

输电固定成本分配的合作博弈

童强¹, 高效²

(1. 乐山师范学院物理与电子信息科学系, 四川 乐山 614008; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 电力市场环境下, 传统的输电固定成本分配方法难以从经济的角度说明电网用户之间的利益关系, 合作博弈则是可以协调用户之间经济利益关系的数学方法, 并且有利于实现输电资源的优化配置。基于对传统的成本分配方法的分析, 进一步系统阐述了合作博弈算法分配输电固定成本的优势, 详细分析了输电固定成本分配的多种合作博弈模型和博弈算法及其特点。

关键词: 电力市场; 输电; 固定成本; 分配; 合作博弈

Cooperate games of transmission fixed cost allocation

TONG Qiang¹, GAO Xiao²

(1. Department of Physics and Electronic Information Science, Leshan Teachers College, Leshan 614004, China;

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

Abstract: In the liberalized electricity markets, the reasonable methods for transmission fixed cost could improve grid contribution and electricity deregulation. This paper analyzes many kinds of method using cooperate game theory for the transmission fixed cost recovery. The comparison and analysis focus on the participants' attributes of transmission cooperation, the basic component of cooperate game models and the algorithm of all kinds of solution.

Key words: electricity markets; transmission; fixed cost; allocation; cooperate game theory

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0048-04

0 引言

当前世界上许多国家都在以放松管制, 打破垄断、重组结构、建立竞争的市场机制为目标, 筹备或进行电力工业改革。输电系统作为联系发电与用电的桥梁, 其开放是电力改革的一个重要方面。合理的输电定价则将提供正确的经济信号, 促进输电系统的良性发展。

输电定价可以看成是输电成本在输电用户间的分配过程, 合理的定价模式应满足: 分配过程透明、成本计算简单、公平、无交叉补贴、能够回收全部成本并提供正确经济信号。输电系统的固定成本在输电成本中占很大比例, 并且是一次性投资, 因此及时回收全部固定成本并确保适当的盈利有利于电网的投资再建设。作为独立的市场主体, 电网须按照一定价格对输电服务的享受者收费, 使输电固定成本在输电服务使用者之间进行分配, 这部分费用包括还本付息、法定利润、运行维护费和扩大再生产的投资需求等部分。由于电网的自然垄断性,

合理分配固定成本还必须考虑规模经济效益, 以达到更有利的资源配置, 提高输电资源利用效率。

1 传统成本分配方法评述

输电固定成本分配方法主要分成基于边际成本的经济学方法和基于嵌入成本的会计学方法。

经济学的两类纯粹边际成本方法分别是短期边际成本法和长期边际成本法。短期边际成本法是针对短期输电业务, 计算输电网在提供输电服务时运行成本的边际变化。长期边际成本法考虑电网提供输电服务形成的整体费用, 其具体费用计算受干扰的因素较多, 在实际应用中通常需要简化。

基于嵌入成本的会计学方法包括邮票法、合同路径法和 MV-mile 法、逐线算法、分布系数法、潮流比较法、潮流追踪法。邮票法、合同路径法和不基于实际潮流的 MV-mile 法的共同特点是不考虑输电线路实际潮流和交易对电网的影响, 而根据各用户对电网的近似使用程度分配成本, 计算方便。

逐线算法、分布系数法、潮流比较法、潮流

追踪法则是基于实际潮流的一类方法。逐线计算法依据输电业务的实际潮流在输电网络中的流动情况,来决定其在每条输电线路中的比例,从而决定所分摊的电网成本。分布系数法基于直流潮流灵敏度分析,包括电机转移分布系数法、广义发电分配系数法和广义负荷分配因子法。潮流比较法通过边比较法、微增比较法或综合比较法比较不同情况下的潮流来确定用户对网络的使用程度,据此分摊成本^[1]。潮流追踪法的核心是比例分配原则,考察每条支路中实际潮流的来源与去向,按照“谁使用谁支付”的原则分配输电网固定成本^[2,3]。在此核心思想的基础上发展了许多方法,包括图论^[4]、Commons法、node法^[5]等,潮流追踪法直观、公平合理,易于被用户接受,但是不能提供足够的经济信息。

