price. The interchange scheduling model is based on Cournot model, aiming at the maximized social welfare with grid constraints, and its solution is obtained by introducing the first order optimality conditions to formulate it as a LCP (Linear Complementary Problem). The cooperative game model adopts Shapley value to distribute the benefit among the interconnected power grids. Taking IEEE 30-bus system as its background, a power market is built and the simulative calculations have verified the rationality of the model and the effectiveness of the algorithm.

Key words: power market; interchange contract; Cournot model; cooperative game model