

输电固定成本分摊的 AR-DEA 合作博弈核仁解方法

王金凤¹, 孟徐飞¹, 王 铮², 杨丽徙¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司信息通讯公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 针对现有输电固定成本分摊方法不能保证完全回收成本和提供经济信号的问题, 提出基于 AR-DEA 与合作博弈核仁解的输电固定成本分摊方法. 首先考虑用电量、分时电价和电能质量等因素, 构建成本分摊指标体系; 然后在数据包络分析基础上建立合作博弈模型, 并引入保证区域的限制来对权重进行约束, 得到考虑多指标权重约束的输电固定成本分摊模型; 最后通过算例验证了方法的可行性.

关键词: 数据包络分析; 合作博弈; 核仁解; 输电固定费用成本分摊

中图分类号: TM73; F123 .9 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.011

0 引言

目前, 输电固定成本的合理计算与分摊不仅成为电力市场良好发展的关键, 也成为电力市场必须解决的核心问题^[1-2]. 国内外关于输电固定成本分摊方法的主要有三类: 综合成本法^[3] (包括邮票法、MW-km 法、合同路径法和边界潮流法等)、边际成本法^[4] (包括长期边际成本法和短期边际成本法) 和基于合作博弈的方法^[5]. 然而, 单纯的利用合作博弈的方法, 不管是基于夏普利值, 或者基于核仁解^[6] 来解决成本分摊问题, 都只考虑用电量或输送功率单个指标, 忽略电能质量、分时电价等指标的影响, 使得分摊结果并不合理, 不能满足电力市场的发展需求.

数据包络分析方法 (Data Envelopment Analysis, DEA) 是由 Charnes 等人在 1978 年提出^[7], 主要是通过比较决策单元偏离 DEA 前沿面的程度来评价它们的相对有效性. 在 1999 年, Cook 等^[8] 首次将 DEA 方法应用于固定成本分摊问题, 他们首先将固定成本作为决策单元的一种新投入要素, 然后根据固定成本分摊前后所有决策单元效率不变性和帕雷托最小性给出了问题的解决思路. 但是, 目前利用 DEA 理论解决固定成本分摊问题的研究均没有考虑到决策单元之间存在既竞争又合作的博弈关系.

笔者将博弈论引入 DEA 模型, 使用 DEA 合作博弈核仁解的方法来解决输电固定成本分摊问题,

考虑用电量、分时电价和电能质量等多个因素, 建立固定成本分摊指标体系, 然后基于 DEA 合作博弈核仁解模型确定各用户的分摊比例. 通过引入保证区域 (Assurance Region, AR) 的限制和权重约束的概念, 通过对比分摊指标有无权重约束来判断分摊结果的合理性.

1 用户输电费用固定成本分摊指标

采用文献[9]的方法, 将用电量、分时电价和电能质量作为指标, 建立成本分摊指标体系.

(1) 用电量指标: 即用户的年用电量.

(2) 各用户的分时电价指标:

$$D_i = \sum_{j=1}^m T_j (\alpha_j t_{ij,f} + t_{ij,p} + \beta_j t_{ij,g}), i = 1, 2, \cdots, n,$$

(1)

式中: D_i 为用户 i 的分时电价指标; n 为用户数量; m 为划分的典型日数; T_j 为典型日 j 对应的天数; α_j 、 β_j 分别为典型日 j 的峰、谷电价比; $t_{ij,f}$ 、 $t_{ij,p}$ 、 $t_{ij,g}$ 分别为用户 i 在典型日 j 的峰、平、谷利用的小时数.

(3) 电能质量指标: 利用电能质量综合指标 S_{PQI} 对电能质量国家标准涉及的 5 个指标进行综合评估, 包括供电电压允许偏差、公用电网谐波、电压允许波动和闪变、三相电压允许不平衡度和电力系统频率允许偏差. 电能质量评定等级分为 1~5 等.

收稿日期:2016-06-25; 修订日期:2016-09-18

基金项目: 郑州大学青年骨干教师资助项目

通信作者: 王金凤 (1977—), 女, 河南宁陵人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力网络规划、电力经济等相关研究, E-mail: wangjinfeng@zzu.edu.cn.

