

# 基于最公平最小核心法的大受端电网过江断面 阻塞费用分摊研究

苗曦云<sup>1</sup>,王蓓蓓<sup>1</sup>,郭莉<sup>2</sup>,吴晨<sup>2</sup>

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院,江苏 南京 210008)

**摘要:**针对现货市场建设初期阶段我国东部某省受端电网过江断面偶发性的阻塞问题,基于英国电力市场阻塞管理的再调度思路,构建基于合作博弈的阻塞费用分摊模型,提出最公平最小核心分配方式,并将其用于过江断面阻塞管理。算例分析验证了所提分摊方法的合理性和有效性,其兼具公平性和稳定性,有助于参与者形成稳定的联盟,避免由于分摊机制不合理造成参与者退出联盟的非理性行为。

**关键词:**过江断面输电阻塞;再调度;合作博弈;最公平最小核心分配;稳定性;公平性

**中图分类号:**TM 73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202012017

## 0 引言

随着西电东送和新能源建设的推进,我国部分经济发达地区呈现出明显的高比例区外来电馈入和本地大量新能源接入的受端电网特征<sup>[1]</sup>。但由于高比例外来电的落点和受端省份负荷中心的不一致、本地新能源出力的间歇性,以及电力市场化交易和智能用电普及带来的负荷不确定性,受端电网的安全运行压力增加,尤其是通过影响调峰需求引起的重要输电断面阻塞现象时有发生<sup>[1-2]</sup>。阻塞缓解需要调用负荷中心的高价机组替代原有调度计划的低成本机组进行发电,由此带来了系统总调度成本的抬升问题。关于这部分成本如何进行分摊和消化,由于发达国家电力市场发展较为成熟,美国主要采用节点电价LMP(Locational Marginal Price)+金融输电权FTR(Financial Transmission Right)的方式进行阻塞管理<sup>[3]</sup>,英国主要采用以系统运营商发起反向交易的再调度方式进行阻塞管理<sup>[4]</sup>。而我国电力现货市场建设刚刚起步,相关利益主体市场管理的理顺还需要较长时间的适应期,如何找到一种适合我国市场建设初期国情的东部大受端电网实时调度的阻塞管理方式是一个亟需解决的问题。

美国市场广泛采用的LMP解决阻塞问题的核心思想是采用统一市场集中调度的方式,在日前和实时市场中均考虑网络约束,这使得调度结果满足潮流约束。采用LMP进行阻塞费用分配时,如果在地理位置临近的区域由于输电阻塞导致结算价格不同,则在电力现货市场初级阶段用户将难以理解和

接受<sup>[5]</sup>。作为一种有效的阻塞管理方法,LMP虽然能够提供价格信号,反映供需关系,但是会造成较大的电价波动,往往需要结合FTR来平抑<sup>[6]</sup>。同时,在我国电力现货市场建设初期,FTR市场建设亦处于起步阶段,市场体系更加复杂。LMP比较适合阻塞线路较多的输电网络,而受端电网的过江断面输电阻塞属于偶发性的输电阻塞。英国市场中广泛采用的阻塞管理的核心思想是对区域之间的偶发性输电阻塞问题,以市场主体发起反向交易的再调度方式进行阻塞消除,交易员进行市场撮合时不考虑输电网络约束,因此该阻塞管理方式又称为再调度法。该方法适合消除偶发性、可预见性的区域之间的输电阻塞,和我国东部某省过江输电断面的阻塞情况比较切合,因此本文在电力现货市场建设初期基于英国模式的再调度思想进行阻塞管理。

由于在输电网络中难以确定导致输电阻塞的具体市场成员,所有的电力交易同时使用整个输电网络,所有市场成员同时共享输电服务,因此所有市场成员本质上构成了合作关系<sup>[7-8]</sup>,可以通过合作互惠追求自身更大利益。文献[8]采用Shapley值进行输电阻塞费用的分摊,结果表明Shapley值的分摊结果满足整体理性,但是当局中人过多时将会引起联盟的“组合爆炸”。针对合作博弈的“组合爆炸”问题,文献[9]提出双边Shapley值BSV(Bilateral Shapley Value)法,可以有效减少联盟数。但是BSV法依赖于后退路径,后退路径不同造成分摊结果不同,各个参与者之间无法达成一致,可能导致联盟的解列。文献[10]基于Shapley值和最小核心法对风电场和抽水蓄能电站合作产生的收益进行分配,将所有的风电场看成一个整体与抽水蓄能电站形成联盟,在减少联盟数的同时分配结果唯一。上述文献只关注Shapley值分配结果的公平性和求解过程的时间复杂度,而忽略了分配结果的稳定性。目前在电力系

收稿日期:2020-03-04;修回日期:2020-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71471036);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71471036) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(J2019058)

