

负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究

周全¹, 冯冬涵¹, 徐长宝², 冯成², 孙骏¹, 丁藤¹

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州省贵阳市 550002)

摘要: 为了电力系统碳排放责任分摊机制的有效性和透明性, 可以考虑从基于电力消费的角度出发在负荷侧直接进行碳排放责任分摊。由于负荷成员在碳排放责任分摊问题上的相互联系, 该分摊问题可从合作博弈的角度出发, 应用经典的解的概念如 Shapley 值和广义核仁进行求解。结合该问题的实际特点, 分别阐述了基于 Shapley 值、广义核仁、节点碳迹强度和节点边际碳强度的四种分摊方法的基本原理和计算方法, 并总结了相关公理作为衡量标准来对比分析这四种方法。其中, 基于 Shapley 值的分摊方法更能综合评估负荷的位置、负荷成员间的相互影响等相关因素的作用, 从而准确地反映出各个负荷成员对于全系统碳排放的实际贡献。最后采用一个 PJM-5 节点系统算例验证该分摊方法的公平性、合理性和可行性。

关键词: 低碳电力; 碳排放责任分摊; 负荷侧; 合作博弈; Shapley 值

0 引言

电力行业作为化石燃料消耗的主要行业之一, 占全球能源相关碳排放总量的 40% 左右^[1]。在低碳发展的大背景下, 电力行业也需要寻找适合自身行业特点的低碳化道路^[2-4]。直观而言, 电力系统中只有发电环节存在直接的碳排放, 所以, 目前电力系统中低碳相关的研究也就比较偏重于在发电侧进行分析^[5-6]。因此, 相应的碳排放责任量(即统计时间内全系统的碳排放总量, 下同)也一般只考虑在发电机组或发电商之间进行分摊。然而, 被施加到发电侧的碳排放责任量会通过各种市场或政策机制转移到负荷侧, 最终也就是在负荷侧进行了间接的碳排放责任量的分摊。该间接过程往往较为复杂也缺乏透明性, 且容易涉及市场动态、复杂的管理流程以及各类竞争性博弈行为。故文献[7]就指出碳交易机制(carbon emission trade)本质上是市场导向的, 它的全局效果直接取决于参与成员的市场行为。此外, 虽然负荷侧并没有直接产生碳排放, 但电力生产是为了满足负荷的电力需求, 因而负荷侧间接造成了电力系统的碳排放。因此, 直接在负荷侧尽可能公平地进行碳排放责任分摊是必要且合理可行的。

从基于电力消费以及合作博弈的角度考虑, 发电机组和传输线路均可视为可供选择的公用资源, 而对应的全系统碳排放量则是负荷成员需共同承担的成本。那么, 该问题则转化为经典的成本分摊问题。由于合作博弈理论中经典解的概念(solution concepts)综合考虑了公平性、有效性和稳定性, 被广泛运用于电力系统的成本分摊问题中, 如输电费用分摊^[8]、网损分摊^[9]等。其中, Shapley 值和广义核仁(prenucleolus)的解存在且唯一, 又由于两者较好的解的性质, 可以视为两种可行的方法来处理负荷侧碳排放责任分摊问题。

现有的两类节点碳强度评估方法也可以应用于负荷侧碳排放责任的直接分摊问题: 节点碳迹强度(footprint carbon intensity, FCI)和节点边际碳强度(marginal carbon intensity, MCI)。前者是基于碳排放流理论, 采用潮流和碳流追踪方法, 分析节点上流经潮流的能源组成并考虑网损对应的碳排放的影响, 从而得到系统网络的 FCI 分布情况, 进而确定各负荷成员所在节点的碳排放强度^[10-13]; 后者则是基于节点电价体系, 通过灵敏度分析来确定节点上负荷变化对于系统总碳排放的边际影响, 从而得到各节点的 MCI 分布情况^[14]。这两类方法分别从总量追踪和边际分析两个角度考察了负荷与系统碳排放的关联关系, 并强调了负荷节点在网架结构中的位置因素对于系统碳排放的影响。

针对负荷侧碳排放责任分摊问题, 在经典分摊

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-07-29。

国家科技支撑计划资助项目(2013BAA01B04); 国家自然科学基金资助项目(51477097); 贵州电网有限责任公司支持项目(K-GZ2013-442)。