(4)评价指标的归一化处理:根据综合评价要求,为计算方便对各指标进行归一化处理.

2 DEA 合作博弈方法

2.1 DEA 决策矩阵及局中人收益

假设有 n 个局中人和 m 个决策标准,构造一个决策矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

(2)

对该决策矩阵的每行进行求和归一化处理,即

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1.$$

假设某个决策属性对局中人越有利,局中人就越倾向于按照这个决策属性执行,那么这个决策属性的权重值就越大.对于每个局中人 k ,其选择的执行的权重为:

$$\omega^k = (\omega_1^k, \omega_2^k, \cdots, \omega_m^k).$$

(3)

则每个局中人收益为:

$$c(S) = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^k (\sum_{j=1}^n x_{ij})}.$$

(4)

2.2 局中人分摊值最小化的 DEA

根据每个局中人收益,可知局中人分摊最小化的模型为:

$$\min \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^k (\sum_{j=1}^n x_{ij})};$$

(5)

$$\text{s. t. } \omega_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

经过 Charnes-Cooper 变换^[10],将其转化为线性规划:

$$c(k) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik};$$

(6)

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_i^k = 1, \omega_i^k \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

经过以上转化,问题就变为求上式的目标函数.为了求解上面的问题,引入 DEA 合作博弈.

2.3 DEA 合作博弈假设

(1)在输电固定成本分摊过程中,各个用户间可相互结盟且结盟后各成员是团体理性的,都同意不打破此博弈,以获得最大利益.

(2)在分析中不考虑输电系统的可靠性以及其他电力市场的不确定因素.

假设有 n 个局中人构成联盟整体 N ,它们之间任意组合,包含空联盟在内可形成的联盟个数为 2^n . N 的任一子集 S 构成一个联盟,以便获得最小的联盟成本 $c(S)$. 其中:

$$c(S) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i x_i(S),$$

(7)

$$\text{s. t. } x_i(S) = \sum_{j \in S}^n X_{ij};$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

显然, $c(N) = 1, c(\Phi) = 0$. 文献[11]证明 $c(S)$ 具有次可加性,即

$$c(S \cup T) \leq c(S) + c(T).$$

联盟 S 和联盟 T 形成大联盟时分配总额小于或等于两者不联盟所分配的固定成本总额,因此,可以将 $c(S)$ 作为联盟 S 的特征函数.

2.4 合作博弈的核仁解

在研究多人合作博弈时,如果任一局中人在对其最不利的分配方案中仍获得了成本最小或利益最大的结果,那么这个分配方案就是核仁.核仁解的输电固定费用分配的数学模型可描述成下述线性规划问题:

$$\min \varepsilon.$$

(8)

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^N y_j + \varepsilon \geq z(S), N = \{1, 2, \cdots, 2^n\};$$

$$z(S) = \sum_{j \in S} c(j) - c(S);$$

$$\sum_{j \in N} y_j = z(N);$$

$$c'_j = c(j) - y_j,$$

式中: $c(j)$ 是电网中仅存在用户 j 时的输电成本特征函数值; $c(S)$ 是多用户形成联盟 S 共同使用输电网时,不论联盟外部用户使用什么策略,联盟 S 内用户所共同承担的固定成本; y_j 是局中人 j 在输电成本分配函数中的成本超出矢量; $z(S)$ 是联盟 S 中用户通过结成联盟比每个人单独使用电网时所减少的固定费用; $z(N)$ 是形成大联盟时固定费用减少的总额; c'_j 是用户最终应承担的固定成本,是由每个用户使用电网时的固定成本减去相应的成本超出矢量求得.