统领域,关于合作博弈的研究<sup>[11]</sup>大多关注分配结果的公平性,而较少关注合作博弈联盟的稳定性。但是在其他领域,如水库调度中的水库联盟<sup>[12]</sup>、供应链中的零售商联盟<sup>[13]</sup>,会涉及联盟破裂的问题。电力作为一种商品,其拥有者和使用者之间的联盟同样也需要考虑联盟稳定性问题。对于电力系统而言,如果联盟不稳定,参与者会产生脱离联盟的意愿,可能会造成合作联盟的解列,从而使系统整体运行成本增加<sup>[14-15]</sup>。因此,阻塞管理中的合作博弈既需要考虑分配结果的公平性,又需要关注分配结果的稳定性。

基于上述思想,本文首先建立大受端电网过江断面的阻塞管理模型,基于日前市场出清结果计算实时运行中过江断面发生阻塞的费用;然后,确定合作联盟形成方式及联盟特征函数,考虑合作联盟的稳定性和分配结果的公平性,并提出最公平最小核心分配方式对阻塞费用进行分摊;最后,通过算例分析验证最公平最小核心分摊阻塞费用的合理性及优越性。本文的阻塞费用分摊方式有助于在我国电力市场建设初期的背景下引入市场理念,保证市场参与成员形成稳定的合作联盟,避免由于分摊机制不合理造成参与者退出大联盟的非理性行为,从而避免调度机构采用代价更大的行政性手段解决阻塞问题。

## 1 受端电网过江断面阻塞管理模型

分区差异化分配备用可以缓解输电阻塞问题<sup>[1]</sup>,因此本文考虑在不同地区采用平均备用的方式进行输电阻塞管理。当实时运行中市场成员偏离计划运行点时,由日前市场预留的运行备用容量应对系统的不确定性,并在日前市场出清结果(日前市场出清模型参考文献<sup>[1]</sup>)的基础上考虑常规机组向上或向下调整出力以更好地调用备用资源应对过江断面输电阻塞问题。过江断面实时阻塞管理模型如下。

### 1.1 目标函数

以阻塞调度的综合费用最小为目标函数,包含阻塞费用和旋转备用容量费用两部分。

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (C_i^+ \Delta P_{i,t}^+ + C_i^- \Delta P_{i,t}^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (B_i^+ \Delta R_{i,t} + B_i^- \Delta D_{i,t}) \quad (1)$$

其中, $T$ 为仿真总时间; $N_G$ 为发电机总数量; $\Delta P_{i,t}^+$ 、 $\Delta P_{i,t}^-$ 分别为 $t$ 时刻机组 $i$ 有功增出力、减出力,均大于等于0; $C_i^+$ 、 $C_i^-$ 分别为机组 $i$ 增出力、减出力报价; $\Delta R_{i,t}$ 、 $\Delta D_{i,t}$ 分别为实时运行中 $t$ 时刻机组 $i$ 的上备用、下备用调用量; $B_i^+$ 、 $B_i^-$ 分别为机组 $i$ 的上备用、下备用调用价格。

阻塞费用的计算公式为:

$$C_{\text{congest}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} C_i^+ \cdot \max(0, \Delta P_{i,t}^+ - \Delta P_{i,t}^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} C_i^- \cdot \min(0, \Delta P_{i,t}^+ - \Delta P_{i,t}^-) \quad (2)$$

### 1.2 约束条件

(1)功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} \tilde{P}_{Gi,t} + P_{o,t} + P_{wf,t} - P_{Lf,t} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} (\Delta R_{i,t} - \Delta D_{i,t}) = \Delta_{\text{uncertain},t} \quad (4)$$

其中, $\tilde{P}_{Gi,t}$ 为实际运行中 $t$ 时刻机组 $i$ 的出力; $P_{o,t}$ 、 $P_{wf,t}$ 、 $P_{Lf,t}$ 分别为 $t$ 时刻日前区外来电、本地新能源和负荷的出清结果; $\Delta_{\text{uncertain},t}$ 为日前市场中 $t$ 时刻的不确定量,包括负荷偏移、本地新能源预测误差以及区外来电出力波动电量。

(2)出力调整约束。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{Gi,t} = P_{Gi,t} + \Delta P_{i,t}^+ - \Delta P_{i,t}^- \\ \Delta P_{i,t}^+ \geq 0, \Delta P_{i,t}^- \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $P_{Gi,t}$ 为 $t$ 时刻机组 $i$ 日前出力。

(3)机组爬坡约束、出力约束、最小开停机约束。实时运行中这些约束分别参考文献<sup>[1]</sup>中的式(3)、(4)、(6)。

(4)运行备用约束。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{Gi,t} + R_{i,t} \leq Y_{i,t} P_{Gi}^{\max} \\ \tilde{P}_{Gi,t} - D_{i,t} \leq Y_{i,t} P_{Gi}^{\min} \\ 0 \leq \Delta R_{i,t} \leq R_{i,t} \\ 0 \leq \Delta D_{i,t} \leq D_{i,t} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $Y_{i,t}$ 为日前调度中 $t$ 时刻机组 $i$ 的开停机状态; $R_{i,t}$ 、 $D_{i,t}$ 分别为日前调度中 $t$ 时刻机组 $i$ 的上、下备用出清电量; $P_{Gi}^{\max}$ 、 $P_{Gi}^{\min}$ 分别为机组 $i$ 的最大、最小技术出力。实时运行中的不确定电量由日前市场出清的备用容量和常规机组调整出力来应对。