公理的基础上,总结了相关的公理。并结合实际问题的特点,分析了相关公理作为评判标准的适用性和优先级。据此,对比分析了这4种负荷侧碳排放责任分摊方法:Shapley 值、广义核仁、FCI 以及 MCI。

1 合作博弈的角度

基于电力消费的观点,可以将所有的发电机组和输电网络视为公用资源,而负荷成员则在保证电力系统运行安全的前提下选择使用这些公共资源。此时系统中所有负荷用 N 表示,用 $c(N)$ 表示当所有负荷同时存在时所对应的系统碳排放量。用 S 表示 N 的一个非零真子集,那么 $c(S)$ 表示当系统中有且只有那些属于 S 的负荷时所对应的系统碳排放量。那么有 $c(\phi)=0$ 。然而,所有负荷单独存在时对应的系统碳排放量之和并不等于所有负荷同时存在对应的系统碳排放量,即有 $c(N) \neq \sum_{i \in N} c(i)$ 。而具体的大小关系取决于很多因素,如系统的能源结构、电力网络特征、系统运行模式等。因此,负荷之间所对应的系统碳排放是相互影响的,而这种相互影响就类似于成本分摊问题中的公共成本部分。因此,负荷侧碳排放责任分摊问题可视为一个典型的成本分摊问题,而合作博弈正是处理成本分摊的经典方法之一。

从合作博弈的角度出发,系统中的所有负荷可看作各个参与成员,所有负荷成员 N 在系统同时存在时可视为全联盟,而系统同时只存在一部分负荷成员时,则视为各个子联盟。各联盟实际造成的碳排放量 $c(\cdot)$ 则为该合作博弈问题的特征函数。因此,负荷侧碳排放责任分摊问题转化为了典型的合作博弈问题 (N, c) ,而求解则可采用满足唯一性的经典解的概念:Shapley 值和广义核仁^[15]。

1.1 基于 Shapley 值的分摊方法

Shapley 值满足存在性和唯一性,由 Lloyd S. Shapley 于 1953 年提出^[16]。不同于其他解的概念,Shapley 值并不偏重于分析参与成员之间的策略互动,而是强调各个成员对于不同联盟的边际作用。根据 Shapley 值的定义,每个负荷成员所分得的碳排放责任应为它所有的边际作用的平均值,可表示如下:

$$x_i = \sum_{S \subseteq N \setminus i} P(S)(c(S \cup \{i\}) - c(S)) \quad (1)$$

式中: x_i 为负荷成员 i 所分摊的碳排放责任量; S 为排序在负荷成员 i 之前的负荷成员组成的子联盟,可以为任意不包含负荷成员 i 的子联盟; $P(S)$ 为该子联盟 S 发生的概率; $S \cup \{i\}$ 为将负荷成员 i 并入

子联盟 S 中形成的新的联盟; $c(S \cup \{i\}) - c(S)$ 表示负荷成员 i 并入子联盟 S 的边际作用。

当所有负荷成员进行随机排序时,子联盟恰由那些排在负荷成员之前的负荷成员组成的概率为:

$$P(S) = \frac{n_S!(n_N - n_S - 1)!}{n_N!} \quad (2)$$

式中: n_N 为全联盟 N 中负荷成员的数量; $n_N!$ 为全部负荷成员 N 可能形成的所有排列情况; n_S 为子联盟 S 中负荷成员的数量。

因此,依据 Shapley 值进行负荷成员的碳排放责任分摊可依据式(1)和式(2)进行计算。由于各个负荷成员出现在排序各位置的可能性相等,故排序的影响被消除了,负荷成员之间的公平性得到了保证。

1.2 基于广义核仁的分摊方法

核仁(nucleolus)也同时满足存在性和唯一性,由 David Schmeidler 于 1969 年提出^[16],若不考虑个体理性的约束,相应概念则称为广义核仁。其中的核心概念就是剩余(excess),可以表示如下:

$$e(S, x) = x(S) - c(S) \quad x \in I^0(N, c) \quad (3)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示一个有效分摊解; $e(S, x)$ 为联盟 S 关于该有效分摊解 x 的剩余,也称不满意度; $x(S)$ 为根据有效分摊解 x ,联盟 S 中的成员所分摊的碳排放责任量之和,即 $\sum_{i \in S} X_i$; $I^0(N, c)$ 表示合作博弈问题 (N, c) 的所有有效分摊解 $(x(N) = c(N))$,其中, $x(N) = \sum_{i \in S} X_i$ 的集合。

