

输电网合作投资费用的计算与分摊

鲁 粟, 彭建春, 黄 攀, 陈 锐

(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, 输电费用的计算和分摊成为必须解决的问题之一。而此时各发电厂和用户都将成为独立行为的个体, 他们具有合作的潜力以降低成本或获得最大利益。利用输电网的合作特性, 给出了由发电厂投资修建输电网的计算方法, 并提出结合作博弈理论, 采用核心、核仁、夏普利值三种方法将成本分摊到各个用户。

关键词: 输电网; 投资费用; 核心; 核仁; 夏普利值

中图分类号: TM 73; F 123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)01-0017-04

电力工业改革的主要内容之一就是实行输电系统开放 TOA(Transmission Open Access)^[1], 因此输电系统就从传统的发电、输电、配电垂直一体化的管理模式中脱离出来, 成为单独的机构, 负责输电网的投资建设和维护。由于输电网的建设具有规模效应且投资额较大, 如何合理计算和分摊这部分费用就直接关系到输电网今后的建设与发展。

针对电力市场环境下, 各个发电方和用户都成为独立行为的个体, 他们能够采取合作的方式进行输电网的修建以减少各自的成本。本文中结合作博弈论, 首先指出输电网具有合作的特性, 然后提出依据经济电流密度计算出合作环境下的输电网投资成本, 最后应用合作博弈解的概念(核心、核仁、夏普利值)将整个投资费用分摊到各用户。

1 输电网具有合作特性

输电线路的最大输电量是指该线路上的潮流峰

值, 它是输电网投资建设的主要依据, 它的大小直接影响到输电网的投资建设成本。最大输电量越大, 电压等级就越高, 对绝缘的要求也就越高, 其投资费用就越大。但实际上, 每条输电线的综合最大输电量一般不等于其线路上的多个输电业务的最大潮流之和^[2]。这是因为, 输电系统的负荷需求是随时间变化的, 线路上流过的供给用户的最大潮流一般不会同时出现, 即线路的综合最大输电量要小于各个业务的最大输电量之和。如果用户利用输电网的合作特性, 就能够使输电线路上的总的最大输电量减少, 也就是使整个输电网的投资费用减少。例如, 在图 1 所示的单一输电线路中有三笔输电交易 T_1, T_2, T_3 , 它们随时间变化的负荷曲线见图 2^[3]。

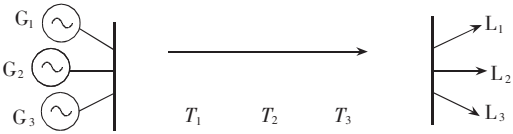


图 1 三交易的输电线路

Fig.1 The transmission line of three-transaction

从图 2 所示负荷曲线可知:全天 24 h 中, $P_{\max}(T_1) = 50 \text{ MW}$; $P_{\max}(T_2) = 50 \text{ MW}$, $P_{\max}(T_3) = 50 \text{ MW}$ 。若三笔输电交易同时进行,整条输电线路的最大输电量为 100 MW。这样,图 1 所示的输电线路就应该以最大输电量 100 MW 设计,而不应该是 150 MW。

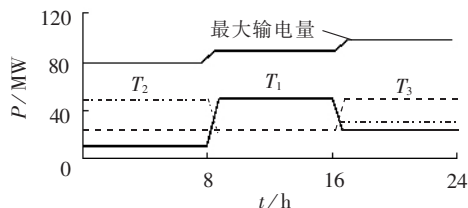


图 2 三交易的负荷曲线

Fig.2 The load curve of three-transaction

2 投资费用计算

输电网的投资费用一般由输电线路的导线截面面积大小和线路的长度决定。当输电网的电压一定时,输送功率越小,导线上流过的电流就越小,相应的导线等载流部分的截面面积越小,线路的投资费用也就越小^[4]。同样,输电线路的投资费用与线路的长度成正比,线路越短,投资费用就越小。本文中基于直流潮流模型并结合负荷的时间特性,得到各线路的最大输电量 P ,然后依据线路的经济电流选择相应的导线截面,从而可以得到输电线路的投资费用。其数学模型如下:

$$\min C_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \quad (2)$$

$$S_{ij} = P_{ij} + j Q_{ij} \quad (3)$$

$$SE_{ij} = (\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2})_{\max} / (\sqrt{3} J U_N) \quad (4)$$

$$C_{ij} = c_{ij} l_{ij} \quad (5)$$

式(1)为投资费用的目标函数, C_{ij} 为导线 ij 的总投资成本;式(2)为直流潮流方程, P_{ij} 是节点 i, j 之间的线路有功功率, θ_i 是节点 i 的电压相角, x_{ij} 是支路电抗;式(3)中 S_{ij} 为支路的视在功率, Q_{ij} 为支路的无功功率;式(4)为导线的经济截面积的计算式, SE_{ij} 为导线 ij 的经济截面积, J 为经济电流密度, U_N 为线路的额定电压^[5];式(5)中 c_{ij} 为导线 ij 单位长度的投资成本, l_{ij} 为线路长度。

