

# 分区核仁法分摊多区域互联输电网固定成本

高效<sup>1</sup>, 彭建春<sup>2</sup>, 罗安<sup>2</sup>

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 探讨了电力市场环境多区域互联电网固定成本的分摊问题。给出固定成本分摊的合作博弈模型, 采用分区核仁算法求解。将多区域互联电网拆分为各个区域电网, 固定成本根据区域间等值双边交易的比例分摊, 再用核仁算法分区求得区域内部各用户承担的固定成本。此方法减小了将多区域互联电网作为一个整体求核仁解的计算量, 并且保持了合作博弈模型原本给出的经济信号。IEEE14节点3区域系统的仿真算例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 输电; 固定成本; 分摊; 合作博弈; 区域电网; 核仁

## Anucleolus solution in disconnected local areas for fixed transmission cost allocation of multi-area network

GAO Xiao<sup>1</sup>, PENG Jian-chun<sup>2</sup>, LUO An<sup>2</sup>

(1.State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China;

2.College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The allocation of fixed transmission cost of interconnected multi-area system is investigated in this paper. The cooperate game model of fixed transmission cost is proposed with solution by nucleolus in disconnected local areas. The interconnected multi-area network is disconnected into many local area networks. The fixed transmission cost is allocated to equivalent bilateral power trades among local areas. Further in one local area, the cost is allocated to load at each bus by using nucleolus. The calculation is simple than nucleolus in the whole interconnected multi-area system. The economic signals provided by the cooperate game model is yet available. The effectiveness of the proposed method is verified by the IEEE 14-bus test system with three local areas.

**Key words:** transmission; fixed cost; allocation; cooperate game; local area; nucleolus

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)23-0039-04

## 0 引言

作为电能的载体, 输电网络同时负责电力系统的安全运行与电力市场的正常有效运转, 建立高效安全、灵活稳健的电网是电力工业改革的一个重要目标。同时为实现大范围内的资源优化配置, 区域电网互联也是当前电力系统建设的重点之一。输电网络的固定成本为建设线路的一次性投资及还本付息, 占输电成本很大比例, 因此及时回收全部固定成本并确保适当的盈利是加强电网建设的必要条件。

随着电网的快速发展, 固定成本的合理分摊也愈发重要, 应用于成本分配的博弈论以其良好的经济背景倍受关注。最早 Tsukamoto 等人提出将合作博弈应用于输电成本分配<sup>[1]</sup>的思想, 其后几十年里, 这种方法得到了很大发展。合作博弈的应用细化到

各类输电费用, 包括固定成本<sup>[2]</sup>、转运费<sup>[3,4]</sup>、网损<sup>[5]</sup>、阻塞成本<sup>[6]</sup>等, 并且分摊模型的博弈算法也细分成各种解, 特点不同的解分别适用不同类型的费用分摊。在合作博弈的多种解中, 只有核仁解必定存在并且给每一个博弈定义了唯一的分配向量, 其应用于固定成本分配明确表示了各发电商或负荷应当承担的责任<sup>[7,8]</sup>。

虽然核仁的计算理论上可通过求解一系列线性规划来完成, 但是由于输电网络非常庞大并且实际运行情况相当复杂, 真正实现核仁算法分配固定成本比较困难。因此核仁解应用到实际的多区域电网是固定成本分摊研究的一个重点, 本文将多区域电网分区拆解以减小核仁算法求解的计算量, 并最终将固定成本进行合理分配。

## 1 固定成本分摊的合作博弈模型

### 1.1 输电网固定成本

输电网固定成本反映建设线路(包括输电线路、两侧的变电站、串联补偿器、静态补偿器等与输电相关的各种设备)的投资,包括投资的还本付息、折旧费、回报率、税费、通货膨胀率、保险费等,有的电网固定成本还包括电网的运行管理和维护费。在本文中,固定成本主要考虑设备投资的回收,即输电网一次性投资及还本付息。

### 1.2 合作博弈模型

固定成本的分摊用一个  $n$  人合作博弈模型  $\Gamma(N, v)$  表示,  $v$  是特征函数,  $N=\{1, 2, \dots, n\}$  为  $n$  个局中人所成之集,  $S \subset N$  为一个联盟<sup>[9]</sup>。电网用户为局中人,联盟形成引起的收益为特征函数,其计算可分为以下几步。