相比于内核(kernel)的定义(让最大剩余尽可能小),广义核仁更进一步去最小化第二大、第三大的剩余,直至确定唯一分摊解^[16]。计算步骤如下:

1)最小化最大剩余

最小化所有联盟中最大不满意度可表述为:

$$\begin{cases} \min \epsilon \\ \text{s.t.} & e(S, x) \leq \epsilon \quad \forall S \subseteq N \\ & x(N) = c(N) \end{cases} \quad (4)$$

求解该线性规划问题,所得目标函数最优值用 θ_1 表示,相应解集为:

$$X_1 = \{x \in I^0(N, c) \mid e(S, x) \leq \theta_1, \forall S \subseteq N\} \quad (5)$$

这些解集对应的联盟为:

$$\Sigma_1 = \{S \subseteq N \mid e(S, x) = \theta_1, \forall x \in X_1\} \quad (6)$$

若所得解集 X_1 唯一,它就是该问题的广义核仁。若解集 X_1 不唯一,那么需要继续最小化第二大剩余。

2)最小化第二大剩余

此时问题可以表述如下:

$$\begin{cases} \min \epsilon \\ \text{s.t.} & e(S, x) = \theta_1 & \forall S \subseteq \Sigma_1 \\ & e(S, x) \geq \theta_1 & \forall S \not\subseteq \Sigma_1 \\ & x(N) = c(N) \end{cases} \quad (7)$$

求解所得的目标函数最优值和相应解集分别用 θ_2 和 X_2 表示。如果解集 X_2 唯一,那么广义核仁确定。若不唯一,则继续最小化第三大剩余,直至对应解集唯一,求得该问题的广义核仁。根据上述步骤,可求得基于广义核仁的负荷侧碳排放责任分摊方案。

2 节点碳强度分析的角度

节点碳强度的分摊方法则是通过总量追踪或边际分析来确定该负荷节点上单位负荷所对应的系统碳排放量,然后用所得的节点碳强度乘以负荷量即可得到该负荷的碳排放责任量。

2.1 基于 FCI 的分摊方法

碳排放流,也称碳流,是一种人为定义的虚拟网络流。相比于电力潮流,碳流更像是在电力网络传输的电能上添加了相应的“碳标签”,从而建立了系统各成员在碳排放问题上的关联关系^[10-12]。

文献[10]最早提出电力网络中碳排放流的概念。文献[11]通过结合网络分析技术,提出了碳排放流分析理论的初步架构。本文中的 FCI 也就等价于碳排放流理论体系中“节点碳势”的概念^[9]。文献[12]认为基于电力潮流追踪的碳流追踪,可以用于评估负荷侧碳排放强度。而文献[13]则进一步采用了考虑网损的复功率追踪来建立碳流追踪模型。由于电网长距离输送的基本为有功功率,无功功率一般就地平衡。并且,相比于有功出力而言,产生无功功率对应的碳排放也较小。所以目前普遍采用追踪有功潮流的形式来进行碳流分析。并且由于已知数据多为宏观统计获得的机组出力和碳排放系数,故一般采用潮流追踪方法中的逆流追踪来进行碳流的分析^[17]。

若考虑网络损耗所对应的额外碳排放,应当选取各支路的首端有功功率(即首端节点流入该支路的有功功率)来计算逆流分布矩阵,那么系统碳流关系为:

$$\mathbf{C}_{fn}^{\text{gross}} = (\mathbf{A}_u^{\text{gross}})^{-1} \mathbf{C}_{fg} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{C}_{fn}^{\text{gross}}$ 为节点流经总碳流矢量; \mathbf{C}_{fg} 为节点碳流注入矢量; $\mathbf{A}_u^{\text{gross}}$ 为考虑网损的逆流分布矩阵^[17]。其中,矩阵 $\mathbf{A}_u^{\text{gross}}$ 中的元素可以表示为:

$$(\mathbf{A}_u^{\text{gross}})_{mn} = \begin{cases} 1 & m = n \\ -\frac{|P_{mn}|}{P_n} & n \in \Gamma_-(m) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{mn} 为节点 n 流入支路 mn 的首端有功功率; P_n 为节点 n 的流经功率(等于注入或流出功率之和); $\Gamma_-(m)$ 为节点 m 的进线集。