2 合作博弈模型的形成因素

以上方法以传统的按既定回报率回收电网固定成本、实现严格的收支平衡为成本分配合理性的标准,然而各个承担主体的成本策略之间的相互制约和相互反应被忽略。博弈论则研究这种相互关系下,多个决策主体如何进行各自优化决策。博弈模型本质上都必须包括三个基本要素:局中人,策略和支付函数。在一个对策中,有权决定自己行动方案的参加者为局中人;可供局中人选择的一个实际可行的完整的行动方案为一个策略^[6];博弈的结果决定了每个局中人的得与失,这种得失即为局中人的支付。按照参与者互相联合与否,博弈问题可分为非合作博弈和合作博弈。

输电网固定成本分配的博弈模型中的局中人是输电交易,即和一次电能买卖相关的输电服务。电能的同网同质性^[7],各交易输电量最大值的同时性以及输电线路反向潮流的存在是输电网合作的自然属性。同一电网的各电厂生产的电能质量相同,难以将用户使用的电能与电厂精确对应,只是输电合同上这样认为,因此输电交易合同路径与实际潮流路径可以不一致。最大输电量是用户某一时刻一次性要求输电的最大值。如果同一输电线路上有多个输电业务,每个业务的输电量随时间变化。但由于输电量的最大值不是同时发生的,所以输电电路上总的输电量变化较小^[8]。反向潮流是与线路实际潮流方向相反的潮流,它能够抵消正向潮流,增加网络的输送容量^[9]。最大输电量的不同同时性与反向潮流的存在性能够降低输电网总的运行成本和固定成本变小。当问题结局由多个局中人的行为确定时,若局中人协调行为产生的结局能带来更大的

效益,局中人就有结成联盟的可能^[10],联盟中的所有成员通过充分协商,采取联合行动,争取整个联盟所获得的支付的总和最大,这就是合作博弈。输电固定成本分配是多利益主体协调行为产生效益分配的问题,在微观经济学意义上表示为博弈问题中的参与者如何共同承担联合使用的设施的成本^[11],可以用合作博弈模型求解。

3 输电固定成本分配的合作博弈模型

合作博弈模型的要素是特征函数和局中人集合^[12]。设 $N=\{1,2,\dots,n\}$ 为 n 个局中人所成之集, $S\subset N$ 称为一个联盟。对局中人的每个子集 S ,函数值 $v(S)$ 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收益值,这样的 $v(S)$ 称为 n 人对策的特征函数。在合作博弈中,特征函数表示联盟的总的支付。根据特征函数的概念,输电网的使用者中联盟 S 外的局中人采取最坏的策略就是不加入联盟 S ,因此特征函数的值是假定 S 外的局中人暂时没有使用电网时计算联盟 S 的总支付。

合作博弈特征函数的超加性与输电网的规模经济性使得各个输电业务相互合作比其单独运行更为经济,所分配的成本比单独运行少,在输电成本分配过程中各理性局中人均促进全体局中人组成的联盟即大联盟的形成。因此输电固定成本分配的合作博弈模型中,哪些人结成联盟已不是主要需要考虑的问题,重要的是大联盟的收益将如何分配才能使所有局中人都满意,使每个局中人都愿意促进大联盟的形成。

4 输电固定成本分配的合作博弈算法

合作博弈要想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,这就是通常说的找这个博弈的解。合作博弈的解主要有核心(core)、稳定集(stable set)、核仁(nucleolus)、核(kernel)、谈判集(bargaining set)、shaply值等^[13],但是目前输电固定成本分配的研究中用得最多的只有核心、核仁、核和shapley值^[14,15]。

4.1 合作博弈的核心解

v 是对策 $\Gamma=(N,v)$ 的特征函数,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。对应到输电固定成本分配问题,分配 x 中的元素可以指各局中人承担的线路固定成本份额。用合作博弈解分配固定成本首先要确定线

路的固定成本或者容量使用度。线路使用度有容量使用度和能量使用度,用户对输电线路的容量使用度是系统峰荷状态下线路的输电量。各条线路固定成本由 MW-mile 法确定,电网的使用者对线路容量的使用度则由牛顿-拉夫逊算法确定^[8,9,16]。

