

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230557

# 计及火电调度的水电外送联盟利益均衡优化研究

喻小宝, 邓思维, 董真余

(上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090)

**摘要:** 当前, 计及“双碳”目标影响的多能源联合外送联盟的利益分配问题亟待解决。在传统 Shapley 值法的基础上, 考虑贡献公平性, 引入资源投入、风险分摊、碳政策影响、贡献度四类指标, 构建了基于云重心法改进的 MCGC-Shapley 模型, 以四川省为例, 通过量化各主体的综合贡献度进行利益分配。算例分析表明, 与传统 Shapley 值分配策略相比, 基于云重心法改进的 MCGC-Shapley 模型更好地实现了主体所得利益与综合贡献度的匹配, 对提高社会投资积极性、推动外送中各类发电企业和电网企业的多方共赢起到了正面作用。

**关键词:** 水火打捆; 水电外送; Shapley 值法; 云重心法; 利益分配

**中图分类号:** TM73; F426; TV697. 1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)10-0077-05

## 1 引言

西电东送战略实施以来, 外送的电力不仅满足了受端省份不断增长的用电需求, 而且为各参与企业带来良好的经济效益。其中, 计及火电调度的外送模式, 在保障外送稳定的同时也使电网、水电、火电三方组成的联合外送联盟获得了可观的利益。在此背景下, 公平合理地分配联合外送联盟中的利益, 成为亟需解决的问题。对于联盟利益分配问题的研究, Shapley 值法作为一种主流的利益分配方法应用广泛, 并对其做了进一步拓展, 如 XU PENG 等<sup>[1]</sup>在影响因素分析方面基于合作博弈理论, 量化了成本、电价和收益对现货市场中零售商行为的作用; MILAD MOAFI 等<sup>[2]</sup>在外送电网结构的研究中, 提出了一种基于合作博弈论的智能电网三级结构; WANG Y 等<sup>[3]</sup>分析了综合能源系统不同运行模式的能源结构, 并构建了综合能源协同博弈模型; 段佳南等<sup>[4]</sup>在构造电量增益函数的基础上, 应用合作博弈论分别建立了 Shapley 值法、Aumann-Shapley 值法的增益分配模型, 并通过算例验证了模型的有效性。已有研究对外送联盟的利益分配问题做出了重要贡献, 但有关“双碳”目标对外送联盟利益分配影响的研究尚未展开, 仍需进行补充。因此, 引入外送利益分配影响因子, 计及“双碳”目标的影响, 以

云重心法为基础, 改进了 Shapley 值法模型, 并通过算例验证了模型的有效性, 以期对现有利益分配模式进行优化, 促进外送联盟利益的合理分配。

## 2 主体利益分析模型

### 2.1 前提假设

(1) 计及火电调度的水电外送模式是指外送期间为保障水电稳定外送让火电企业在用电高峰阶段也参与发电的外送模式, 假设四川电网送出水电的外送电价维持在一定范围内不变。

(2) 在计算火电企业、水电企业的经济效益时, 仅计算水电企业、火电企业的直接经济效益, 不再考虑外送工程衍生的间接经济效益。

(3) 水电企业年总发电量恒定, 水力发电保持阶段稳定性。

### 2.2 外送模式下主体收益计算模型

(1) 水电企业。由于水电厂设备投资须在一定时间内全部收回, 投资年限取决于水电设备的经济寿命, 故假设投资回收系数为  $C_R$ , 计算公式为:

$$C_R = \frac{A}{Q} = \frac{r(1+r)}{(1+r)^n - 1} \quad (1)$$

式中,  $A$  为年金;  $Q$  为水电设备投资;  $r$  为折现率。

设调整系数为  $K$ , 表示水电企业每年投资比例的变化, 即:

$$K = I_1(1+r)^{n-1} + I_2(1+r)^{n-2} + \dots + I_n \quad (2)$$

收稿日期: 2023-04-10, 修回日期: 2023-05-26

基金项目: 上海市哲学社会科学规划课题(2020BGL032)

