

# 基于合作博弈的互联电网电力交易优化分配模型

马文斌<sup>1</sup>, 唐德善<sup>1</sup>, 陆琳<sup>2</sup>

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 分析了互联电网的特点和问题, 指出跨区域互联电网合作的必要性, 并运用博弈论构建了基于多人合作对策的互联电网合作对策模型, 并采用 Shapley 值法、核心法和简化的 MCRS 法等分配方式进行了算例分析, 探讨了不同计算结果的寓意。结果表明, 合作对策模型可以更好地体现各合作电网之间的相互影响, 分配结果较传统方法更为合理, 可以较好地应用于互联电网电力交易的优化决策。

**关键词:** 互联电网; 跨区域; 合作对策; 博弈论; 联盟

## Optimal allocation model for electricity transaction in interconnected power network based on cooperative game

MA Wen-bin<sup>1</sup>, TANG De-shan<sup>1</sup>, LU Lin<sup>2</sup>

(1. Business School, Hehai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Economy and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The characteristics and problems of the interconnected power network is analyzed, which indicated the necessity of interconnecting power network among regions. This paper establishes a cooperative game model based on n-people cooperative game by ways of game theory, and adopts Shapley value method, Core method, and simplified MCRS method to analyze the example and discuss the meanings of different results. The calculation results show that this cooperative game model is helpful to incarnate the influence among the members, distribution results are more rational than traditional methods. Thus it can be used for optimal decision of electricity transaction.

**Key words:** interconnected power network; inter-region; cooperative game; game theory; alliance

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)11-0040-04

## 0 引言

随着中国电力改革的深入, 以“厂网分开, 竞价上网”为特征的电力市场在中国已逐渐建立并推广。根据新的市场交易规则, 电网经营企业原有的发电厂与电网被分开, 发电侧电力市场的市场主体是各独立发电企业与电网经营企业, 电网经营企业负责组织各发电企业间的竞争, 政府负责对电力市场进行监督管理, 发电侧实行竞价上网。由于电力行业特殊性(如高昂的市场进入壁垒等), 电力市场并不是完全竞争的市场, 而是更接近于寡头垄断市场。众多学者针对这一市场特性运用博弈论对电力市场竞价问题进行了探讨, 并构建了许多相应的策略模型<sup>[1, 3]</sup>。但是, 这些博弈问题主要是指在同一电网(区域)内的电力交易。考虑到我国的实际问题, 不仅能源资源分布不均衡, 而且各地区经济发

展和电力消费水平也不均衡, 西部地区经济总产值仅占全国的 18%, 电力消费占全国的 22%; 中部和东部沿海地区经济总产值占全国的 82%, 电力消费占全国的 78%。这种差异决定了中国电力工业发展必须实行“西电东送、南北互供”的发展战略, 实现全国范围内跨区域的电网互联。

目前已有一些论文运用博弈论对区域间交易决策优化进行了研究, 包括合作与不协作情况下双边电力交易决策的研究<sup>[4~6]</sup>。这类电力跨网交易决策时的特点是相应联络线的传输极限必须计及, 以及相应输电费用(联络线使用费或其他区域电网过网费)必须计及, 并应计算区域间交易带来的各种效益的量化值, 以确定最优交易量、价格及时间<sup>[7]</sup>。本文利用博弈论建立了互联电网的多人合作对策模型, 并采用多种合作对策求解方法对各联网成员效益分配进行了探讨。

## 1 多人合作对策模型

多人合作对策博弈是博弈论的重要分支之一, 研究的是多个局中人参加的对策, 它允许局中人进行充分的自由的合作, 包括事先商定、协调它们的策略等, 并在终局之后重新分配局中人的收入。在多人合作对策中合作能否形成主要取决于合作后剩余效用在联盟成员中的分配是否合理, 如果分配不合理, 某些局中人就可能脱离原来的联盟而加入其他联盟, 或不参加任何联盟。因此, 如何合理地制定分配方案是多人合作对策研究的主要问题。