(5)网络约束。

$$\begin{cases} -P_l^{\max} \leq \sum_m G_{l,m} P_{m,t}^{\text{inj}} \leq P_l^{\max} \\ P_{m,t}^{\text{inj}} = \sum_{i \in G(m)} \tilde{P}_{Gi,t} + P_{o,m,t} + P_{wf,m,t} - P_{Lf,m,t} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} -P_l^{\max} \leq \sum_m G_{l,m} \tilde{P}_{m,t}^{\text{inj}} \leq P_l^{\max} \\ \tilde{P}_{m,t}^{\text{inj}} = \sum_{i \in G(m)} (\tilde{P}_{Gi,t} + \Delta R_{i,t} - \Delta D_{i,t}) + \tilde{P}_{o,m,t} + \tilde{P}_{wf,m,t} - \tilde{P}_{Lf,m,t} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_l^{\max}$ 为线路 $l$ 的输送功率上限; $G_{l,m}$ 为支路 $l$ 关于节点 $m$ 的功率转移因子; $P_{m,t}^{\text{inj}}$ 为 $t$ 时刻机组出力调整后节点 $m$ 的注入功率; $\tilde{P}_{m,t}^{\text{inj}}$ 为实时运行中 $t$ 时刻节点 $m$ 的实际注入功率; $G(m)$ 为节点 $m$ 所连机组集

合; $P_{o,m,t}$ 、 $P_{wf,m,t}$ 、 $P_{lf,m,t}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $m$ 处区外来电、本地新能源和负荷日前出清电量; $\tilde{P}_{o,m,t}$ 、 $\tilde{P}_{wf,m,t}$ 、 $\tilde{P}_{lf,m,t}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $m$ 处区外来电、本地新能源和负荷的实时电力。

## 2 基于过江断面阻塞管理模型的最公平最小核心分配方式

对于合作博弈 $^{[11]}(N, v)$ 而言,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 为 $n$ 个参与者形成的大联盟,  $v$ 为该联盟对应的特征函数值,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 为参与者的分配向量。合作博弈强调的是整体理性 $^{[11]}$ , 不是讨论理性的个体如何达成合作的过程, 而是直接讨论合作的结果和收益的分配 $^{[16]}$ 。

本文在 Nguyen T D $^{[17]}$ 建立的最公平核心的基础上对成本分摊合作博弈进行改进, 并将其应用到阻塞费用分摊领域。其核心思想是在满足个体理性、整体理性、最小化联盟的最大不满意程度 $^{[18]}$ 的基础上, 使分配结果尽可能接近 Shapley 值, 这样才能在参与者不退出大联盟的前提下尽可能提高分配结果的公平性, 有助于参与者形成稳定的合作联盟, 避免由于分摊机制不公平或联盟不稳定造成参与者退出大联盟的非理性行为。

### 2.1 最公平最小核心分配模型

以分配向量与 Shapley 值的范式距离最小为优化目标, 离 Shapley 值越近则分配结果具有越高的公平性 $^{[17]}$ , 同时考虑个体理性、整体理性及最小化联盟的最大不满意程度, 得到兼具公平性和稳定性的最公平最小核心分配模型如下:

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\phi}\| \\ \text{s.t. } x_i \leq v(\{i\}) \quad i = 1, 2, \dots, n \\ x(N) = v(N) \\ x(S) - v(S) \leq z^* \quad \forall S \subset N \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\boldsymbol{\phi}$  为 Shapley 值分配向量;  $v(\{i\})$  为参与者 $i$ 单独为政时的特征函数值;  $x(N)$  为大联盟 $N$ 中参与者的分配之和,  $x(N) = \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $v(N)$  为大联盟 $N$ 的特征函数

值;  $x(S)$  为联盟 $S$ 中参与者的分配之和,  $x(S) = \sum_{i=1}^s x_i$ ,  $s$  为联盟 $S$ 中成员数量;  $v(S)$  为联盟 $S$ 的特征函数值;  $z^*$  表示为了保证大联盟的稳定性需要对联盟征收的额外附加费用 $^{[18]}$ 。核心 $^{[11]}$ 存在时不需要征收额外附加费就可以形成稳定联盟, 即 $z^* = 0$ ; 核心不存在时 $z^*$  就是合作博弈的最小核心 $^{[19]}$ 。则 $z^*$ 通过式(10)所示模型求解。

$$\begin{cases} z^* = \max(0, \min z) \\ \text{s.t. } x(S) - v(S) \leq z \quad \forall S \subset N \\ x(N) = v(N) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $z$  为最小核心决策变量。