(1) 按一定经济计算期和一定折现率将输电网固定成本折现到交易时段,确定各交易时段每单位潮流所有电网用户共同承担的固定成本。假设输电网的固定成本折算到交易的时段为  $K$ ,  $P_{\text{cirt}}$  为电网的安全输送功率,则此电网有功潮流的单位固定成本为  $c$ <sup>[10, 11]</sup>。

$$c = \frac{K}{P_{\text{cirt}}}$$

(2) 分析计算各用户不参加任何联盟单独承担固定成本时的数额  $C_i$ , 设  $P_i$  为单独输电给用户  $i$  电网有功潮流, 则  $C_i = cP_i$ 。同理联盟  $S$  承担的固定成本总额  $C_S$  为  $C_S = cP_S$ 。  $P_S$  为仅仅完成对所有联盟成员输电的电网有功潮流总和。

(3) 由于输电网的规模经济性,所有电网用户在参与固定成本分配时形成一个大联盟,即所有局中人均参与的联盟。电网输电线路反向潮流的存在使得电网输电给整个联盟引起的有功潮流比分别单独输电给各用户所引起的有功潮流总和小,因此承担的固定成本额也减小,其间的差值便为各经济实体及各联盟的参与收益,即特征函数  $v(S)$ 。

$$v(S) = \sum_{i=1}^{n_S} C_i - C_S \quad (1)$$

式中:  $n_S$  为参与联盟  $S$  的人数。

(4) 解合作博弈得到各用户的参与收益  $x_i$ , 则用户  $i$  应承担的固定成本  $C'_i$  为

$$\begin{cases} C'_i = C_i - x_i & C_i \geq x_i \\ C'_i = 0 & C_i < x_i \end{cases} \quad (2)$$

解决输电网固定成本分摊问题的对策模型已经建立了,至此,矛盾转化为选择合适的方法获得满意的分配结果。

## 2 核仁算法

合作博弈解决的一个重要问题就是找一个或者一组分配,使得每个局中人都按照这组分配来得到他们的支付,大家都没有意见。在合作博弈的多种解法中,只有核仁解是必定存在且唯一的,并且它还具有对称性,满足个体合理性和整体合理性,因此采用核仁算法总能给用户一个合理的成本分配。

核仁算法的思想是:优先考虑最不满意的联盟,选择分配使这种联盟的怨言达到最小;再考虑次不满意的联盟,并选择分配使其不满意程度尽可能地小。如此循环,直到所有联盟的不满意度都尽可能小为止<sup>[9]</sup>。

令  $x(\Gamma) = \{x \in R^n \mid x_i \geq v(\{i\}), i=1, 2, \dots, n; x(N) = v(N)\}$ ,  $x \in x(\Gamma)$  是列向量,称  $x$  为一个分配,对策的分配全体记为  $E(v)$ 。定义联盟  $S$  关于  $x$  的超出值  $e(S, x) = v(S) - x(S)$ , 它的大小反映联盟  $S$  对分配  $x$  的态度。超出值越大,  $S$  对  $x$  越不满意。列举出  $N$  的  $2^n$  个子联盟  $S \subset N$  关于  $x$  的超出值,并按从大到小的顺序排列,得到一个  $2^n$  维向量

$$\theta(x) = (\theta_1(x), \theta_2(x), \dots, \theta_{2^n}(x)) \quad (3)$$

$$\theta_i(x) = e(S_i, x) (i=1, 2, \dots, 2^n) \quad (4)$$

其中:  $S_1, S_2, \dots, S_{2^n}$  是  $N$  的所有子集的一个排列,满足

$$e(S_1, x) \geq e(S_2, x) \geq \dots \geq e(S_{2^n}, x) \quad (5)$$

$$\text{对 } \begin{cases} \theta(x) = (\theta_1(x), \theta_2(x), \dots, \theta_{2^n}(x)) \\ \theta(y) = (\theta_1(y), \theta_2(y), \dots, \theta_{2^n}(y)) \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta(y) = (\theta_1(y), \theta_2(y), \dots, \theta_{2^n}(y)) \quad (7)$$

如果存在  $1 \leq h \leq 2^n$ , 使

$$\theta_i(x) = \theta_i(y), \quad i=1, 2, \dots, h-1 \quad (8)$$

$$\theta_h(x) < \theta_h(y) \quad (9)$$

则称向量  $\theta(x)$  按字典序小于向量  $\theta(y)$ , 记为  $\theta(x) \prec \theta(y)$ 。  $\theta(x) \leq \theta(y)$  则表示或者  $\theta(x) \prec \theta(y)$ , 或者  $\theta(x) = \theta(y)$ <sup>[17]</sup>。核仁就是使  $\theta(x)$  按字典序达到最小的那种分配之全体, 即

$$\{x \in E(v) \mid \forall y \in E(v), \theta(x) \leq \theta(y)\} \quad (10)$$

## 3 分区核仁分配法

### 3.1 多区域互联电网

多区域互联电网中,每一个区域电网具有发电机、负荷,同样执行输电网的功能,一个区域电力公司的运行区域是整个电力系统的一部分,在这个区域内可配发电机的出力,以安全经济地向本地用户和网络使用者提供服务。而各个区域电网相互