系统的 FCI 矢量可表示为:

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{C}_{fn}^{\text{gross}}}{\mathbf{P}_n} \quad (10)$$

式中: \mathbf{P}_n 为节点流经功率矢量。

相应的,分摊给各负荷成员的碳排放责任量为:

$$x_i = P_{Di} \mathbf{F}_{f(i)} \quad (11)$$

式中: P_{Di} 为负荷成员 i 的有功消耗功率; $\mathbf{F}_{f(i)}$ 表示负荷成员 i 所在节点的 FCI。

2.2 基于 MCI 的分摊方法

文献[14]中最早提出基于节点电价体系的 MCI 概念,用以描述该节点上的用电行为对于全系统碳排放的影响。MCI 可定义为:

$$M_n = \frac{\partial C}{\partial P_{Dn}} \quad (12)$$

式中: M_n 为系统节点 n 上的 MCI; C 为全系统的碳排放总量; P_{Dn} 为该节点上的负荷量。

在低碳经济环境下,发电商将碳价格计入其机组报价之中。那么机组报价的矢量 λ_G 可表示为:

$$\lambda_G = \mathbf{c} + \lambda_c \boldsymbol{\sigma} \quad (13)$$

式中: \mathbf{c} 为机组报价中的非碳价部分; λ_c 为碳排放价格; $\boldsymbol{\sigma}$ 为各机组碳排放系数的列向量。

任意节点上负荷的微小变化都是由调节系统的边际机组来满足的。因此,节点 n 上的节点边际电价 λ_{pn} 为系统当前边际机组报价的线性组合,可表示为:

$$\lambda_{pn} = \boldsymbol{\alpha}_n^T \lambda_G = \boldsymbol{\alpha}_n^T (\mathbf{c} + \lambda_c \boldsymbol{\sigma}) \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}_n$ 为对应的线性组合系数列向量,各系数可正可负但满足 $\mathbf{e}^T \boldsymbol{\alpha}_n = 1$ 。那么,该节点的 MCI 为 $M_n = \boldsymbol{\alpha}_n^T \boldsymbol{\sigma}$ 。

若不计及线路网损,系统的节点边际电价也可表述为 $\lambda_p = \lambda \mathbf{e} + \mathbf{T}^T \boldsymbol{\mu}$ ^[18]。因此,系统的 MCI 可以有如下形式:

$$\mathbf{M} = \frac{\partial \lambda_p}{\partial \lambda_c} = \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda_c} + \mathbf{T}^T \frac{\partial \boldsymbol{\mu}}{\partial \lambda_c} \quad (15)$$

式中: λ_p 为系统节点电价矢量; λ_c 为碳价格; λ 为对应系统功率平衡约束的拉格朗日乘子; \mathbf{T} 为由起作用的线路约束所组成的功率传输矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为对应系统线路约束的拉格朗日乘子矢量。

相应的,分摊到各负荷成员的碳排放责任量为:

$$x_i = P_{Di} M_{i(i)} \tag{16}$$

式中： $M_{i(i)}$ 表示负荷成员 i 所在节点的 MCI。若考虑线路容量的约束，则可能存在的线路阻塞情况会使得系统中存在多台边际机组（不同机组有不同的碳排放系数）。各节点的边际碳强度，其实也就是这些边际机组的碳排放系数的线性组合（组合系数可正可负，且之和为 1），它的数值可能大于所有机组中最大的碳排放系数，甚至为负。例如低排放低报价的机组附近线路阻塞且周围还存在高排放机组时，则该范围内负荷节点的 MCI 则可能高于该高排放机组的碳排放系数。

3 公理化标准及比较

并不存在一种理想的方法可以满足所有的公理，如保持总量守恒、平等对待所有成员、能给予参与成员适当激励、在成员之间存在博弈行为时保持结果稳定等^[19]。然而，针对一个实际的分摊问题，由于其自身的特性以及成员的不同偏好，使得可以通过分析不同方法对于相关公理的满足情况来确定该问题的最佳分摊方法。换言之，需要结合问题的实际特点对于相关公理分析并进行一定的取舍^[8-9, 20-21]。本节结合负荷侧碳排放责任分摊问题的实际特点，具体阐述了相关的基本公理，并且分析了这些公理作为衡量标准的适用性和优先级。为保持一致性，本文沿用了经典文献分析一般分摊问题所采用的公理名称^[15-16]。