记合作对策局中人的集合为  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , 后果又称为收入, 记为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $N$  的非空子集  $S (S \subset N)$  称为联盟, 其特征函数  $v(S)$  的涵义为: 当  $S$  中的局中人成为一个联盟时, 不管  $S$  外的局中人采取什么策略, 联盟  $S$  通过协调其成员的策略保证能达到的最大赢得值; 联盟中成员  $i$  分配的结果记为  $x_i$ 。在联盟中, 应满足以下 3 个合理性条件<sup>[8]</sup>:

1) 个体合理性条件:  $x_i \geq v(i), \forall i \in N$

2) 整体合理性条件:  $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$

3) 联盟合理性条件:

$$\sum_{i \in S} x_i \geq v(S), \forall S \subset N \text{ 且 } |S| > 1$$

分配  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  称作核, 记为  $C(v)$ 。

## 2 模型的求解

多人合作对策模型收益分配的解法有多种如 Shapley 值法、核心法 (Nucleolus) 和简化的 MCRS (Minimum Costs-Remaining Savings) 法等。

### 2.1 Shapley 值法

Shapley 值可以看成是每个联盟成员对该联盟的平均贡献。用 Shapley 值求解时, 首先应满足如下公理:

1) 对称性公理: 若对策中的两个局中人相互替代 (当联盟总财富不发生改变时, 由一个人替代另一个人), 那么它们的值相等。此条公理意味着局中人的平等关系。

2) 有效性公理: 所有局中人的赢得 (或价值) 之和等于  $v(N)$ ,  $v(N)$  是所有局中人总联盟的财富。

3) 聚合性公理: 两个对策之和的值等于两个对策值之和。

理论上可以证明, 这些公理唯一确定了每一博弈的一个赢得 (支付) 向量, 即合作博弈联盟中的一种分配形式。下面给出一个具体的 Shapley 值。在所有  $n$  人合作博弈中的集合  $(N, v)$  之上, 存在唯一的一个向量函数满足上述公理, 它的第  $i$  个分量为:

$$\phi_i(v) = \sum_{i \in S} \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} [(v(S) - v(S \setminus \{i\}))] \quad (1)$$

### 2.2 核心法

核心法从满足整体合理性和个人合理性的合理分配集中选择一组合理分配, 它们对任何联盟  $S$  来说都不被其他合理分配所支配, 即是将合作对策  $(N, C)$  的核心作为收益分配方案。考虑到核心有可能是空集, 解决这个问题的方法是给多人合作对策模型中的联盟合理性条件加一松弛变量。按照给联盟  $S (1 < |S| < N)$  的收益  $V(S)$  所加额外量的方法的不同, 核心法可分为最小核心 (Least Core) 法, 弱最小核心 (Weak Least Core) 法和比例最小核心 (Proportional Least Core) 法。

在最小核心法中, 给所有联盟  $S (1 < |S| < N)$  的联盟收益总和都加一个相同的额外量  $\varepsilon$ , 计算技术联盟各成员的分配收益即为求解以下这个线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \min \varepsilon \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_i \geq v(i), \forall i \in N \\ \sum_{i \in S} x_i \geq V(S) + \varepsilon, \forall S \subset N \text{ 且 } |S| > 1 \\ \sum_{i \in N} x_i = V(N) \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

在弱最小核心法中, 给联盟  $S (1 < |S| < N)$  中的每一成员都增加一个相同的额外量  $\varepsilon$ , 因此所求解的线性规划问题为:

$$\begin{aligned} & \min \varepsilon \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_i \geq v(i), \forall i \in N \\ \sum_{i \in S} x_i \geq V(S) + \varepsilon |S|, \forall S \subset N \text{ 且 } |S| > 1 \\ \sum_{i \in N} x_i = V(N) \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

在比例最小核心法中, 给联盟  $S (1 < |S| < N)$  的联盟收益增加一个与其开发收益总和成比例的额外量来求解核心, 因此所求解的线性规划问题为:

$$\begin{aligned} & \min \varepsilon \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_i \geq v(i), \forall i \in N \\ \sum_{i \in S} x_i \geq (1+t)V(S), \forall S \subset N \text{ 且 } |S| > 1 \\ \sum_{i \in N} x_i = V(N) \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