3 基于合作博弈解的费用分摊方法

合作博弈一般是指若干参与者结成联盟,共同协作争取联盟体的最大利益或者最小成本,再把利益或成本进行系统内部分配的博弈。合作博弈的解由核心(core)、核仁(nucleolus)、夏普利(shapley)值等几种形式构成。合作博弈问题中,参与成本分配的成员的整体记为 N ,记 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。当其成员根据各自的利益结盟而形成的联盟体记为 S ,则 $S \in N$ 。这样,对于 n 个成员博弈的问题,就有 2^n 个联盟(包括空联盟)。联盟 S 通过协调其成员的策略所能付

出的最小成本通常用特征函数 $V(S)$ 表示。特征函数 $V(S)$ 与成本函数之间的关系式为^[6]:

$$V(S) = \sum_{i \in S} C(i) - C(S) \quad (6)$$

文中采用的基于合作博弈解的分摊方法,就是要将大联盟 N 所取得的合作成本收益 $V(N)$ 用三种解的形式分配给各个成员,其各成员分得的份额,用向量 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示。则各成员最终应承担的输电费用的投资成本即为

$$C'(i) = C(i) - x_i \quad (7)$$

式中 $C(i)$ 为各成员合作以前单独修建输电线路的成本; $C'(i)$ 为合作以后,各成员应承担的输电投资成本。

显然 $C'(i) \leq C(i)$,即每个成员合作后的成本都应不大于合作前的投资成本,否则就根本没有形成联盟的必要。下面给出合作博弈三种解的基本形式^[7]。

3.1 核心

核心是对任何联盟均不能被优越的分配向量的集合,即分配向量 $\mathbf{x}$ 若在联盟形成的核心中,则 $\mathbf{x}$ 就是这个联盟的最佳分配向量。核心要求满足:

$$\sum_{i \in S} x_i \geq V(S) \quad \text{对于所有的 } S \subset N \quad (8)$$

合作博弈的核心解可能为一个区域(即存在多个分配向量),也可能为空集。

3.2 核仁

核仁依据的基本思想是:分配属于核仁的条件下,最不理想的联盟也要优于任何其他分配向量的最不理想的联盟。核仁解有两个性质:

- 每个博弈有一个而且只有一个核仁;
- 如果存在核仁,则核仁位于核心之内。

核仁的定义为

$$\theta(\mathbf{x}) = V(S) - \mathbf{x}(S) \quad S \subset N \quad (9)$$

$$N(V) = \{ \mathbf{x} \in E(V) \mid \theta(\mathbf{x}) < \theta(\mathbf{y}), \mathbf{y} \in E(V) \} \quad (10)$$

其中 $\theta(\mathbf{x})$ 是成员的投资成本与实际上成本减少值的差额,该数越大,采取这种分配就越不理想; $E(V)$ 为所有的分配向量的集合。

3.3 夏普利值

夏普利值讨论的是联盟的成员以随机次序加入联盟 N 的分配结果。它描述的是一种联盟形成过程,成员 i 的夏普利值也就是当已有 $S - \{i\}$ 个成员形成联盟,而剩下的 $N - S$ 个成员参加联盟之前,成员 i 的加入而形成的边际成本,其计算式为

$$\phi_i(V) = \sum_{i \in S} \frac{(\# S - 1)!(n - \# S)}{n!} \times [V(S) - V(S - \{i\})] \quad (11)$$

式中 $\# S$ 是联盟 S 内的成员数。

4 算例

4.1 各种联盟下的投资费用

图 3 所示为一小区域的供电图^[8]。节点 1 上有个发电厂,它的最大发电容量为 80 MW,其功率因数

为 0.9,本文中规定输送功率 30 MW 以下的额定电压等级为 35kV,30MW 以上额定电压等级为 110kV。发电厂负责投资修建输电网,把电能送到邻近的 3 个用户区,它们之间的距离(km)见图 3,其中各用户对负荷各时段(24 h 分 3 个时段)的需求见表 1。