作者简介: 喻小宝(1989-), 男, 博士、讲师、硕导, 研究方向为电力市场、综合能源等, E-mail: yuxiaobao1222@163.com

式中,  $n$  为建设年限;  $I_1, I_2, \dots, I_n$  分别为电厂在建设期的逐年投资流。

综上所述,水电企业发电成本  $C_{sd}$  计算公式为:

$$C_{sd} = IC_R K + C_m \quad (3)$$

式中,  $C_m$  为每年的运行维护费。

将水电发电量分为外送输送电量  $Q_{S1}$  和省内优先购买电量  $Q_{S2}$ , 计算水电企业效益  $Q_S$  为:

$$Q_S = Q_{S1} P_{S1} + Q_{S2} P_{S2} - C_{sd} \quad (4)$$

式中,  $P_{S1}$  为水电外送电价;  $P_{S2}$  为水电省内优先购买电价。

(2) 火电企业。计及时间价值, 利用资本回收公式, 将初始投资额折算到每一年, 并同该年份的运行费用求和。火电企业成本  $C_{hd}$  计算公式为:

$$C_{hd} = C_i \frac{\mu(1+\mu)^t}{(1+\mu)^t - 1} + C_k + C_{\text{燃料}} \quad (5)$$

式中,  $C_i$  为初始投资费用;  $C_k$  为年运行维护费;  $t$  为系统设施寿命;  $\mu$  为行业基准折现率;  $C_{\text{燃料}}$  为火电企业发电时消耗燃料的成本。

由于火电企业在外送模式中输送的电量不仅要保障外送联盟的电量稳定输送, 还要同时满足省内的需求, 故火电企业的发电量  $Q_h$  可分为向省内输送的发电量、向省外输送的发电量、未能向省外消纳的增发火电量三部分。

$$Q_h = \sum_{i=1}^3 Q_{hi} P_{hi} - C_{hd} \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中,  $Q_{hi}$  分别为优先向省内输送的火电量、向省外输送的火电量、未能向省外消纳的火电量;  $P_{hi}$  为对应  $Q_{hi}$  情况下每度电的价格。

(3) 电网企业。在计算电网的经济效益  $Q_w$  时, 要考虑输送电过程中的损失。

$$Q_w = (P_l - P_w) E (1 - \alpha) \quad (7)$$

式中,  $P_l$ 、 $P_w$  分别为受端省份落地电价和送端省份上网电价;  $E$  为售电量;  $\alpha$  为传输过程中的线损率。

### 3 模型构建

以 Shapley 值法为基础, 得到基础分配系数, 同时兼顾影响效益均衡的资源投入、风险分摊、贡献程度、政策影响等因素, 并对其进行量化, 利用云重心法对利益分配系数进行修正, 从而构建基于云重心法的改进 MCGC-Shapley 模型。模型测算的流程见图 1。

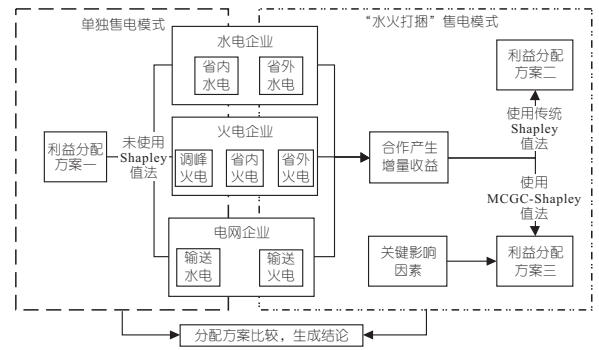


图 1 模型流程图

Fig. 1 Model flow chart

#### 3.1 利益分配影响因子测算

为了计及“双碳”目标对外送联盟利益分配的影响, 在利益分配的过程中, 不仅需要考虑其直接带来的经济效益, 还要考虑其附带的环境效益。因此, 本文归纳了可能会对利益分配产生影响的因素<sup>[5-6]</sup>, 见表 1。

