

双边交易电力市场下基于核仁理论的网损分摊方法

周兴华, 杜松怀

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 海淀区 100083)

A NOVEL NUCLEOLUS THEORY BASED ALLOCATION METHOD OF POWER LOSSES IN BILATERAL ELECTRICITY MARKETS

ZHOU Xing-hua, DU Song-huai

(China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The situation of current research on power losses allocation in bilateral transactions electricity markets is presented. Based on cooperative game theory, a novel nucleolus theory based method for power losses allocation under bilateral-transactions model is put forward, and was compared in detail with Shapley-value based allocation method. The impacts of different market players on network power losses were taken into account. With new method, network power losses can be allocated to each transaction in reason. The allocation results would not be affected by the sequence that each transaction is formed and be also active. The method answers for the market principles of open, equity and impartiality, and can be easy to understood and accepted by market players. Numerical tests validated the equity and validity of the method.

KEY WORDS: Loss allocation; Bilateral-transactions; Cooperative game theory; Nucleolus theory; Shapley value

摘要: 该文介绍了目前国内外对双边交易模式下网损分摊方法的研究现状, 提出了双边交易模式下基于合作博弈论中的核仁理论的网损分摊方法, 并与基于合作博弈论中 Shapley 值理论的网损分摊方法进行了详细比较。该方法考虑了不同的市场参与者对网损的影响, 能够将网损合理分摊到各个交易中, 而且不受各交易追加次序的影响, 充分体现了公开、公平、公正的市场原则, 易于市场成员理解和接受。数值计算和算例验证了该方法的公平性和有效性。

关键词: 网损分摊; 双边交易; 合作博弈论; 核仁理论; Shapley 值

1 引言

在电力市场双边交易环境下进行网损分摊的目的, 是给每个参与市场的交易分摊相应的网络传输损耗及费用。通常, 在签订双边交易的过程中, 交易量中并

未考虑由发电节点向负荷节点输电的损耗。然而, 这部分损耗是事实存在的, 提供这部分网损的机组应该为这项服务得到补偿。网损分摊的过程决定了这笔附加费用在每个双边交易中分摊的公平性。

输电系统完成多笔交易所产生的网损一般占总发电量的 5%~10%^[1]。不同的计算和分摊方法会对电用户间的分摊比例造成很大的差异。英国电力市场的运行实践表明, 不同的网损分摊方案可能对交易电价的影响高达 10%^[2]。因此, 如何科学、公平、合理地确定和分摊网损, 是电网运营者 (ISO 或 RTO) 面临的主要问题之一^[1,3]。

多种有价值的网损分摊方法被提出来^[4-12], 其中双边交易模式下的网损分摊方法有交易微增分摊法、直流潮流分解法和损耗增量法。

交易微增分摊法^[8]沿给定的交易随时间改变的曲线, 将与每个无穷小交易增量相关的独立网损量积分, 得到最后的交易分摊结果。并且认为网损的惟一性和正确性在给定所有交易变化曲线的情况下是确定的。但是, 网损分摊属于事后分摊, 在结算交易段中使用的交易量变化曲线是真实存在的, 并不可以人为假定。因此, 试图沿假定的交易量变化曲线积分来确定交易网损分摊量是无实际意义的。

直流潮流分解法^[9]利用直流潮流的假设, 对每种交易都给出了一种基于潮流的分摊表达式, 并且对总的系统网损也有一个表达式。该方法允许计算任意数量交易的分摊, 但在忽略交易的方向潮流因素的同时, 却并未忽略那些在少量反向潮流交易中产生反向潮流的因素。

这些反向潮流因素使得这些交易分摊到的网损量比原来更少，这两点前后矛盾。此外，直流法作了许多理想化的假设，如忽略对地支路等。这些假设造成了网损补偿量与分摊量的差额，进而引起相关经济实体间的收支不平衡。

损耗增量法^[10]是基于计算系统的损耗来确定具体的某一笔交易对系统的影响。该类方法有交易估价法和合计分摊法两种。使用交易估计法计算时，每次只考虑一个交易，以便给出系统中每个交易所起影响的一个估计值。另一方面，通过计算包括所有交易情况下的系统损耗的改变量，可以方便地确定系统为这些交易所作的实际损耗补偿总量。合计分摊法既考虑交易作为第一笔交易被加入系统的网损增量，又考虑了交易作为最后一笔交易加入系统时的网损增量。这种方法的优点是计算过程清晰，易于市场参与者接受；其不足之处是网损分摊总量与实际网损值之间存在差异，需要有一个均摊不平衡量的过程。总体而言，合计分摊法更适合于实际系统的网损分摊。

本文提出一种新的，在双边交易模式下基于合作博弈论中的核仁理论的网损分摊方法，并与文[11]提出的基于 Shapley 值理论的网损分摊方法进行了比较。该方法全面考虑了不同的市场参与者对网损的影响，能够将网损合理分摊到各个交易中，而且不受各交易追加次序的影响，充分体现了公开、公平、公正的市场原则，易于市场成员理解和接受。

2 合作博弈论的技术方法

2.1 合作对策模型的构成

博弈论 (Game theory) 又称为“对策论”，是一种使用严谨数学模型来解决现实世界中的利害冲突的理论。博弈论可以分为非合作博弈论和合作博弈论两大类。前者适用于对竞争环境中单个或群体代理商之间的交互作用的分析，后者适用于对合作环境中单个或群体代理商之间的交互作用的分析。

合作博弈论的合作对策模型，是一种解决多利益主体协调行动以产生效益分摊问题的有效数学模型方法。当问题结局由多个利益主体行为确定时，若多利益主体协调行为产生的结局能带来更大的效益，这种协调行为就是合作。