之间也存在输电交易, 这些交易由连接区域电网的互联线输送, 因此在向本地用户提供电力供应的同时, 区域电力公司也控制本区域流入和流出潮流保持平衡。如果没有与区域外部的电力交易, 互联线上的潮流代数和应该为零。如果将两个区域电网从一个整体上来看, 则它们可看作一个较大的电网。

在一个互联多区域系统中, 电网的规模经济性使得运行成本降低, 并且发电资源的联合运行能提高可靠性。电力用户可以不向所在区域的电力公司购电, 而通过合同向另一邻近或者更远的厂家购电, 输电交易可能在母线之间或者区域之间产生。所有参与区域联合制订电能的分配和交换, 根据全系统运行费用最小的原则进行调度, 以实现电力的经济输送。

### 3.2 分区核仁法

分区核仁法首先计算多区域互联电网中各个区域电网应当承担的固定成本。对于两个区域电网之间的电能输送, 其中一个区域供电, 按照区域的功能划分, 此区域为供电区域; 一个区域用电, 为用电区域。区域间的联络线传输电能, 联络线所联结的区域电网可简化为多区域互联电网的母线节点, 只不过在此节点并不直接关联到用户或发电厂, 而是关联到区域电网。

在区域间联络线正常输电的前提下, 如果供电区域  $\xi$  输出的电能为  $P_{g\xi}$ , 用电区域  $\zeta$  吸取的电能为  $P_{d\zeta}$ , 无损网络中, 整个多区域电网的输电量为  $P_d^{sys} = \sum_{\zeta} P_{d\zeta} = \sum_{\xi} P_{g\xi}$ , 供电区域  $\xi$  与用电区域  $\zeta$  之间的输电行为可用等值的双边交易  $GD_{\xi\zeta}$  表示<sup>[12]</sup>, 区域电网分别对应于等值双边交易的电能注入和吸取节点。

$$GD_{\xi\zeta} = \frac{P_{g\xi} P_{d\zeta}}{P_d^{sys}} \quad (11)$$

区域联络线上输送的是此等值双边交易, 因此区域互联电网的固定成本分摊给各个交易后再确定各区域承担的固定成本。虽然等值双边交易实际上是不存在的, 但它们表示两区域电网间的电能供用关系。数量大的等值双边交易使用电网的程度大, 相应地承担较大的固定成本。按照等值双边交易量的正比, 区域互联电网的固定成本依次分配到各交易。由于交易的双方供电区域和用电区域同时同等程度地使用电网输电线路, 所以各交易承担的固定成本在交易双方之间平均分配, 由此可得各个区域承担的固定成本额。

分摊到区域电网的固定成本在区域电网内部

再进一步分摊到发电机组和负荷。对于单个的区域电网, 发电机组可能还要供电给其他区域的负荷, 各节点发电机组的电能交易额不能准确反映本区域的交易分布特征, 因此将固定成本全部归口到各节点负荷, 发电节点的发电机组则通过另行对负荷进行经济补偿或者降低电价来履行其对电网固定成本的承担责任。在单个区域电网固定成本分摊的合作博弈模型中, 节点负荷为具有独立意志的局中人, 各种可能形成的联盟的特征函数依据式(1)求得, 采用核仁算法求解各负荷参与大联盟的收益分配, 并根据式(2)得到各负荷承担的固定成本。

## 4 算例分析

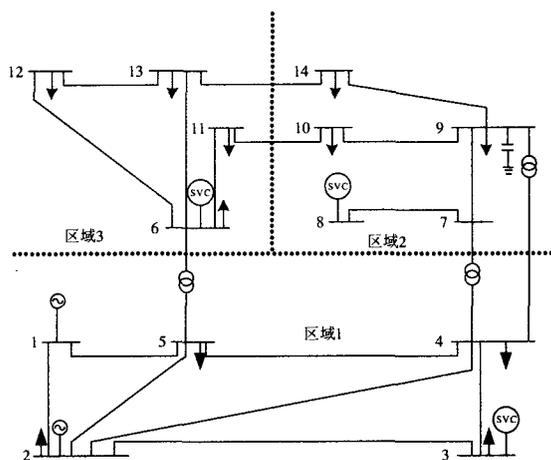


图1 IEEE14节点系统  
Fig.1 IEEE14 bus

IEEE14节点系统如图1所示, 各原始数据均与标准试验系统相同, 交易时段固定成本回收额为100万元。3个区域电网构成此多区域互联电网, 根据系统的潮流分布, 区域潮流如图2所示, 负号表示电能注入, 正号表示输出。区域1和2、1和3、3和2之间的等值双边交易  $GD_{12}$ 、 $GD_{13}$ 、 $GD_{32}$  分别为48.37、39.81、5.16 MW, 则按交易额正比分配, 各交易承担的固定成本分别为51.82、42.65、5.53万元, 区域1、2、3分别应支付47.235、28.675、24.09万元。