#### 3.2 基于 MCGC-Shapley 的外送利益分配模型

步骤 1 测算指标云。针对指标中的定性指

表 1 影响因素指标表

Tab. 1 Table of influencing factors and indicators

一级指标	二级指标	相关公式	说明
资源投入	投资金额 设备费用 人力费用	$A_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}}; \alpha_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} P_j$	$C_{ij}$ 为不同参与方 $i$ 投入在第 $j$ 种资源的成本价值; $A_{ij}$ 为参与方 $i$ 在第 $j$ 项资源上的投入比例; $\alpha_i$ 为参与方 $i$ 的参与比例; $P_j$ 为第 $j$ 项资源在所有资源种类中的重要程度。
风险分摊	市场风险 技术风险 建设风险 自然风险	$R_i = \sum_{j=1}^m f_{ij} w_j; \beta_i = R_i / \sum_{i=1}^n R_i$	$R_i$ 为参与方 $i$ 的风险值; $m$ 为总的风险种类; $f_{ij}$ 为参与方 $i$ 面对第 $j$ 种风险的代价; $w_j$ 不同风险因子的权重值; $\beta_i$ 为参与方 $i$ 的风险承担比例。
贡献程度	效益优化	$L_i = S_i' - S_i; \gamma_i = L_i / \sum_{i=1}^n L_i$	$L_i$ 为参与方 $i$ 的利润变化量, $S_i'$ 、 $S_i$ 分别为各主体单独售电与参与外送联盟后分别获得的利益; $\gamma_i$ 为参与方 $i$ 的贡献比例。
政策影响	碳排放量	$E_S = I_x f_x (1 + \alpha_x)$ $E_H = \gamma Q_h \pi$ $E_D = E_{SF_6} + E_x$	$E_S$ 为水电企业碳排放, $I_x$ 为建设过程中所需材料; $f_x$ 为建设材料的碳排放强度; $\alpha_x$ 为材料的单位损耗系数; $E_H$ 为火电企业碳排放, $\gamma$ 为火电企业燃料的排放系数; $Q_h$ 为火电企业发电量; $\pi$ 为单位电量消耗燃料的转化系数; $E_D$ 为电网企业碳排放; $E_{SF_6}$ 为根据电网企业生产活动过程中产生温室气体排放量(吨二氧化碳当量); $E_x$ 为电网企业损失的输配电核算出的温室气体排放量 <sup>[7]</sup> 。

标,可以用“无、微弱、较小、一般、较大、巨大”来表示,然后量化为 $[0,1]$ 之间的值。而定量指标由公式计算得到的结果与规划时预计的理想数据的比值,同样量化为 $[0,1]$ 间的值<sup>[8]</sup>。各云模型的期望值 $E_x$ 、熵 $E_n$ 的计算公式分别为:

$$E_x = (E_{x_1} + E_{x_2} + \dots + E_{x_n})/n \quad (8)$$

$$E_n = [\max(E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n}) - \min(E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n})]/6 \quad (9)$$

式中, $E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n}$ 为专家的 $n$ 个精确数值。

**步骤 2** 构建系统状态。所述四个指标(云模型)可以用一个四维综合云来表示。当四个指标所反映的系统状态发生变化时,四维综合云的形状和重心 $T$ 也会随之变化。设 $T = (T_1, T_2, T_3, T_4)$ ,计算公式为:

$$T_i = a_i b_i \quad (10)$$

式中, $a_i$ 为第 $i$ 个指标期望值; $b_i$ 为第 $i$ 个指标归一化后的权重。

假设模型各指标的理想值为 1,理想云重心 $G^0 = (G_1^0, G_2^0, G_3^0, G_4^0)$ 。

**步骤 3** 测算指标权重。利用熵权法确定各指标权重。根据 $n$ 个专家评分矩阵设定原始矩阵 $R$ :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{14} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{n4} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, $r_{ij}$ 为专家 $i$ 对第 $j$ 个指标的打分。

将原始数据进行标准化处理,即:

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{r_{ij} - \min r_i}{\max r_{ij} - \min r_{ij}} & r_{ij} > 0 \\ \frac{\max r_i - r_{ij}}{\max r_{ij} - \min r_{ij}} & r_{ij} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $Y_{ij}$ 为 $r_{ij}$ 标准化处理后的结果。