2.5 AR-DEA 合作博弈

AR (Assurance Region) 即保证区域,因为 DEA 计算得到的权重值变化较大,在结合 AR 后将得到的权重值限制在一定范围内变化,使

得到的权重分配更加合理. 假定用电量所占的权重较大,定义限定条件为:

$$L_i \leq \frac{\omega_i}{\omega_1} \leq U_i.$$

(9)

将限定条件引入到联盟 S 的特征函数中,得到 AR-DEA 合作博弈的模型:

$$c(S) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i x_i(S).$$

(10)

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_i^k = 1, \omega_i^k \geq 0;$$

$$L_i \leq \frac{\omega_i}{\omega_1} \leq U_i, \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

为方便,使用如下方法求解联盟特征函数:

$$c(S) = \min \left\{ x_1(S), \frac{x_1(S) + x_2(S)}{2}, \frac{x_1(S) + x_3(S)}{2}, \frac{x_1(S) + x_2(S) + x_3(S)}{3} \right\}.$$

(11)

3 算例分析

算例数据取自参考文献[9]. 假设各用户用电情况如表 1. 将表 1 的数据进行归一化处理.

3.1 无 AR 约束下合作博弈核仁解

根据归一化处理数据分别求出在不同联盟状态下的特征函数,如表 2 所示. 利用核仁解的数学模型式(8)求出最后的各用户的核仁解.

表 1 各用户基本情况

Tab.1 Basic information of the major users

用户	负荷季节	工作制度	电能质量等级	用电量/(亿 kWh)	峰谷电价时段划分	峰、平、谷电价比
A	全年	24 小时制	4	43.8	峰时:10:00—12:30	
B	夏季	24 小时制	5	42.67	18:00—22:00	夏季:
C	全年	8:00—12:00 2:30—6:30	3	8.76	平时:0:00—10:00 12:00—18:00 22:00—24:00	2:1:0.5 冬季:
D	全年	0:00—8:00	1	8.49	谷时:0:00—8:00	1.5:1:0.5

表 2 无 AR 约束下各联盟特征函数

Tab.2 The characteristic function of the union under the non AR constraint

用户联盟	用电量指标	电能质量指标	分时电价指标	特征函数	用户联盟	用电量指标	电能质量指标	分时电价指标	特征函数
{A}	0.422 3	0.181 8	0.519 2	0.181 8	{B,D}	0.493 3	0.545 4	0.336 8	0.336 8
{B}	0.411 4	0.090 9	0.276 2	0.090 9	{C,D}	0.166 4	0.727 2	0.204 6	0.166 4
{C}	0.084 5	0.272 7	0.144 0	0.084 5	{A,B,C}	0.918 2	0.545 4	0.939 4	0.545 4
{D}	0.081 9	0.454 5	0.060 6	0.060 6	{A,B,D}	0.915 6	0.727 2	0.856 0	0.727 2
{A,B}	0.833 7	0.272 7	0.795 4	0.272 7	{A,C,D}	0.588 7	0.909 0	0.723 8	0.588 7
{A,C}	0.506 8	0.454 5	0.663 2	0.454 5	{B,C,D}	0.577 8	0.818 1	0.480 8	0.480 8
{A,D}	0.504 2	0.636 3	0.579 8	0.504 2	{A,B,C,D}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
{B,C}	0.495 9	0.363 6	0.420 2	0.363 6					

3.2 AR 约束下合作博弈核仁解

在以上计算中,若将限定条件改为 $\omega_1 \geq \omega_2$, $\omega_1 \geq \omega_3$,则用电量指标相比其他两个指标所占权重更大. 在 AR 约束下的合作博弈特征函数如表 3 所示.

在 AR 约束下的 DEA 合作博弈由式(8)求出各用户的核仁解. 无权重约束及 AR 约束下计算结果见表 4.

3.3 计算结果对比

将邮票法、不考虑权重约束的合作博弈核仁

法、AR 约束下的合作博弈核仁法的计算结果相对比如图 1 所示. 由图 1 可以看出,用户 A 和 B 虽然用电量大,但是其对电能质量要求较小,在同时考虑分时电价情况下,利用 DEA 合作博弈核仁解的方法分摊的比例与采用邮票法相比有所下降;而用户 C 和 D 虽然用电量较小,但对电能质量要求高,所以其分摊的成本与邮票法相比有所上升. 可知采用多属性综合评价方法的 DEA 合作博弈核仁法使得分摊的结果更加公平合理.