核心是合作博弈中一种利益分配的集合,集中的每个分配,均使得没有任何一些局中人能够通过组成联盟而提高他们自己的总和收益,因此核心的每个分配都能够被任何联盟所接受。对策的核心 $C(v)$ 可表示为满足下列条件的支付向量 x 的全体。

$$x(S) \geq v(S), \quad \forall S \subset N$$

$$x(N) = v(N)$$

各输电交易联盟减少输电线路的最大输电容量,从而线路的固定成本减少,核心解给出局中人一个成本最小分配的集合,使得联盟中的局中人都没有理由脱离联盟^[8]。

4.2 合作博弈的核仁解

核仁 $Nu(v)$ 是使 $\theta(x)$ 按字典序达到最小的那种分配之全体,即

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

$E(v)$ 表示分配的全集,“ \leq ”表示核仁中的字典序。定义联盟 S 关于 x 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 $\theta(x) = (\theta_1(x), \theta_2(x), \dots, \theta_{2^n}(x))$ 。其中 $\theta_i(x) = e(S_i, x) (i = 1, 2, \dots, 2^n)$, S_1, S_2, \dots, S_{2^n} 是 N 的所有子集的一个排列,满足 $e(S_1, x) \geq e(S_2, x) \geq \dots \geq e(S_{2^n}, x)$ 。

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

如果存在 $1 \leq k \leq 2^n$, 使

$$\begin{cases} \theta_i(x) = \theta_i(y), & i = 1, 2, \dots, k-1; \\ \theta_k(x) < \theta_k(y), \end{cases}$$

则称向量 $\theta(x)$ 按字典序小于向量 $\theta(y)$, 记为 $\theta(x) <^L \theta(y)$ 。 $\theta(x) \leq^L \theta(y)$ 则表示: 或者 $\theta(x) <^L \theta(y)$, 或者 $\theta(x) = \theta(y)$ ^[13]。核仁分配输电固定成本, 优先考虑最不满意的联盟, 选择的分配要使这种联盟的怨言达到最小; 在此基础上, 再考虑次不满意的联盟, 所选分配要使其不满意程度尽可能地小, 如此直到所有联盟的不满意度都尽可能小。任何合作对策的核仁存在并且唯一, 总能给各个输电交易一个合理的分配。在确定了线路提供 1MW 输电服务的

固定成本后, 求出潮流节省量按照核仁算法在大联盟局中人的分配, 再计算各局中人实际潮流量, 得出各人承担的固定成本^[9]。

4.3 合作博弈的shapely值

shapely 值在直观上是一个局中人对其所能参与的各种联盟做出的边际贡献的平均值, 这种边际贡献是由于此局中人的加入各种联盟总收益的增长, 其计算公式为

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subset N-i} \frac{s!(n-s-1)!}{n!} (v(S \cup i) - v(S))$$

式中: $\varphi_i(v)$ 称为 Shapley 值, $s = |S|$ 表示联盟 S 中局中人的个数, $S \cup i$ 表示局中人 i 加入联盟 S 后形成的新联盟。对于每个输电业务来说, Shapley 值是它加入其他已经形成的输电业务联盟时对联盟的固定成本的贡献, 即它可以减少联盟成员承担的成本。Shapley 值分配成本首先要计算网络的最优潮流, 把联盟的特征函数即固定成本表示成线路潮流的函数, 在联盟中用 Shapley 值将成本分配到各负荷^[17]。Shapley 值分配博弈的局中人还可以是对应于网络节点的输电网的使用者, 按照各个节点对电网潮流的贡献用 shapley 值向量把固定成本分配到节点^[18]。shapley 值还能说明从物理角度无法证明的潮流追踪法分配输电固定成本的基本原则比例共享原则的经济合理性^[19]。

4.4 各种合作博弈解的比较

运用合作博弈的核心、核仁和 shpley 值分配输电固定成本的基本方法是先确定线路固定成本或者使用度再用其中一种博弈解把潮流或成本节省量或者固定成本分配给局中人。在此方法的基础上进行改进, 比如考虑无功的影响^[16], 重新定义输电成本分配中的局中人^[18], 将环流看一种附加的输电交易参与分配^[8]等。