将各专家的评价结果进行归一化处理,即:

$$p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (13)$$

式中, $p_{ij}$ 为 $Y_{ij}$ 归一化处理后的结果。

计算指标 $i$ 的熵值 $e_i$ ,即:

$$e_i = \frac{-1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (14)$$

最后计算指标 $i$ 的熵权 $\omega_i$ ,即:

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{4} - \sum_{i=1}^4 e_i \quad (15)$$

**步骤 4** 测算偏离指数。确定四维云加权偏离度 $\alpha$  $(-1 < \alpha < 0)$ , $\alpha$ 值越大,表示偏离理想状态的程度越大。理想状态可解释为水火打捆外送联盟各方投入资源尽可能多、风险最大、贡献度

最大、碳减排贡献度最大的状态,此状态下的云重心 $T^0$ 为:

$$T^0 = a' b = (T_1^0, T_2^0, T_3^0, T_4^0) \quad (16)$$

式中, $a'$ 为理想状态下各指标期望值。

随后对向量进行归一化处理,得到向量 $T^G = (T_1^G, T_2^G, T_3^G, T_4^G)$ :

$$s. t. \begin{cases} T_i^G = (T_i - T_i^0)/T_i^0 \\ T_i < T_i^0; i = 1, 2, 3, 4 \\ T_i^G = (T_i - T_i^0)/T_i \\ T_i \geq T_i^0; i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 \omega_i T_i^G \quad (18)$$

**步骤 5** 测算修正分配系数。对各主体加权偏离度 $\alpha$ 进行归一化,得到各主体权重 $\alpha^*$ ,进而计算得到主体利益修正值 $\Delta\varphi_z(v)$ ,与各主体初始利益 $\varphi_z(v)$ 相加得到各主体实际利益 $\varphi_z(v)^*$ ,计算公式为:

$$\Delta\varphi_z(v) = (\alpha^* - 1/n)v_{(S)} \quad (19)$$

$$\varphi_z(v)^* = \varphi_z(v) + \Delta\varphi_z(v) \quad (20)$$

式中, $v_{(S)}$ 为各主体单独售电时所获得的利益。

### 3.3 各主体利益满意度测算模型

效益是影响主体满意度的重要因素之一,不同的效益分配结果下,所带来的满意度不同,故构建主体满意度测算模型:

$$M_i = [1 + (r_{i,o} - r_{i,n})/r_{i,o}] \omega_i \quad (21)$$

式中, $r_{i,o}$ 为主体 $i$ 原效益分配结果; $r_{i,n}$ 为主体 $i$ 现效益分配结果; $\omega_i$ 为主体 $i$ 在联盟中的贡献度。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

假设送端区域中参与能源外送的水电设备总装机容量为 8 900 MW,火电设备总装机容量为 2 300 MW。日调节水电的最大输出功率为 400 MW,最小出力为 100 MW。各时段水电厂的发电效率为 89%。

在四川外送工程中,发电方为四川省的火电、水电企业,四川电网承担输送作用,购电方为山东、上海等外送工程输送对象省份。送端区域水电上网电价为 0.378 元/(MW·h),火电发电上网电价为 0.484 元/(MW·h),燃煤价格为 700 元/t。假设四川电网在输送过程中线损率为 5%,购电方中各省份的落地电价使用各省份落地电价的加权值进行计算,受端省份的落地电价与燃煤标杆价见表 2。

表 2 受端省份的落地电价与燃煤标杆价

Tab. 2 Landing price and coal benchmark price

of each province			元/kW·h		
受端省份	落地电价	燃煤标杆价	受端省份	落地电价	燃煤标杆价
江苏	374.72	391.00	湖北	276.72	416.10
上海	369.72	415.50	湖南	276.62	450.00
浙江	355.65	415.30	江西	276.62	414.30
河南	276.72	377.90			

4.2 初始利益分配

根据表 1 中数据及各主体效益计算公式可得,当发电企业单独外送时,水电企业收益为 68.52 亿元,火电企业收益为 23.751 亿元,电网收益为 27.71 亿元。故各主体利用传统 Shapley 值法计算收益分配额分别为 72.230、26.525、28.58 亿元。