表 3 AR 约束下各联盟特征函数

Tab.3 The characteristic function of the union under the AR constraint

用户联盟	$x_1(S)$	$[x_1(S) + x_2(S)]/2$	$[x_1(S) + x_3(S)]/2$	$[x_1(S) + x_2(S) + x_3(S)]/3$	特征函数
{A}	0.422 3	0.302 1	0.470 8	0.374 4	0.302 1
{B}	0.411 4	0.251 2	0.343 8	0.259 5	0.251 2
{C}	0.084 5	0.178 6	0.114 2	0.167 1	0.084 5
{D}	0.081 9	0.268 2	0.071 2	0.199 0	0.071 2
{A,B}	0.833 7	0.533 2	0.814 6	0.633 9	0.553 2
{A,C}	0.506 8	0.480 6	0.585 0	0.541 5	0.480 6
{A,D}	0.504 1	0.570 3	0.542 0	0.573 4	0.504 1
{B,C}	0.495 9	0.429 7	0.458 0	0.426 6	0.426 6
{B,D}	0.493 3	0.519 4	0.415 0	0.458 5	0.415 0
{C,D}	0.166 3	0.446 8	0.185 4	0.366 1	0.166 3
{A,B,C}	0.918 2	0.731 8	0.928 8	0.801 0	0.731 8
{A,B,D}	0.915 6	0.821 4	0.885 8	0.832 9	0.821 4
{A,C,D}	0.588 6	0.748 8	0.656 2	0.740 5	0.588 6
{B,C,D}	0.577 8	0.697 6	0.529 2	0.625 6	0.529 2
{A,B,C,D}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

表 4 联盟博弈的核仁解

Tab.4 Nucleous solution of the cooperative game

项目	用户A	用户B	用户C	用户D
不考虑权重约束	0.364 0	0.250 8	0.178 9	0.206 3
约束用电量权重	0.394 2	0.329 5	0.131 8	0.144 5

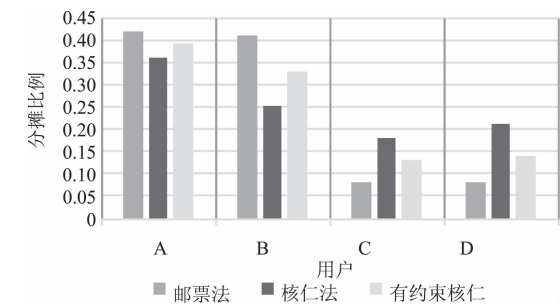


图 1 3 种方法下各用户分摊比例对比

Fig.1 Comparison of three different methods of user allocation

在采用了 AR 约束后,因为设定的用电量所占的权重较大,从图中可看出,由于用户 A 和 B 用电量大,其分摊比例比采用无约束 DEA 合作博弈核仁解的计算结果有所上升;而用户 C 和 D 因为用电量较小,所以其比例稍微下降.

以上计算仅考虑用电量所占比重较大,若分别设定电能质量与分时电价权重较大时,将分别约束用电量、电能质量、分时电价权重后的分摊结果相对比如图 2 所示.

由图 2 可知,分别对用电量、电能质量和分时电价的权重进行约束,各用户分摊的结果相差较大.令电能质量权重较大时,用户 A 和 B 的分摊

比例下降明显,用户 C 和 D 分摊比例显著提高,这是因为虽然用户 A 和 B 的用电量高,但是用户 C 和 D 对电能质量要求很高,所以在电能质量权重较大后,其分摊比例得到了明显的提高.特别是用户 D,其用电量相对 A 来讲很小,但是对电能质量的要求比 A 高的多,用户 D 最后的分摊比例甚至超过了 A.

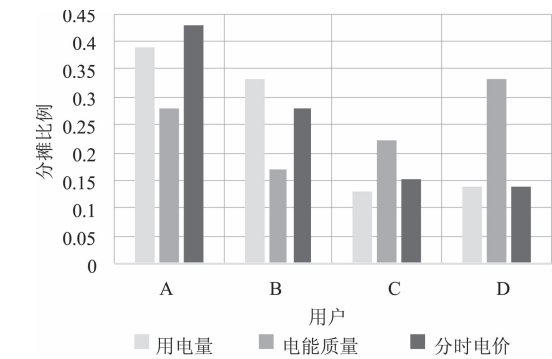


图 2 三种约束下各用户分摊比例对比

Fig.2 Comparison of the proportion of each user's contribution under the three constraints

在令分时电价权重较大后,从图 2 中可看出,跟用电量权重较大时的分摊结果相似.但是两个结果相比之下,用户 A 的分摊比例有所上升,这是因为其分时电价指标相对非常高,而且其用电量也很大.用户 B 的分摊比例有所下降,这是由于用户 B 的分时电价不高所致.用户 C 和 D 分摊结果变化不大,这是由于两者用电量相近,虽然用户 C 的分时电价指标较高,但是用户 C 对电能质量要求相对低,所以两者分摊结果接近.