3.1 相关公理

1) 有效性 (efficiency)

依据该分摊方法，所有负荷成员所分得的碳排放责任量之和应当等于系统的碳排放总量，满足碳排放总量守恒，即 $x(N) = c(N)$ 。

2) 对称性 (symmetry)

若两个负荷成员对于任意子联盟的边际作用都相等 ($c(S \cup \{i\}) = c(S \cup \{j\})$)， $\forall S \in N$)，那么可将其视为该合作博弈问题中的对称成员。它们分得的碳排放责任量应该相等 ($x_i(N, c) = x_j(N, c)$)。

3) 匿名性 (anonymity)

当负荷成员的编号发生改变时，每个负荷成员所分得的碳排放责任量应保持不变，即：

$$x_{\pi(i)}(\pi(N), \pi(c)) = x_i(N, c) \tag{17}$$

式中： π 为新的编号规则； $(\pi(N), \pi(c))$ 为依据该编号规则所新形成的合作博弈问题。

4) 虚拟性 (null player)

任意添加虚拟负荷成员，应不影响原分摊结果。其中，虚拟负荷成员定义为：对所有联盟的边际作用

都为 0 的成员 ($c(S \cup \{i\}) - c(S) = 0, \forall S \subseteq N \setminus i$)。

5) 等同性 (balanced contributions)

任意两个负荷成员之间的相互影响应当是相同的。否则，将存在对于负荷间相互影响的不同衡量，从而导致矛盾的分摊结果。换言之，其中某一负荷成员退出系统对于另一负荷成员所分得的碳排放责任量的影响，与另一负荷成员退出对此负荷成员碳排放责任量所产生影响相同，即：

$$x_i(N, c) - x_i(N \setminus \{j\}, c^{N \setminus \{j\}}) = x_j(N, c) - x_j(N \setminus \{i\}, c^{N \setminus \{i\}}) \tag{18}$$

式中： $x_i(N \setminus \{j\}, c^{N \setminus \{j\}})$ 为在不存在负荷成员 j 的情况下，负荷成员 i 所分得的碳排放责任量。

6) 个体理性 (individual rationality)

个体理性要求：每个负荷成员的碳排放责任量，不应大于系统中只存在该负荷时所对应的碳排放量 ($x_i \leq c(\{i\})$)，否则该负荷成员倾向于脱离联盟。但是，从系统运行的时间尺度来看，负荷成员并不能轻易地脱离系统。并且，负荷侧碳排放责任分摊是一种事后责任分摊，而并非基于事前议价的过程。所以，个体理性并不适用于该问题的实际情况。因此，本文采用广义核仁，而不是核仁作为负荷侧碳排放责任分摊问题的一种方法进行对比分析。

7) 群体理性 (coalitional rationality)

群体理性要求每个子联盟中负荷成员所分得的碳排放责任量之和，不应大于系统只存在这些负荷时所对应的碳排放量 ($\sum_{i \in S} x_i \leq c(S), \forall S \subseteq N$)。类似于个体理性，该公理也并不适用于该问题。

8) 合理性 (reasonability)

任意负荷成员分得的碳排放责任量应在一定的合理范围之内：既不大于该负荷成员边际作用的最大值 ($\max(c(S \cup \{i\}) - c(S))$)，也不小于其边际作用的最小值 ($\min(c(S \cup \{i\}) - c(S))$)。

3.2 标准优先级分析

在负荷侧进行直接的碳排放责任分摊，是一种事后的成本分摊。其目的并不是为了优化某个目标，而是寻求一种对所有负荷成员都公平的分摊方案。前文列出的 8 项公理中，有效性、对称性、匿名性和虚拟性都是分摊机制必须满足的基本要求，可以视为必要条件，本文认为其优先级最高。其他标准都是为了满足某一方面的需求，如等同性和合理性是为了保证方法所得结果的一致性，而个体理性和群体理性则是为了保证形成联盟的稳定性。但是，本问题中成本并不满足次加性（即两者合作的成本可能大于各自分开的成本之和），而负荷成员短时