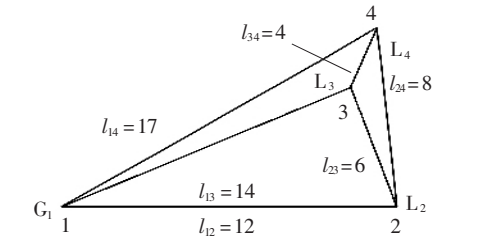


图 3 三负荷的地理分布图
Fig.3 The geographical distribution of three loads

表 1 不同时段的线路负荷
Tab.1 Loads of transmission line in different times

节点	0~8	8~16	16~24	MW peak
L ₂	15	10	9	15
L ₃	17	25	11	25
L ₄	25	30	40	40
Σ	57	65	60	80

为了使整个发电厂的投资费用最少,发电厂可以选择在它与用户之间修建输电线路 l_{12} , l_{13} 和 l_{14} ,直接输送电能到用户;也可以选择最近的线路并利用输电网的合作特性进行电能之间的转运,如线路 l_{12} , l_{23} 和 l_{34} 。从表 1 中可以看到,节点 2 上的用户对电力的最大需求为 15 MW,节点 3 上的用户最大需求为 25 MW,节点 4 为 40 MW。考虑到 3 个用户均距离发电厂较远,而用户之间距离较近,若利用输电网的合作特性,进行能量的转运,则可以减少土地资源的开垦,节约了人力、物力,也就节省输电网整体投资。

文中按式(4)计算出经济电流密度,从而选择导线截面积,然后根据导线的市场价格和输电线路的长度确定输电线路的投资费用,从而得到用户不同联盟下的投资成本为: $C(2)=29.6, C(3)=65.2, C(4)=34.0; C(2,3)=47.1; C(2,4)=45.6, C(3,4)=52.5, C(2,3,4)=78.3$ 。

再按式(6)计算从而得到不同联盟下的特征函数值为: $V(2)=0, V(3)=0, V(4)=0, V(2,3)=47.7, V(2,4)=18, V(3,4)=46.7, V(2,3,4)=50.5$ 。

4.2 投资费用的分摊

发电厂投资修建输电线路,但输电网的受益人是各个用户,所以说无论是谁投资修建电网,输电费用的最终承担者还会是用户。一般情况下,投资者采用某种原则分摊这部分费用,但如何使分配原则做到公平,一直是投资方想要探讨的问题。本文中,针对输电系统开放的条件下,各个参与成本分配的成员都是独立行为的实体,并且它们的行为均为理

智的(各自的成本分摊值最小),利用合作博弈的三种解的概念得到分摊的投资费用。

a. 核心

$$\begin{aligned} x_2+x_3+x_4 &= 50.5 \\ x_2, x_3, x_4 &\geq 0, \quad x_2+x_3 \geq 47.7 \\ x_2+x_4 &\geq 18, \quad x_3+x_4 \geq 46.7 \end{aligned}$$

通过画图,知此线性方程组无解,故核心不存在。

b. 核仁^[9]

$$\begin{aligned} \min \quad & \varepsilon \\ \text{s.t.} \quad & x_2+x_3+x_4=50.5, \quad x_2+\varepsilon \geq 0 \\ & x_3+\varepsilon \geq 0, \quad x_4+\varepsilon \geq 0, \quad x_2+x_3+\varepsilon \geq 47.7 \\ & x_2+x_4+\varepsilon \geq 18, \quad x_3+x_4+\varepsilon \geq 46.7 \end{aligned}$$

通过 Matlab 计算得: $x_2=7.6, x_3=36.3, x_4=6.6$;各用户应承担的投资费用分别为: $C'(2)=22, C'(3)=28.9, C'(4)=27.4$ 。

c. Shapley 值^[10,11]

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{0! \, 2!}{3!} [v(2)-0] + \frac{1! \, 1!}{3!} [v(2,3)-v(3)] + \\ & \quad \frac{1! \, 1!}{3!} [v(2,4)-v(4)] + \\ & \quad \frac{2! \, 0!}{3!} [v(2,3,4)-v(3,4)] = 12.2 \\ x_3 &= \frac{0! \, 2!}{3!} [v(3)-0] + \frac{1! \, 1!}{3!} [v(2,3)-v(2)] + \\ & \quad \frac{1! \, 1!}{3!} [v(3,4)-v(4)] + \\ & \quad \frac{2! \, 0!}{3!} [v(2,3,4)-v(2,4)] = 26.6 \\ x_4 &= \frac{0! \, 2!}{3!} [v(4)-0] + \frac{1! \, 1!}{3!} [v(2,4)-v(4)] + \\ & \quad \frac{1! \, 1!}{3!} [v(3,4)-v(3)] + \\ & \quad \frac{2! \, 0!}{3!} [v(2,3,4)-v(2,3)] = 11.7 \end{aligned}$$