由于合作博弈追求的是整体理性, 同时总是认为大联盟是可以形成的 $^{[20]}$ , 而输电网络的自然垄断特性使得市场中的交易形成了事实上的联盟, 因此当整体理性和个体理性存在冲突时, 需要让渡一部分个体理性, 优先整体理性 $^{[21]}$ 。

### 2.2 公平性和稳定性评判指标

本文采用 Shapley 值的 Pearson 系数和 Spearman 系数来衡量分配方式的公平性。公平性指标范围为 $[-1, 1]$ , 指标越大表示该分配方式公平性越高, 参与者对分配结果的接受程度越高。

在不满意程度的基础上建立稳定性指标 $e_{\text{uir}}$ 衡量分配结果的稳定性。对于成本分摊类型的合作博弈而言,  $e_{\text{uir}}$ 的范围是 $(-\infty, 0]$ , 指标越小表示参与者对分配结果越不满意, 分配结果越不稳定, 参与者脱离大联盟的可能性越高。

$$e_{\text{uir}} = \sum_{S \in \Gamma_{\text{uir}}} \frac{x(S) - v(S)}{v(S)} \quad (11)$$

其中,  $\Gamma_{\text{uir}}$  为所有不满足联盟理性的联盟集合。

由于最小核心和最公平最小核心在征收附加费后是满足联盟理性要求的, 因此这2种分配方式下的稳定性指标为0。

## 3 阻塞费用分摊流程

(1) 以负的阻塞费用作为特征函数。

a. 分摊对象是阻塞费用, 参与者合作的目的是减少自身支出, 因此对于阻塞费用分摊合作博弈应该以负的阻塞费用作为特征函数(某子联盟下式(2)的相反数为该子联盟的特征函数值)。

b. 如果以正的阻塞费用作为特征函数, 假设当所有参与者单独参与系统运行时并未出现过江断面输电阻塞, 则特征值 $v(\{i\}) = 0$ 。但是如果由于某些参与者之间形成联盟导致过江断面阻塞, 则有参与者的分配大于0, 存在违背个体理性的参与者。虽然合作博弈强调整体理性, 但这并不意味着不需要考虑个体理性, 应该在满足整体理性的同时尽可能考虑个体理性的约束。

(2) 确定分摊主体及联盟形成方式。日前市场中无法明确过江断面阻塞具体由哪些市场主体造成, 考虑网络约束的日前调度计划确定后不存在输电阻塞。一旦实时运行中有市场主体偏离计划运行点, 则极有可能造成输电阻塞, 因此确定偏移日前计划调度运行点的 $n$ 个市场主体为大联盟的参与者, 采用撤销某一参与者的形式形成所有联盟方式。

(3) 根据阻塞管理模型(式(1)~(8))计算 $2^n - 1$ 个子联盟的特征函数值, 并且计算 Shapley 值分配向量作为最公平最小核心分配模型的输入, 计算得到阻塞费用的最公平最小核心分配结果 $\mathbf{x} =$

$(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 。 $x_i < 0$  表示参与者  $i$  对输电阻塞有责任; $x_i \geq 0$  则表示参与者  $i$  有助于缓解输电阻塞。阻塞费用分摊的具体流程图如图 1 所示。

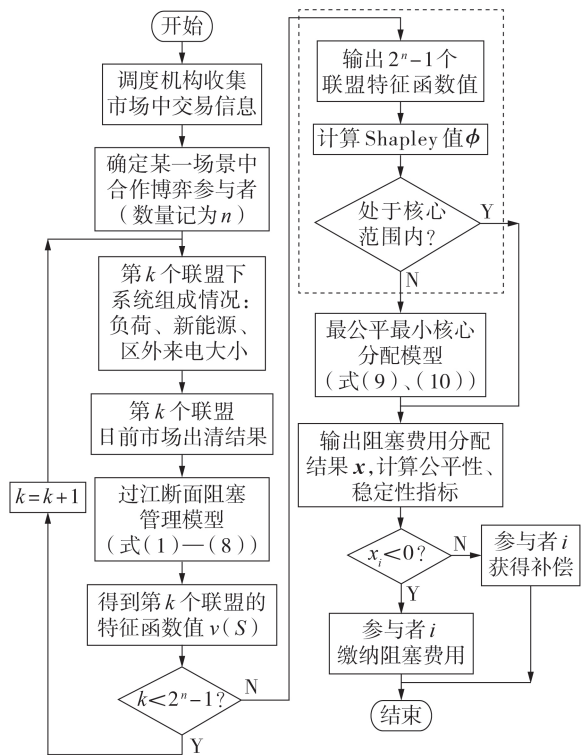


图 1 阻塞费用分摊流程图

Fig.1 Flowchart of congestion cost allocation

### 4 算例分析

基于上述最公平最小核心分配模型以及过江断面阻塞管理模型,本文采用简洁的网架说明我国东部某省大受端电网过江断面发生阻塞时的阻塞费用分配过程,以及本文所提最公平最小核心分配方式的合理性。采用 MATLAB 的 CPLEX 工具箱对阻塞管理模型和最公平最小核心模型进行求解。