间内又无法轻易脱离联盟。故个体理性和群体理性难以作为有效的衡量标准,其优先级是最低的。

3.3 公理化标准下四种方法的对比

基于前文总结的相关公理,比较了 Shapley 值、广义核仁、FCI 和 MCI 这四种负荷侧碳排放责任分摊方法。相关结果如表 1 所示(关于表中内容详细说明和证明请见附录)。只有 Shapley 值和广义核仁的方法满足所有高优先级的公理性标准。这也体现出总量追踪方法缺乏考虑负荷的位置因素,而边际方法难以以总量守恒的弊端。其中,Shapley 值对应的分摊方法可以满足所有中等优先级的公理化标准,尤其是等同性使其在该问题中优于广义核仁的方法。这些中等和高等优先级的性质,使得 Shapley 的方法具有更好的公平性和一致性。

表 1 分摊方法及相关公理

Table 1 Allocation solutions and relevant axioms

公理性标准 (优先级)	Shapley 值	广义核仁	FCI	MCI
有效性(高)	✓	✓	✓	×
对称性(高)	✓	✓	×	×
匿名性(高)	✓	✓	✓	✓
虚拟性(高)	✓	✓	✓	✓
等同性(中)	✓	×	×	×
个体理性(低)	×	×	×	×
群体理性(低)	×	×	×	×
合理性(中)	✓	✓	✓	×

注:高表示分摊机制的必要条件,高优先级;中表示符合该问题的实际情况,中等优先级;低表示不符合该问题的实际情况,低优先级;✓表示方法满足该公理性标准,×则表示不满足。

4 算例

本节采用 PJM-5 节点系统为例,来分析比较这 4 种负荷侧碳排放责任分摊方法。具体网络结构如图 1 所示,整个 PJM-5 节点系统包括:一共有 5 台机组、6 条输电线路和 3 个负荷。其中,机组的基本信息如表 2 所示,其他具体数据(负荷信息、线路参数等)可参考文献[22]。

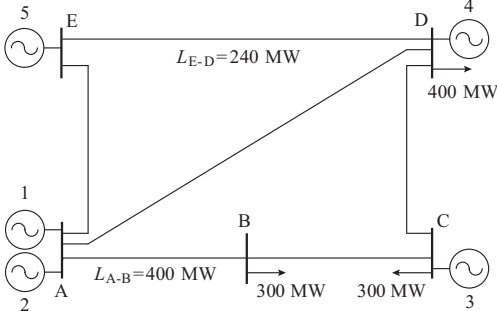


图 1 PJM-5 节点系统
Fig.1 PJM-5-bus system

表 2 PJM-5 节点系统机组基本信息
Table 2 Generation information of PJM-5-bus system

机组 编号	所在 节点	机组 类型	报价/(美元· (MW·h) ⁻¹)	排放率/(tCO ₂ · (MW·h) ⁻¹)	有功功率 上限/MW
1	A	水电	14	0	40
2	A	水电	15	0	170
3	C	燃气	30	0.3	520
4	D	燃气	40	0.3	200
5	E	燃煤	20	0.9	600

表 3 各联盟的系统碳排放量
及相应机组出力情况
Table 3 System-wide carbon emission of different
coalitions and the corresponding outputs of generators

联盟	系统碳排放量/ (tCO ₂ ·h ⁻¹)	机组出力/MW				
		机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5
{B}	82.34	40.00	170.00	0	0	91.48
{C}	82.34	40.00	170.00	0	0	91.56
{D}	172.48	40.00	170.00	0	0	191.65
{B,C}	356.15	40.00	170.00	0	0	395.72
{B,D}	429.97	40.00	170.00	25.34	0	469.29
{C,D}	399.63	40.00	170.00	76.10	0	418.66
{B,C,D}	519.97	40.00	170.00	325.34	0	469.30

系统中共存在容量分别为 300 MW,300 MW 和 400 MW 的 3 个负荷成员,它们分别位于节点 B、节点 C 和节点 D 上,并将其分别称为负荷成员 B、负荷成员 C 和负荷成员 D。这 3 个负荷同时存在系统中时,认为是全联盟,用 $N=\{B,C,D\}$ 表示。全联盟中存在 6 个非空子联盟: $\{B\},\{C\},\{D\},\{B,C\},\{B,D\},\{C,D\}$ 。所有联盟对应的全系统碳排放量和各机组出力情况如表 3 所示。其中值得注意的是:子联盟 $\{B\},\{C\}$ 和 $\{D\}$ 对应的系统碳排放量之和为 337.16,小于全联盟 $\{B,C,D\}$ 所对应的系统碳排放量 519.97;此外,子联盟 $\{B,C\}$ 和 $\{B,D\}$ 虽然负荷总量相同,但由于线路约束的作用,它们所对应的系统碳排放量并不相同。依据合理性标准,负荷成员 B,C 和 D 所分得的碳排放责任量的合理范围分别为: $82.34\leq x_B\leq 273.74,82.41\leq x_C\leq 273.81,163.82\leq x_D\leq 347.63$ 。