经归一化处理,水电企业、火电企业和电网企业的收益分配系数为(0.54,0.19,0.27)。

4.3 修正主体利益分配

先根据专家对一级、二级指标的打分(表 3、4),利用熵权法计算得到一级和二级指标的权重(表 5、图 2)。随后构建四维综合云的系统状态,计算得到四维综合云的重心  $T$ 。水电企业、火电企业、电网企业的云重心分别为  $T_1 = (1.17, 0.4788, 0.4288)$ 、 $T_2 = (0.624, 0.855, 0.480)$ 、 $T_3 = (0.702, 0.855, 0.8576)$ 。

表 3 一级指标专家打分

Tab. 3 First level indicator scoring

专家	资源	风险	政策	专家	资源	风险	政策
	投入	分摊	影响		投入	分摊	影响
1	6	8	4	4	6	3	4
2	5	7	3	5	5	4	5
3	8	5	4				

表 4 二级指标专家打分

Tab. 4 Second level indicator scoring

专家	投资金额	设备费用	人力费用	市场风险	技术风险	建设风险	自然风险	碳排放量
1	1	2	5	8	4	3	2	4
2	3	2	5	6	4	7	4	4
3	4	5	2	8	8	3	3	2
4	1	4	4	6	4	7	4	3
5	3	2	2	5	5	5	5	4

表 5 一级指标权重

Tab. 5 Grade I index weight

主体	资源投入	风险分摊	政策影响
水电企业	0.33	0.44	0.23
火电企业	0.36	0.28	0.36
电网企业	0.47	0.29	0.24

根据式(16)~(18)计算得到三方主体的偏移度  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  分别为 0.34、0.3、0.47。将偏移度  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  归一化后得到各主体权重  $\alpha^* = (0.423, 0.306, 0.271)$ 。根据式(19)、(20)计算得到各主体修正后所得的利益分别为 68.044、29.528、



图 2 二级指标权重

Fig. 2 Secondary index weight

29.763 亿元。修正后各主体利益分配系数为 0.483,0.244,0.273。

对比分析各主体单独外送收益,传统 Shapley 值法及修正后的 Shapley 值法收益分配结果,见图 3。

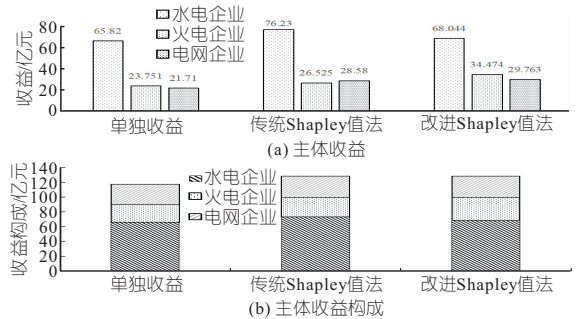


图 3 不同方法下主体收益及其构成图

Fig. 3 Income and composition chart of subject income under different methods

与修正前相比,修正后水电企业的利益降低了 5.22%,火电企业的利益增加了 2.3%,电网企业的利益增加了 1.78%。水电企业作为外送工程最主要的输送方,其收益占全部收益的 48.3%,是外送联盟中利益分配最高的一方;对火电企业来说,由于“水火打捆”外送模式,其发电小时数明显增加,故火电企业的收益也随之增加。同时,因为总外送电量增加,电网所获利益也会增加。

计算传统 Shapley 值法和改进 Shapley 值法的主体的满意度,见表 6。由表 6 可看出,传统 Shapley 值分配方案与改进的 Shapley 值分配方案各主体所得利润均高于各发电企业独立运行时所得利润。而对比各主体对于两种分配方案的满意度,可以看出外送联盟中各主体更青睐改进的 Shapley 值分配方案。

表 6 主体满意度对比

Tab. 6 Comparison of subject satisfaction

主体	单独收	传统 Shapley	改进 Shapley	传统 Shapley	改进 Shapley
	益/亿元	值法/亿元	值法/亿元	值法满意度	值法满意度
水电企业	65.820	72.230	68.044	0.365 430	0.437 293
火电企业	23.751	26.525	29.528	0.371 893	0.380 429

5 结论

a. 改进的 Shapley 值法使各方主体所得利益