2.3 简化的 MCRS 法

MCRS (Minimum Costs-Remaining Savings) 法计算联盟利益分配的公式为:

$$x_i = x_{i \min} + \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{\sum_{i \in N} (x_{i \max} - x_{i \min})} \left[ V(N) - \sum_{i \in N} x_{i \min} \right], \quad \forall i \in N \quad (5)$$

其中, 各个单位的理想利益所得和应该的利益所得分别作为其最高和最低的利益分配所得, 即简化的 MCRS 法:

$$x_{i \max} = V(N) - V(N - i), \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$x_{i \min} = V(N)_i = x_i \quad (7)$$

3 算例及分析

设有 4 个区域电网 A、B、C、D, 彼此的用电峰值不同, 因自身的装机及备用容量限制, 需要通过电网互联进行区域间功率交换, 以取得最大经济效益。它们的网络结构如图 1 所示。

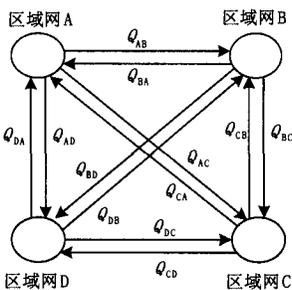


图 1 系统结构图

Fig. 1 Configuration of test system

在电能的传送过程中, 必须向电网运营商支付一定的电网占用费, 本文用过网费用表示该费用, 并假设区域电网内的单位电能过网费用小于区域电网间的单位电能过网费用。此外, 为简化计算, 本文不考虑网损和输电容量限制。区域电网 A、B、C、D 的发电收益及区内、区间过网费用如表 1 所示。

表 1 各区域电网收益、过网费用、利润表

Tab. 1 Comparison of income, expense and profit of power grid in various area

转运情况	收益/万元	过网费用/万元	利润/万元	
独立运作	A	8 280	1 380	6 900
	B	12 070	2 000	10 070
	C	2 510	420	2 090
	D	4 440	740	3 700
两两联合	A ∪ B	22 780	4 060	18 720
	A ∪ C	12 090	2 160	9 930
	A ∪ D	14 160	2 540	11 620
	B ∪ C	16 370	2 900	13 470
	B ∪ D	18 450	3 290	15 160
	C ∪ D	7 760	1 390	6 370
三家联合	A ∪ B ∪ C	27 040	5 320	21 720
	A ∪ B ∪ D	29 160	5 760	23 440
	A ∪ C ∪ D	17 930	3 560	14 370
	B ∪ C ∪ D	22 460	4 420	18 040
全联盟	A ∪ B ∪ C ∪ D	33 500	7 260	26 240

分别运用 Shapley 值法、核心法以及简化的 MCRS 法进行计算, 结果如表 2、图 2 所示。

表 2 各种算法下利润分配表

Tab. 2 Comparison of profit distribution of in different arithmetic

	$X_A$	$X_B$	$X_C$	$X_D$
Shapley 值法	7 853	11 313	2 700	4 374
最小核心法	8 200	11 540	2 800	3 700
弱最小核心法	8 550	11 190	2 450	4 050
比例最小核心法	8 200	11 470	2 790	3 770
简化的 MCRS 法	7 877	11 423	2 624	4 316

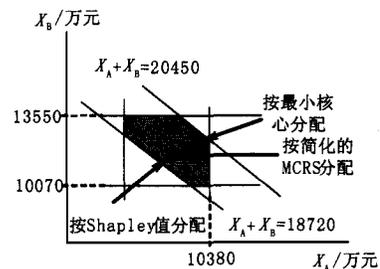


图 2 各种分配方式的结果比较示意图 (A, B)

Fig. 2 comparison of different distribution (A, B)

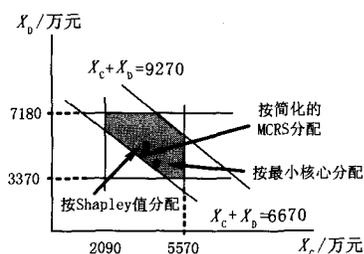


图3 各种分配方式的结果比较示意图 (C, D)