Shapley 值、广义核仁、FCI 和 MCI 分别对应的分摊结果如表 4 所示。并将按负荷容量进行比例分摊所得的结果也列出作为参照。

表 4 各方法对应的碳排放责任量
Table 4 Carbon obligation allocated by different methods

分摊方法	x_B	x_C	x_D
Shapley 值	156.10	140.96	222.91
广义核仁	143.28	143.28	233.41
FCI	134.76	99.08	286.13
MCI	121.69	90.00	-0.02
按容量比例	155.99	155.99	207.99

基于广义核仁的方法,由于子联盟 $\{B\}$ 和 $\{C\}$ 的剩余(不满意度)过大,使得其余子联盟(如 $\{B,C\}$ 、 $\{B,D\}$)的剩余在广义核仁的计算中未起到作用,故负荷成员 B 和 C 虽然位置因素不同却分得相同的碳排放责任量。而基于FCI的方法,负荷成员位置因素的影响得到了充分体现,但是负荷成员之间关于系统碳排放的相互影响却未能体现。因此,负荷成员 D 因为较其他负荷成员更加靠近高排放率的机组5,就造成其所分得的碳排放责任量较大。而容量比例分摊则考虑了负荷成员之间的相互影响,但却未考虑负荷成员位置因素的影响。如负荷成员 B 和 C 的负荷大小相同,但所处位置不同,按容量比例分摊,两者却分得相同的碳排放责任量。而MCI所对应的分摊结果,不满足有效性(负荷成员分得碳排放责任量之和与系统碳排放总量不相等)和合理性(负荷成员 D 分得的碳排放责任量为负值)。

基于Shapley值的分摊结果中,负荷成员的位置因素得到了体现。分析系统的功率传输系数(PTDF),有 $r_{PTDF(E-D,E-B)} < r_{PTDF(E-D,E-C)}$,意味着当线路E-D阻塞时,节点E上机组5的功率传输到节点C比传输到节点B更受约束。因此,对于联盟 $\{C,D\}$ 而言,虽然负荷总量与联盟 $\{B,D\}$ 相同,但是由于线路E-D阻塞,使得具有低碳排放率的机组3的出力增加,该联盟 $\{C,D\}$ 对应的系统碳排放量就随之减少。所以,负荷成员 C 分得的碳排放责任量比成员 B 要少。而且,Shapley值的方法综合考虑了负荷成员的位置因素和负荷成员之间关于系统碳排放的相互作用。对于负荷成员 D 而言,依据Shapley值所分得的碳排放责任量,在两种偏重于单一因素的方法(FCI的方法和容量比例分摊)所得结果之间。

5 结语

相比于当前发电侧碳排放责任分摊的方法,在负荷侧直接进行碳排放责任分摊避免了责任转移及相应的不透明的中间过程。本文涉及的4种直接分摊方法或基于合作博弈理论,或基于节点碳强度评估方法,从不同的角度分析了该问题并给出了相应的分摊结果。相比而言,基于Shapley值的分摊方法能够更加合理且平衡地考察各项相关因素,使得相应的分摊结果能够反映出各负荷成员在全系统碳排放问题上的实际贡献,从而最终实现较为公平、合理且稳定的负荷侧碳排放责任分摊。但是,由于联

盟数目随成员个数的增加呈指数增长,随之带来的计算复杂度问题使得Shapley值难以和节点碳强度方法一样实现实时计算。故为了实现效率和公平的统一,可以考虑将合作博弈思想和碳排放流理论进行分层结合。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] Organization for Economic Cooperation and Development. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios and Strategies to 2050[R]. 2010.

[2] 王秀丽,刘春阳.英国低碳化电力市场改革方案初析[J].电力系统自动化,2014,38(13):10-17.

WANG Xiuli, LIU Chunyang. Preliminary analysis of UK low carbon electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 10-17.