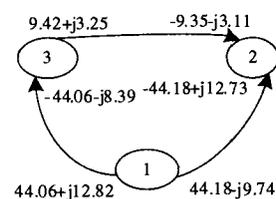


图2 区域潮流  
Fig.1 The flow of each area

以负荷为参与电网固定成本分配的局中人, 相应节点号为局中人编号, 在单个区域内部, 假定每 MW 有功潮流的固定输电成本为 1, 则固定成本的合作博弈分配模型可简化为潮流收益的分配模型。核仁算法解出各负荷参与联盟的潮流收益后, 按照各负荷在电网中所引起潮流总和的正比, 此区域分担的固定成本分配到各个负荷, 见表 1。

表 1 负荷节点潮流与成本

Tab.1 Flow and cost at load bus

区域	负荷节点	潮流/MW	承担成本/万元
1	2	57.2025	5.54
	3	281.455	27.26
	4	139.2525	13.49
	5	9.86	0.95
2	9	20.05	10.64
	10	7.16	5.68
	14	15.56	12.35
3	6	3.31	2.31
	11	1.885	1.32
	12	8.625	6.03
	13	20.65	14.43

## 5 结论

合作博弈应用于大规模输电系统的固定成本分配面临着求解过程复杂、计算量庞大的问题, 区域核仁法将互联的多区域系统分区考虑, 减小了将多区域互联电网作为一个整体求合作博弈解的计算量。运用等值双边交易的概念, 固定成本的分配才能分区进行, 预先分配到各个区域电网。在小型的区域电网内部再建立固定成本分配的合作博弈模型并采用核仁算法求解得到各用户承担的固定成本额。固定成本的分摊不论是在区域之间还是在区域内部都依据了电网的潮流特性, 并且合作博弈模型给出了良好的经济信号。本文方法为多区域互联的大系统的固定成本分配提供了一种有效的途径。

## 参考文献

- [1] Tsukamoto Y, Iyoda I. Allocation of Fixed Transmission Cost to Wheeling Transactions by Cooperative Game Theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 620-629.
- [2] Yu C W, David A K, Wong Y K. The Use of Game Theory in Transmission Embedded Cost Allocation[A]. In: International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. 2000.139-143.
- [3] Lo K L, Lozano C A, Gers O J M. Game Theory Application for Determining Wheeling Charges[A]. In: International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C].

2000.308-313.

- [4] 杨华春, 王鹏, 贺仁睦, 等. 电力市场转运中合作问题的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 37-40.  
YANG Hua-chun, WANG Peng, HE Ren-mu, et al. Study on Cooperation of Wheeling in Electricity Market[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 37-40.
- [5] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于 Shapley 值的输电网损分配[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 18-21.  
JIANG Hui, PENG Jian-chun, OU Ya-ping, et al. Allocation of Transmission Loss Based on Shapley Value[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 18-21.
- [6] 许林, 余贻鑫, 刘怀东, 等. 双侧输电阻塞管理与拟 Aumann-Shapley 定价[J]. 中国电机工程学报, 2002, 20(10): 56-60.  
XU Lin, YU Yi-xing, LIU Huai-dong et al. Double-sided Sided Transmission Congestion Management and Quasi-aumann-shapley Pricing[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 20(10): 56-60.
- [7] 王成山, 吉兴全. 输电网合作投资的费用分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 22-26.  
WANG Cheng-shan, JI Xing-quan. Allocation of Transmission Investment Cost Using Cooperative Game Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 22-26.
- [8] Stamtis G C, Erlich I. Use of Cooperative Game Theory in Power System Fixed-cost Allocation[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 2004, 151(3): 401-406.
- [9] Thmas L C. Games-theory and Applications[M]. Ellis: Horwood Limited, 1984.
- [10] Tan X, Lie T T. Application of the Shapely Value on Transmission cost Allocation in the Competitive Power Market Environment[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(13): 15-20.
- [11] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
YU Er-keng, HAN Fang, XIE Kai, et al. Electricity Market[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [12] Galiana F D, Conejo A J, Gil H A. Transmission Network Cost Allocation Based on Equivalent Bilateral Exchanges[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1425-1431.

收稿日期: 2007-03-15;

修回日期: 2007-07-02

作者简介:

高 效 (1980-), 女, 博士, 研究方向为电力经济;  
E-mail: gaoxiao\_9802@yahoo.com.cn

彭建春 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量、电力市场决策运营和管理、电力系统优化等方面的研究工作;

罗 安 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机控制系统及电力系统自动化的研究。