Fig. 3 Comparison of different distribution (C, D)

根据计算结果有以下结论:

1) 通过区域网 A、B、C、D 之间的电力交易合作, 可提高整个互联电网的效益, 且各个区域网能够通过交易获得额外的效益, 这显示了合作对策模型对互联电网电力交易优化的有效性; 2) Shapley 值法和简化的 MCRS 法的计算结果相差不大, 对联盟贡献少的电网获得的联盟收益分配相对较少, 这两种解法是一种同情弱势方的方法; 3) 核心法则相反, 对联盟贡献越大的电网获得更大的联盟收益, 因此是一种根据电网对联盟贡献大小来分配联盟收益的方法。4) 电力系统引入市场机制以后, 输电网的自然垄断性将逐步被打破, 因此, 电力企业出于自身利益的考虑都会选择对自己有利的分配方案。由于核心必须照顾到所有局中人的利益, 核心法成为了所有联盟成员都不反对的分配方案, 其中, 最小核心法更加适用于电力交易优化分配方案的制定。但核心解极有可能不存在或者为一个集合。所以 Shapley 法将成为电力交易优化分配方案的次优方案。Shapley 法保证了分配方案的整体效益较大, 又不失公平, 因而可以确保分配方案的顺利实施。

#### 4 结束语

随着电力系统规模的不断扩大和高压远距离输电技术的实现, 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, 从而在更大的空间内合理配置电力资源。本文运用博弈论的相关理论, 构建了基于多人合作对策的互联电网合作对策模型, 并采用多种合作对策求解方法对各

联网成员效益分配进行了探讨。结果表明, 由于合作对策模型体现了各合作电网之间的相互影响(竞争与合作), 分配结果较传统方法更为合理, 可以较好地应用于互联电网电力交易的优化决策。

#### 参考文献

- [1] Ferro R W, Rivera J F. Application of Game with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Powerpool[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 1056-1061.
- [2] Wen F S, A K David. Optimal Bidding Strategies and Modeling of Imperfect Information Among Competitive Generators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 15-21.
- [3] 陈星莺, 李华昌, 等. 不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J]. 电力需求侧管理, 2006(4): 12-15.  
CHEN Xing-ying, LI Hua-chang, et al. Optimal Bidding Strategies for Distribution Companies with Incomplete Information[J]. Power DSM, 2006(4): 12-15.
- [4] Nishimur A. Benefit Optimization of Centralized and Decentralized Power Systems in a Multi-Utilit Environment[J]. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8(3)
- [5] Jukka R, Harri E, Raimo P H, et al. Dynamic Cooperative Electricity Exchange in a PowerPool[J]. IEEE Trans on System Man and Cybernetics, 1991, 21(4): 758-766
- [6] Bai X, Shahidehpour S M, Ramesh V C et al. Transmissions Analysis by Nash Game Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1046-1052.
- [7] 刁勤华, 林济铿, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 13-18.  
DIAO Qin-hua, LIN Ji-keng, et al. Game Theory and Its Applications in Power Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 13-18.
- [8] 谢政. 对策论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.  
XIE Zheng. Theory of Games[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2004.

收稿日期: 2006-12-11; 修回日期: 2007-01-03

作者简介:

马文斌(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为技术经济; E-mail: nmmawenbin@yahoo.com.cn

唐德善(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水利水电规划与管理;

陆琳(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为区域经济。

(上接第34页 continued from page 34)

- [14] Goutis V P, Bakirtzis A G. Bidding Strategies for Electricity Producers in a Competitive Electricity Marketplace[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 356-365.
- [15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-Risk[J]. Journal of Risk, 2000, 2(3): 21-41.

作者简介:

廖菁(1980-), 男, 硕士研究生, 从事电力市场和电力系统方面的研究; E-mail: liaojing987404@163.com

江辉(1968-), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统优化运行、电力经济和计算机应用等研究工作;

彭建春(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电能市场最优运营与控制、电力系统安全稳定经济运行等研究。

收稿日期: 2006-12-21;

修回日期: 2007-01-16