[3] 戴攀,邹家勇,田杰,等.中国电力行业碳减排综合优化[J].电力系统自动化,2013,37(14):1-6.

DAI Pan, ZOU Jiayong, TIAN Jie, et al. Intergrated optimization of CO₂ emission mitigation in China power sector [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 1-6.

[4] 曾鸣,张徐东,田廓,等.低碳电力市场设计与政策分析[J].电力系统自动化,2011,35(24):7-11.

ZENG Ming, ZHANG Xudong, TIAN Kuo, et al. Low carbon electricity market design and policy analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 7-11.

[5] HUANG J, XUE F, SONG X. Simulation analysis on policy interaction effects between emission trading and renewable energy subsidy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 195-201.

[6] LI J, WEN J, HAN X. Low-carbon unit commitment with intensive wind power generation and carbon capture power plant [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 63-71.

[7] HUANG J, XUE Y, JIANG C, et al. An experimental study on emission trading behaviors of generation companies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(2): 1076-1083.

[8] RAO M, SOMAN S, CHITKARA P, et al. Min-max fair power flow tracing for transmission system usage cost allocation: a large system perspective[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(3): 1457-1468.

[9] DU S, ZHOU X, MO L, et al. A novel nucleolus-based loss allocation method in bilateral electricity markets [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 28-33.

[10] KANG C, ZHOU T, CHEN Q, et al. Carbon emission flow in networks[J]. Scientific reports, 2012(2): 479.

[11] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流分析理论初探[J].电力系统自动化,2012,36(7):38-43.

- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [12] LI B, SONG Y, HU Z. Carbon Flow Tracing Method for Assessment of Demand Side Carbon Emissions Obligation[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 1100-1107.
- [13] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
- GONG Yu, JANG Chuanwen, LI Mingwei, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117.
- [14] RUIZ P, RUDKEVICH A. Analysis of marginal carbon intensities in constrained power networks[C]// 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, January 5-8, 2010, Honolulu, USA: 1-10.
- [15] PELEG B, SUDHÖLTER P. Introduction to the theory of cooperative games[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [16] MASCHLER M, SOLAN E, ZAMIR S. Game Theory[M]. UK: Cambridge University Press 2013.
- [17] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 313-320.
- [18] CONEJO A, CASTILLO E, MÍNGUEZ R, et al. Locational marginal price sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 2026-2033.
- [19] MOULIN H. Fair division and collective welfare[M]. MIT press, 2004.
- [20] 吴政球. 关于网损分摊公平性的思考[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 24-26.
- WU Zhengqiu. Notes on the reasonableness of loss allocation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 24-26.
- [21] HU Z, CHEN L, GAN D, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 653-662.
- [22] LI F, BO R. Small Test Systems for Power System Economic Studies[C]// Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA: 1-6.

周 全(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力市场、低碳电力。E-mail: billzhou@sjtu.edu.cn

冯冬涵(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力市场理论与设计、智能电网中的策略与风险。E-mail: seed@sjtu.edu.cn

徐长宝(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统相关技术。E-mail: 13985494586@163.com

(编辑 杨松迎)

Methods for Allocating Carbon Obligation in Demand Side: a Comparative Study

ZHOU Quan¹, FENG Donghan¹, XU Changbao², FENG Cheng², SUN Tao¹, DING Teng¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co. Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: For transparency and effectiveness of allocation mechanism, the carbon emission obligation of the whole system can be directly allocated at demand side from a consumption-based perspective. The problem can be treated as a cooperative game due to the interactions between the loads with respect to the system-wide carbon emission, and the classic solution concepts such as Shapley value and prenucleolus can be applied to address the problem. By combining the characteristics of the problem, four allocation methods based on the Shapley value, prenucleolus, footprint carbon intensity and marginal carbon intensity, respectively, are demonstrated. Some axioms are summarized and used as fundamental criteria to judge these allocation methods. Comparatively, the Shapley value based method can better estimate the locational factors of loads and their interactions, thereby reflecting the actual contribution of each load to the system-wide carbon emission. It has a better performance than other methods in terms of fairness, reasonableness and feasibility, as verified on a PJM-5-bus system.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2013BAA01B04), National Natural Science Foundation of China (No. 51477097) and Guizhou Power Grid Co. Ltd. (No. K-GZ2013-442).

Key words: low-carbon electricity; carbon obligation allocation; demand side; cooperative game theory; Shapley value