#### 4.1 参数设置

以 IEEE 14 节点系统代替该受端电网进行算例论证,系统接线图、网络参数、江南江北区域的划分、过江断面输电通道的设置、电源分布情况及系统平均备用参数的设置见文献[1]。江南机组和备用资源的价格均高于江北机组。负荷分布在所有节点,记作“负荷+所在节点编号”;可再生能源分布在江北节点 1—3,记作“新能源+所在节点编号”;区外来电分布在除节点 1、7、8 以外的其余所有节点,记作“区外来电+所在节点编号”。

系统负荷、区外来电、本地新能源曲线如图 2 所示。

#### 4.2 分配方式比较

为了分析合作博弈不同分配方式对参与者行为

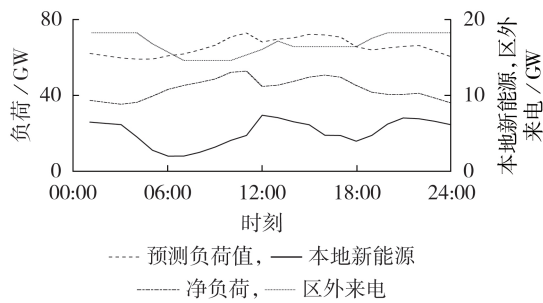


图 2 系统负荷、区外来电、本地新能源曲线

Fig.2 Curves of system loads, outside electricity and local renewable energy

的影响,将合作博弈最常用的 Shapley 值分配、最小核心分配与本文所提的最公平最小核心分配 3 种分配方式进行对比。

在阻塞费用分摊的合作博弈中,Shapley 值根据各参与者对过江断面阻塞的责任进行阻塞费用分配,是最公平的分配方式,Shapley 值越小表示该参与者对阻塞的责任越大,该参与者应缴纳越高的阻塞费用;最小核心分配是当核心不存在时合作博弈所有解中最稳定的分配方式。当各种分配方式下参与者  $i$  的分配结果小于等于单人联盟特征值  $v(\{i\})$  时,分配方式满足个体理性要求,参与者愿意加入联盟。

设置场景 1 为实时运行中江南、江北地区部分负荷发生偏移,负荷 7、8 的预测误差为 2%,负荷 3、4、6 的预测误差为 3%<sup>[22-23]</sup>,则该合作博弈参与者为负荷 3、4、6—8,该场景下阻塞费用为 186.78 万元。以该场景为例说明最公平最小核心分配方式的合理性、公平性和稳定性。

图 3 展示了场景 1 下 3 种分配方式中各参与者需要缴纳的阻塞费用及参与者单独为政时的单人联盟特征值。负荷 3、4 的正偏移首先需要调用江北地区的上备用资源来应对,即使负荷 3、4 向上偏移,江北仍留有充足的上备用资源通过过江断面传输来应对江南地区的负荷上移,因此所有负荷对过江断面阻塞都有责任,即  $x_i \leq 0 (i=1, 2, \dots, 5)$ 。

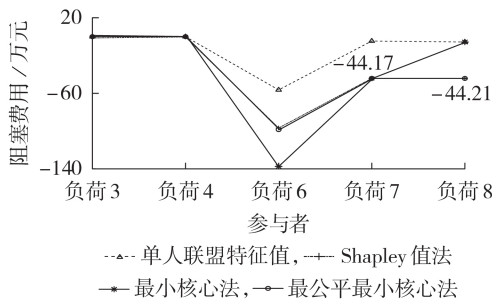


图 3 场景 1 下不同分配方式的结果对比

Fig.3 Results comparison among different allocation modes under Scenario 1

(1) Shapley 值分配方式。

Shapley 值作为合作博弈最具公平性的解,按照各参与者对输电系统的贡献进行阻塞费用分配。Shapley 值越小则阻塞责任越大,因此参与者对过江断面造成的阻塞影响按从大到小的顺序为负荷 6>负荷 8>负荷 7>负荷 3>负荷 4,各参与者分摊的阻塞费用从大到小排序为负荷 6>负荷 8>负荷 7>负荷 3>负荷 4。分摊到的阻塞费用与阻塞责任相匹配。负荷 3 和负荷 4 的电量大小以及预测误差均相同,但是最终 Shapley 值却不同,这说明各主体分摊到的阻塞费用不仅与自身偏差电量有关,还与自身所在地理位置有关。

表 1 为不稳定联盟成员组成及联盟特征值。由表中可知,联盟  $S_1$  和  $S_2$  中的参与者阻塞费用分配之和大于联盟特征值,违背了联盟理性,则在该分配方式下,联盟  $S_1$  中负荷 6—8 极有可能退出大联盟选择 3 人小团体合作来降低小团体阻塞费用,联盟  $S_2$  中负荷 3、6—8 同样有较大概率会退出大联盟选择 4 人小团体合作来降低小团体阻塞费用。