运用核心、核仁、shpley 值分配输电固定成本各有利弊。核心、核、核仁都是博弈的平衡结果, 它们考虑了在预先进行的协商过程中想坚持的一种分配或一组分配。如果它是未被优越的, 这种分配就是核心; 如果它把最大的不幸最小化, 它就是核仁; 如果每一对在同一联盟内的局中人都处于平衡状态, 这种分配就是核。核心的概念清晰, 其中的分配使得任何联盟都没有能力推翻它, 但是核心存在一个致命的缺陷是可能为空集。文献[20]中利用基于输电网的使用者对线路的容量使用度的分配方法例如邮票法、MV-mile 法等得到的一组分配结果, 按照一组非负的权值加权求和, 求出一个属于核心或者接近核心的分配。解决了基于使用度的方法在各交易间产生交叉补贴的问题, 同时也避免了核心求解为空集的情况。核心是一个解集, 核仁和

Shapley 值都能得到合作博弈的唯一解,但是 Shapley 值向量不一定是分配,它只有满足核心的条件 $x(S) \geq v(S)$ 时才是分配,核仁却给每一个博弈定义了唯一的分配向量。核仁解不满足 Shapley 值所遵守的可加性和单调性,当联盟的总收益增加,核仁分配固定成本时联盟的每个局中人的收益不一定会增加, Shapley 值形成的分配是单调的,联盟总收益增加,各个局中人的收益也会不同程度地增加^[9]。Shapley 值的计算比较简单,但是对大规模系统,输电交易数量多,局中人数目 n 的值较大,会有联盟组合的爆炸问题,不利于工程计算。核仁的计算可通过求解一系列线性规划来完成,理论上是可行的,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将比较困难,几乎无法实现。

5 结语

输电固定成本分配方法的研究是电力市场改革一个重要方面。虽然博弈论应用于这个方面是近十年才兴起的,但是它凭借其良好的经济背景备受关注。成本分配中应用博弈论能够为输电网的用户提供一定的经济信号,引导用户有效利用输电资源,促进资源的优化配置。本文对合作博弈的三种解核心、核仁和 shpley 值分配输电固定成本进行了分类综述,介绍了这些解的概念和数学计算方法,阐述了各种解分配输电固定成本的方法,并对各种解形成的分配加以比较分析,得出其优缺点。但是由于输电系统的特殊性以及合作博弈解的复杂性,对实际系统建立合作博弈模型和求解都比较困难,有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 荆朝霞,段献忠,文福拴,等. 输电系统固定成本分摊问题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 94-100. JING Zhao-xia, DUAN Xian-zhong, WEN Fu-shuan, et al. A Literature Survey on Allocations of Transmission Fixed Costs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 94-100.
- [2] Bialek J. Tracing the Flow of Electricity[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 1996, 143(4): 313-320.
- [3] ZHANG Qian, YU Ji-hui. Research on Transmission Services Pricing Based on Allocation of Fixed Transmission Cost[A]. In: Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on Services Systems and Services Management[C]. 2005.1369-1374.
- [4] WEI Ping, YUAN Bin, NI Yi-xin, et al. Power Flow Tracing for Transmission Open Access[A]. In: Proceedings. DRPT 2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C].2000.476-481.
- [5] Rosado S P, Abdel-Rahman K, HadjSaid N. Tracing the Path of Electric Power Flow-a Study for Deregulated Power Systems[A]. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C].2001.1479-1484.
- [6] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. HU Yun-quan, GUO Yao-huang. A Course in Operation Research[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1998.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Yeung C S K, Poon A S Y, Wu F F. Game Theoretical Multi-agent Modelling of Coalition Formation for Multilateral Trades[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 929-934.
- [11] 李大鹏, 王喆, 张少华. 非线性互补方法和 Shaply 值在基于最优潮流的电力传输固定成本的分担计算中的应用 [J]. 上海大学学报, 2004, 10(2): 134-138. LI Da-peng, WANG Xian, ZHANG Shao-hua. Application of Nonlinear Complementarity Method and Shapely Value to Fixed Allocation of Transmission Cost Based on Optimal Power Flow[J]. Journal of Shanghai University, 2004, 10(2): 134-138.
- [12] Thomas L C. 对策论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1988. Thomas L C. Game Theory and Its Application[M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Press,1988.
- [13] 谢政. 对策论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004. XIE Zheng. Game Theory[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,1998.
- [14] Lo K L, Lozano C A, Gers O J M. Game Theory Application for Determining Wheeling Charges[A]. In: Proceedings. DRPT 2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C].2000.308-313.