从对比结果可以看出,在引入多指标来进行固定成本分摊后,分摊结果更加公平合理.而在加入权重约束后会使得分摊结果产生很大变化,权重约束合理才能使分摊结果合理.采用权重约束,不但更符合各方利益,促进电网更好的回收成本,提高用户的用电效率,而且能给电力市场参与者提供良好的经济信号,促进电力市场更好的发展.

4 结论

笔者使用基于 AR-DEA 合作博弈的方法,解决输电成本分摊问题,通过合作博弈核仁解来获得各用户分摊比例.考虑了用电量、分时电价和电能质量等多因素的影响,考虑因素相对全面,使分摊结果更加合理.引入保证区域限制,对不同指标权重进行约束,说明指标权重对分摊结果的重要影响,使得分摊结果更加透明,为电力市场各方参与者提供一定经济信号.但是,这里只考虑了用电量、电能质量和分时电价 3 个指标,如何考虑更多因素的影响,建立一个更全面更完善的指标体系,有待进一步的研究.

参考文献:

- [1] 荆朝霞,廖名洋,聂更生,等. 输电固定成本分摊中最大化综合效益的源流分析方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(23):71-77.
- [2] ROUSTAEI M, SHEIKH-EL-ESLAMI M K, SEIFI H. Transmission cost allocation based on the users' benefits[J]. Electrical power and energy systems, 2014(61):547-552.
- [3] KRISTIANSEN T. Comparison of transmission pricing models [J]. International journal of electrical power&energy systems, 2011, 33(4): 947-953.
- [4] LIMA J W M, DE OLIVERIRA E J. The long-term impact of transmission pricing [J]. IEEE transactions on power systems,1998, 13(4): 1514-1520.
- [5] 童强,高效. 输电固定成本分配的合作博弈[J]. 电力系统保护与控制,2008(13):48-51.
- [6] 高效,彭建春,罗安. 多种交易模式下核仁解分摊电网固定成本[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):120-124.
- [7] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring efficiency of decision making units[J]. European journal of operational research, 1978(2):429-444.
- [8] COOK W D, KRESS M. Characterizing an equitable allocation of shared costs:A DEA approach [J]. European journal of operational research, 1999(119): 652-661.
- [9] 周明,郑雅楠,李庚银,等. 考虑分时电价和电能质量的大用户转运费固定成本的综合分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(19): 125-130.
- [10] 魏权龄,岳明. DEA 概论与 C²R 模型——数据包络分析(一)[J]. 系统工程理论与实践,1989,9(1): 58-69.
- [11] KEN N. Egoist's dilemma: a DEA game[J]. Omega, 2006, 34(2): 135-148.

AR-DEA and Cooperative Game Nucleolus Solutions for Transmission Fixed Cost Allocation

WANG Jinfeng¹, MENG Xuwei¹, WANG Zheng², YANG Lixi¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan electric power company information and communication company, Zhengzhou, 450000, China)

Abstract: In view of the problem that the current transmission fixed cost allocation method could not ensure the complete recovery of the cost and provide economic signals, a transmission fixed cost allocation method based on AR-DEA and cooperative game was proposed. Firstly, the index system of cost allocation was constructed in consideration of power consumption, TOU power price, power quality and other factors. Then based on the data envelopment analysis, a cooperative game model was established and the assurance region was introduced to the weight constraint, so a transmission fixed cost allocation model considering multi index weight constraints was obtained. Finally, A numerical example illustrated the feasibility of this method.

Key words: DEA; cooperative game; nucleolus solutions; transmission cost allocation on a fixed route