表 1 不稳定联盟成员组成及联盟特征值  
Table 1 Members and characteristic values of unstable coalitions

| 联盟 $S$ | 参与者  | 阻塞费用分配 / 万元 | $x(S)$ / 万元 | $v(S)$ / 万元 |
|--------|------|-------------|-------------|-------------|
| $S_1$  | 负荷 6 | -96.69      | -185.07     | -199.05     |
|        | 负荷 7 | -44.17      |             |             |
|        | 负荷 8 | -44.21      |             |             |
| $S_2$  | 负荷 3 | -1.40       | -186.47     | -193.20     |
|        | 负荷 6 | -96.69      |             |             |
|        | 负荷 7 | -44.17      |             |             |
|        | 负荷 8 | -44.21      |             |             |

Shapley 值分配方式的公平性和稳定性指标见表 2。Shapley 值分配方式虽然保证了分配结果的公平性,却无法保证联盟的稳定性,存在参与者退出大联盟的风险,退出大联盟的参与者会以追求自身利益最大化为目标而忽视整个系统的利益最大化。

表 2 3 种分配方式指标值  
Table 2 Index values of three allocation modes

| 分配方式      | 公平性指标      |             | 稳定性指标 $e_{\text{int}}$ |
|-----------|------------|-------------|------------------------|
|           | Pearson 系数 | Spearman 系数 |                        |
| Shapley 值 | 1          | 1           | -0.1108                |
| 最小核心      | 0.9105     | 0.8999      | 0                      |
| 最公平最小核心   | 0.9999     | 0.9999      | 0                      |

### (2) 最小核心分配方式。

最小核心分配方式作为合作博弈次稳定的解,将参与者的不满意程度降到最低。在该分配方式下,各参与者分摊到的阻塞费用按照从大到小的顺序为负荷 6>负荷 7>负荷 8>负荷 3=负荷 4,与阻塞责任不匹配,因此该分配方式结果的公平性比 Shapley 值分配方式差。

根据式(10)计算得到最小核心  $z^* = 12.3$  万元,则在场景 1 下最小核心分配方式在征收  $z^*$  大小的额外附加费用的条件下就可以形成稳定联盟,所有联盟都满足联盟理性要求,所有参与者都没有脱离大联盟的意愿。

最小核心分配方式的公平性和稳定性指标见表 2。该分配方式保证了分配结果的稳定性,但是无法达到 Shapley 值分配方式下的公平性,负荷 6 认为该分配结果对自己不公平,相比于 Shapley 值分配方式其需要多缴纳 21.79% 的阻塞费用,因此极有可能退出大联盟。

### (3) 最公平最小核心分配方式。

最公平最小核心分配方式既考虑 Shapley 值分配方式的公平性,又考虑将参与者的不满意程度降到最低。在该分配方式下,参与者分摊到的阻塞费用按照从大到小的顺序为负荷 6>负荷 8>负荷 7>负荷 3=负荷 4,与阻塞责任相匹配。场景 1 下该分配方式同样在征收 12.3 万元额外附加费的条件下就可以形成稳定联盟,所有联盟都满足联盟理性要求,所有参与者都没有脱离大联盟的意愿。

通过对各参与者分配到的阻塞费用在 Shapley 值分配方式结果的基础上进行微量调整(负荷 6 只需要多缴纳 0.92% 的阻塞费用,负荷 3、负荷 4 分别少缴纳 0.75%、0.17% 的阻塞费用)以及征收少许额外附加费用,改善了大联盟的稳定性和公平性,避免了负荷 6—8 或者负荷 3、6—8 脱离大联盟的非理性行为以及在最小核心分配方式下负荷 6 认为分配结果不公平而退出大联盟的行为。

最公平最小核心分配方式的公平性和稳定性指标见表 2。该分配方式的公平性仅次于 Shapley 值分配方式,却比 Shapley 值分配方式具有更高的稳定性。采用最公平最小核心分配方式可保证在各参与者之间形成既公平又稳定的分摊结果,从而避免调度机构采用代价更大的行政性手段解决阻塞问题。

因此,最公平最小核心分配方式具有更好的特性,可以作为电力现货市场建设初期阶段阻塞费用的分配方式。

### 4.3 负荷预测偏移时阻塞费用正负的讨论

场景 1 下合作博弈参与者均是负荷主体,所有负荷对过江断面输电阻塞均有责任。为了说明负荷在阻塞管理中可能会对输电阻塞起到缓解作用,设置场景 2 说明负荷在阻塞管理中的不同角色和责任。场景 2 设置为负荷 1、6、7 的预测误差分别为 3%、2%、2%,新能源 2、3 的预测误差均为 10%<sup>[24]</sup>,则该合作博弈的参与者为负荷 1、6、7 及新能源 2、3,该场景下阻塞费用为 108.80 万元,Shapley 值为  $\phi = (1\ 849, 1\ 616, 8\ 300, -651\ 372, -448\ 357)$  元,最公平最小核心分配向量为  $x = (0, 0, 0, -639\ 607, -448\ 357)$  元。