(下转第 88 页 continued on page 88)

位置很分散,对电动隔开的监控如图3所示。

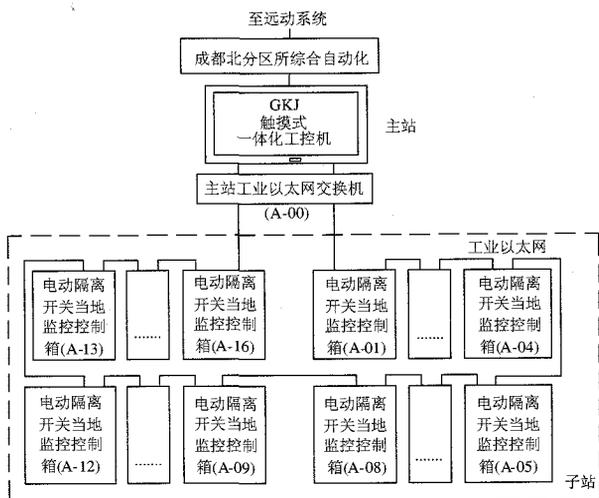


图3 电动隔离开关监控图

Fig.3 Monitoring plans for electrical isolation switch

全站由主站一处、子站十六处,通过工业以太网交换机联接,将控制信号传递到可触摸式一体化工控机进行运算、分析,做出正确判断,或听从上级综合自动化系统下达指令进行操作。

经三年来运行实践,此方案具有以下突出优点:

1)各监控设备之间采用工业以太网交换机进行信息交换,传输介质为光缆,管理简洁,抗干扰能

力强。

2)触摸式一体化工控机通过工业以太网实现对隔离开关的遥控、遥测、遥信。当环网某一点出现故障时,不会影响整个系统通信。

3)在系统任何一个节点,均可灵活实现对这个系统设备的编程、监视、维护工作。

4 结束语

综上所述,本系统原理简单清晰,结构简洁,应用方便,扩展灵活;只需简单的软硬件配置,即可完成控制功能编程,避免了在监控设备间编制复杂的通讯程序,系统的可靠性也得到有力保障。本系统不仅适用于铁路站场、枢纽,也适用于接触网供电设备集中的机务段、复线区段V停反行、柱上分区亭、大站场半场停电等相关处所,是提高运行效率、减少停电时间、避免误操作等的先进技术装备,大大提高了供电系统的自动化水平和可靠性,应用范围前景十分广泛。

收稿日期:2008-05-22

作者简介:

周丽洁(1972-)女,工程师,主要从事牵引供变电设计工作;

张博(1968-)男,工程师,主要从事牵引供变电设计工作。

(上接第51页 continued from page 51)

- [15] Zolezzi J M, Rudnick H. Consumers Coordination and Cooperation in Transmission Cost Allocation[A]. In: IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings[C]. 2003.23-26.
- [16] Yu C W, David A K, Wong Y K. The Use of Game Theory in Transmission Embedded Cost Allocation[A]. In: APSCOM-00. 2000 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C].2000.139-143.
- [17] 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.
- [18] Shishido H. Fair Cost Sharing of Network Maintenance[A]. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics[C].2003.3720-3725.

[19] Kattuman P A, Green R J, Bialek J W. Allocating Electricity Transmission Costs Through Tracing: a Game-theoretic Rationale[J]. Operations Research Letters, 2003, 32(2): 114-120.

[20] Bjorndal E, Stamtis G C, Erlich I. Finding Core Solutions for Power System Fixed Cost Allocation[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 2005, 152(2): 173-179.

收稿日期:2007-10-29; 修回日期:2007-12-28

作者简介:

童强(1974-),男,硕士研究生,讲师,研究方向为电力市场和电力系统FACTS方面的分析计算以及电力电子在电力系统中的应用;E-mail: tq889@yahoo.com.cn

高效(1980-),女,博士研究生,主要从事电能质量、电力经济方面的研究工作。