故各用户应承担的投资费用分别为: $C'(2)=17.4, C'(3)=38.6, C'(4)=22.3$ 。

4.3 分析

文中用合作博弈三种解的概念(核心、核仁、夏普利值)分摊了整个输电网投资修建的成本,得到了不同原则下的分配结果。它们各有优缺点。核心是合作博弈论中出现得最早的解的概念,它在博弈论中占有非常重要地位,往往把核心中的分配作为分配的解是可行的,但它最大的缺点就是核心可能不存在。核仁的性质保证了核仁有且仅存在唯一解,这为所有的成本分配问题提供了便利,但随着大电网的形成,参与成本分配的成员 n 增大,求解 2^n 个线性方程组比较困难。夏普利值从考虑联盟边际收益的均值出发,具有单调性的特点(即投资的总成本减少,则每个成员的成本都会减少),同样当 n 增大时,联盟组合 2^n 太多,而导致无法求解。

5 结论

随着输电系统的开放,如何合理计算和分摊输电费用是电力市场条件下必须解决的重要问题之一。本文中利用输电线路最大负荷不同时性,采取了用户之间合作投资修建输电网方法,并基于合作博弈三种解的概念分摊了整个投资成本,得到了不同的结果。在算例中,基于核心求得的结果不存在,基于核仁解和夏普利值得到的结果也存在一定的区别,这是由于核心和核仁分摊的角度不同所引起的,但究竟那一种解更好,具有实用性,还需要进一步研究。可以预见,电力系统打破原有的垄断格局后,各发电厂和用户之间合作必然会成电力市场下的趋势,因此合作博弈论将会发挥更大的潜力。

参考文献:

- [1] PAN Jiu-ping, TEKLU Y, RAHMAN S. Review of usage-based transmission cost allocation methods under open access [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(4): 1218-1224.
- [2] 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.
- [3] TSUKAMOTO Y, IYIDA I. Allocation of fixed transmission cost to wheeling transactions by cooperative game theory [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1996, 11(2): 620-629.
- [4] 陈 珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
CHEN Heng. Analysis of power system stability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1985.
- [5] 曹敏绳. 电力系统课程设计及毕业设计参考资料[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
CAO Min-sheng. The reference for curriculum project and diploma project of power system subject [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [6] YU C W, DAVID A K, WONG Y K. The use of game theory in transmission embedded cost allocation [A]. **Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management** [C]. Hong Kong: [s.n.], 2000. 139-143.
- [7] 托马斯 L C. 决策论及其应用[M]. 靳 敏, 王 辉译. 天津: 解放军出版社, 1988.
THMAS L C. Games theory and application [M]. Translated by JIN Min, WANG Hui. Tianjin: PLA Press, 1998.
- [8] 刘德铭, 黄振高. 对策论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1994.
LIU De-ming, HUANG Zhen-gao. Game theory and application [M]. Changsha: National Technology University Press, 1994.
- [9] CONTREAS J, WU F F. A kernel-oriented algorithm for transmission expansion planning [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(4): 1434-1440.
- [10] ZOLEZZI J M, PUDNICK H. Transmission cost allocation by cooperative game and coalition formation [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2002, 17(4): 1008-1015.
- [11] CONTREAS J, WU F F. Coalition formation in transmission expansion planning [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1999, 14(3): 1144-1151.
- [12] 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.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

鲁 粟(1980-), 女, 湖南澧县人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场定价与管理(E-mail: lul818@126.com);

彭建春(1964-), 男, 湖南桃源人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力市场决策、运营和管理, 电力系统优化运行与控制等研究工作;

黄 攀(1980-), 男, 湖南永兴人, 硕士研究生, 主要从事电力市场及其软件开发的研究;

陈 锐(1978-), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场。

Computation and allocation of transmission cooperative investment costs

LU Li, PENG Jian-chun, HUANG Pan, CHEN Rui

(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Computation and allocation of transmission costs is one of the problems that must be solved in the environment of electricity market. While power plants and consumers are independent individuals, they possess cooperation potential to decrease costs and obtain the maximum benefits, based on which an investment computation method is presented for power plants to build the transmission network. The costs are allocated among users applying the core method, nucleolus method and Shapley value method combined with cooperative game theory.

Key words: transmission network; investment cost; core; nucleolus; Shapley value