相比于场景1下所有负荷参与者对阻塞都有责任,场景2下结合最公平最小分配与Shapley值可知,负荷1对输电阻塞起到缓解作用,负荷6和负荷7对阻塞都有责任。这是由于在实时运行中存在预测误差,场景2下江北地区净负荷下降,江南地区净负荷上升,为应对该不确定性,优先调用便宜的江北备用资源,由江北提供上备用资源应对江南地区的负荷6、7上移,上备用资源在过江断面的传输导致过江断面输电阻塞,而负荷1上移也需要调用江北的上备用资源,从而使过江断面传输的上备用资源减少,对过江断面阻塞起到了缓解作用。因此,在场景2下负荷1不需要缴纳阻塞费用,负荷6和负荷7需要缴纳阻塞费用。

结合场景1和场景2可知,负荷在阻塞管理的具体作用和责任不仅取决于负荷自身偏移方向,还与合作博弈中其他参与者的偏移方向、偏移量、所在地理位置均有关系,因此在实时运行中要根据市场参与者对阻塞加剧或者减缓的贡献程度动态调整阻塞分配结果,才能保证合理性和可持续性。

## 5 结论

本文针对华东某大受端电网为代表的过江断面输电阻塞问题,基于再调度和合作博弈的思想,建立了最公平最小核心分配模型。该模型基于市场各参与者对阻塞的贡献程度,对再调度产生的阻塞费用进行分摊,不需要进行复杂的节点电价计算,因此可以较好地应用于我国电力现货市场建设初期的阻塞管理。本文模拟了2种实时波动下过江通道阻塞费用的分配,得到以下结论。

(1)网络阻塞情况下,市场参与者可以通过合作互惠追求自身更大利益。本文提出的最公平最小核心分配方式通过对联盟征收少许额外附加费用,使得原本在Shapley值分配方式下有可能脱离大联盟的成员选择继续合作,避免了参与者脱离大联盟的非理性行为,既保证了分配结果的稳定性,同时也兼具较高的公平性,维护良性的市场秩序。

(2)实际运行中产生的阻塞费用由发生偏移的主体共同承担,负荷在阻塞管理中对输电阻塞可能起到缓解作用。各参与者对输电阻塞的加剧或缓解取决于所有参与者的偏移方向、偏移量及所在地理位置,要根据市场参与者对阻塞加剧或者减缓的贡献程度动态调整阻塞分配结果,无区别地分配给所有偏移负荷是不合理的。

本文建立的最公平最小核心分配方式可以保证分配结果的公平性、稳定性,同时可以刺激各参与者提高自身的发/用电预测精度。但尚有很多其他因素没有考虑,如为缓解过江断面输电阻塞,未来将考虑合理配置需求响应资源,需求响应资源的阻塞责

任认定与划分将是笔者下一步的研究方向之一。

## 参考文献:

- [1] 郭莉,吴晨,陈立,等. 可再生能源跨区消纳的受端电网阻塞机理分析[J]. 电力建设,2020,41(2):21-29.  
GUO Li, WU Chen, CHEN Li, et al. Analysis on transmission congestion mechanism of cross-region renewable energy integration in receiving-end power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 21-29.
- [2] 汪惟源,赵楠,张剑楠,等. 区外来电对高受电比例受端电网辅助服务的影响[J]. 中国电力,2018,51(11):67-73.  
WANG Weiyuan, ZHAO Nan, ZHANG Jiannan, et al. The impact of outside electricity on the ancillary service of power grid with high-penetration received electricity[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 67-73.
- [3] 朱继忠. 美国电力市场的发展和实现方法分析[J]. 南方电网技术,2016,10(5):22-28,101.  
ZHU Jizhong. Development and implementation method of electricity market in the USA[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 22-28, 101.
- [4] 刘军,袁超,周源. 阻塞管理机制对发电商合约收益的影响[J]. 浙江电力,2019,38(7):14-19.  
LIU Jun, YUAN Chao, ZHOU Yuan. Impact of congestion management mechanism on contract revenue of electricity producer[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(7): 14-19.
- [5] 莫若慧,余加喜,毛李帆,等. 海南电力现货市场的机制设计对比及建设路径探讨[J]. 广西电力,2019,42(5):1-6,18.  
MO Ruohui, YU Jiayi, MAO Lifan, et al. Comparison of the mechanism design and discussion of the development route of electricity spot market in Hainan Province[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(5): 1-6, 18.
- [6] 黄培. 输电阻塞管理机制选择方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.  
HUANG Pei. Research on selection method of transmission congestion management mechanism[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [7] 鲁栗,彭建春,黄攀,等. 输电网合作投资费用的计算与分摊[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):17-20.  
LU Li, PENG Jianchun, HUANG Pan, et al. Computation and allocation of transmission cooperative investment costs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 17-20.
- [8] 贺辉,徐政,黄莹. 基于合作博弈的阻塞成本分配[J]. 华东电力,2004,32(3):27-30.  
HE Hui, XU Zheng, HUANG Ying. Congestion cost distribution based on cooperation gaming[J]. East China Electric Power, 2004, 32(3): 27-30.
- [9] 陈锐,彭建春,鲁栗,等. 基于Shapley值的双边交易阻塞成本分摊[J]. 浙江电力,2005,24(2):10-14.  
CHEN Rui, PENG Jianchun, LU Li, et al. Congestion cost allocation under bilateral transaction using Shapley value[J]. Zhejiang Electric Power, 2005, 24(2): 10-14.
- [10] 武昭原,周明,姚尚润,等. 基于合作博弈论的风储联合参与现货市场优化运行策略[J]. 电网技术,2019,43(8):2815-2824.  
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, YAO Shangrun, et al. Optimization operation strategy of wind-storage coalition in spot market based on cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2815-2824.
- [11] 董保民,王运通,郭桂霞. 合作博弈论:解与成本分摊[M]. 北京:中国市场出版社,2008:12-46.
- [12] 杨会娟. 基于合作博弈的三峡水库调度研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.

- YANG Huijuan. Study on Three Gorges reservoir operation based on the cooperative game[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [13] 李昌文,周永务,郭金森,等. 两层供应链中数量竞争下零售商联盟合作及稳定性研究[J]. 系统管理学报, 2018, 27(4): 791-800.
- LI Changwen, ZHOU Yongwu, GUO Jinsen, et al. Coalition cooperation and stability of quantity competitive retailers in a two-level supply chain[J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(4): 791-800.
- [14] 李驰宇,高红均,刘友波,等. 多园区微网优化共享运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 29-36.
- LI Chiyu, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal sharing operation strategy for multi park-level microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 29-36.
- [15] 丛昊,王旭,蒋传文,等. 基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 14-22.
- CONG Hao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Coalition game based optimized operation method for integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 14-22.
- [16] 梁伟. 博弈论视角下个体理性到集体理性的进路[J]. 湖北经济学院学报(人文社会科学版), 2009, 6(10): 30-31.
- [17] NGUYEN T D. The fairest core in cooperative games with transferable utilities[J]. Operations Research Letters, 2015, 43(1): 34-39.
- [18] SCHULZ A S, UHAN N A. Approximating the least core value and least core of cooperative games with supermodular costs[J]. Discrete Optimization, 2013, 10(2): 163-180.
- [19] KERN W, PAULUSMA D. Matching games: the least core and the nucleolus[J]. Mathematics of Operations Research, 2003, 28(2): 294-308.
- [20] 施锡铨. 合作博弈引论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 70.
- [21] 张至美, 黄少伟, 梅生伟, 等. 基于合作博弈的电网支路脆弱性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 9-19.
- ZHANG Zhimei, HUANG Shaowei, MEI Shengwei, et al. Vulnerability assessment method of branch lines in power grid based on cooperative game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 9-19.
- [22] 黄蕾. 大数据让负荷预测更准[EB/OL]. [2020-03-01]. [http://www.cpn.com.cn/dw/201607/t20160705\\_898622.html](http://www.cpn.com.cn/dw/201607/t20160705_898622.html).
- [23] 赵强, 景罗, 赵光俊, 等. 顾及空间异质性的多尺度空间负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 91-96.
- ZHAO Qiang, JING Luo, ZHAO Guangjun, et al. Multi-scale spatial load forecasting considering spatial heterogeneity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 91-96.
- [24] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.

#### 作者简介:



苗曦云

苗曦云(1996—),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统阻塞管理、电力市场(E-mail:2395413067@qq.com);  
王蓓蓓(1979—),女,江苏南京人,副教授,博士研究生导师,博士,研究方向为需求响应、电力市场(E-mail:wangbeibei@seu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

## Research on congestion cost allocation for cross-river section of large receiving-end grid based on fairest least core method

MIAO Xiyun<sup>1</sup>, WANG Beibei<sup>1</sup>, GUO Li<sup>2</sup>, WU Chen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Aiming at the occasional congestion problem of cross-river section in receiving-end grid of a province in eastern China in the early stage of spot market construction, a cooperative game based congestion cost allocation model is built based on the rescheduling idea for congestion management of electricity market in England, and the fairest least core allocation mode is proposed and applied in the congestion management of cross-river section. Case analysis verifies the rationality and effectiveness of the proposed allocation method, it has both fairness and stability, which helps the participants form a stable coalition and avoid the irrational behavior of withdrawing from the coalition due to unreasonable allocation mechanism.

**Key words:** transmission congestion of cross-river section; rescheduling; cooperative game; fairest least core allocation; stability; fairness