合作对策模型由两个基本要素构成：局中人集合和特征函数。局中人集合由所有对问题结局有影响的独立利益主体构成。若问题涉及 n 个 ($n > 1$) 利益主体，

则采用 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示局中人。特征函数 $v(S)$ 的实际意义是：在局中人集合 N 上的实函数，对任何可能的局中人集合 S (称为结盟)，都产生一个由结盟产生的效益 $v(S)$ 。显然，特征函数应具有这样的性质：如果 S 与 T 是不相交的联盟，即如果 $S \cap T = \emptyset$ ，则有 $v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$ 。实际上这是实现更大结盟的必要条件。由于网损存在交互项^[12]，所以每笔交易参加合作后产生的网损高于它不参加联合传输所产生的网损。网损分摊正好满足特征函数的必要条件。

当有多个局中人共同使用某项资源时，需要对此产生的费用或效益在所有局中人中进行分摊，这又称为合作对策问题的解。在合作对策模型中，可以使用多种方法来分析和求解博弈，最显著的方法有谈判集、核、核心、核仁以及 Shapley 值。在分摊网损时，本文采用核仁和 Shapley 值进行研究。这是由于这两种方法的解具有稳定性 (其解必定惟一且可行)。

2.2 核仁求解

在求解 n 人对策方面，施得勒 (Schmeidler) 于 1969 年引入核仁概念^[13]。核仁有如下的性质：① 每个对策有一个而且只有一个核仁；② 假如存在核心，则核仁是核心的一部分。

利用核仁对网损进行分摊的目标是找到一种方法来合理分摊由交易之间的交互作用产生的网损。设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示每笔交易分摊的网损的集合， $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表示该网损的转归集合， $v(S)$ 为交易联盟 S 的网损。核仁是基于最小核心进行分摊，可以表示为

$$\begin{cases} C^+(\varepsilon) = \{y \in Y / \varphi(y) \leq \varepsilon\} \\ \varphi(y) = \max_{S \in N} e(S, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 ε 为任意小实数； $e(S, y)$ 为联盟 S 在转归 $y \in Y$ 处的超出值，即 $e(S, y) = V(S) - \sum_{i \in S} y_i$ ； $\varphi(y)$ 是超出值的最大值； $V(S)$ 为由交易联盟 S 的成员之间的交互作用产生的网损，即

$$V(S) = v(S) - \sum_{i \in S} v(i) \quad (2)$$

式(1)可以采用线性规划^[14]来实现，即

$$\begin{cases} \min & \varepsilon \\ \text{s.t.} & V(S) = \sum_{i \in S_1} y_i \\ & V(S) - \sum_{i \in S_2} y_i \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中 s_1 为全体交易的集合； s_2 为交易的所有非空子集。

每笔交易的网损分摊, 应该为每笔交易分摊的、由交互作用产生的网损加上每笔交易单独作用时的网损, 即:

$$x_i = v(i) + y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

2.3 Shapley 值求解

Shapley 值是求解合作博弈问题的另一方法。基于 Shapley 值的网损分摊计算公式为:

$$\phi_i(v) = \sum_{i \in S} \frac{(n-|S|)!|S|-1)!}{n!} \times [v(S) - v(S - \{i\})] \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, S \subset N$$

式中 i 为参与网损分摊的某个交易; $\phi_i(v)$ 为分摊给交易 i 的网损; S 为包含交易 i 的联盟; $|S|$ 为联盟 S 中的交易个数; n 为参与网损分摊的交易个数; $n!$ 为大联盟 (包括全部交易) 所有可能交易加入次序的排列; $v(S)$ 为联盟 S 的网损函数; $S - \{i\}$ 为在联盟中去掉局中人 i ; $v(S) - v(S - \{i\})$ 为计算由于交易 i 加入联盟 S 给联盟带来的网损增加值, 即联盟 S 的边际网损。

3 算例分析

3.1 案例 1-5 节点电力系统

图 1 所示为一个 5 节点电力系统。该系统有两个发电机组和 3 个负荷。系统的线路参数见表 1。

假设两个独立发电机组 G_1 和 G_2 分别与用户签订双边交易合同, 即发电机组 G_1 与用户 3 签订交易合同, 发电机组 G_2 与用户 4 和用户 5 签订交易合同, 交易量见表 2。

该市场中共有 3 笔同时进行的交易, 按博弈论把这 3 笔交易视为 3 个局中人。市场运行时所产生的网损分摊问题可以看成是一个合作对策问题。可以采用核仁和 Shapley 值实现网损的公平分摊。全体局中人的集合为 $N = \{1, 2, 3\}$, 它的所有非空子集有 6 个, 即:

$$\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}$$

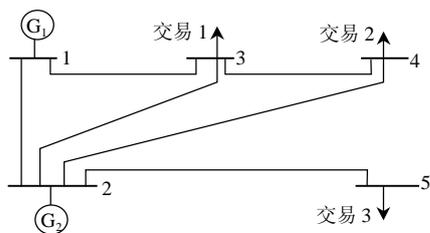


图 1 5 节点系统拓扑结构图

Fig. 1 5-bus system diagram

全体局中人的集合以及每一个非空子集都形成一个组合。每一个组合就是一个联盟 S , 共有 7 个联盟或

称 7 个交易模式。采用最优潮流方法分别计算每个交易模式下的网损, 结果见表 3。

表 1 5 节点系统的线路参数

Tab. 1 Branch parameters of 5-bus system

| 起始节点 | 终止节点 | R/μ | X/μ | B/μ | Rating/MVA |
|------|------|---------|---------|---------|------------|
| 1 | 2 | 0.02 | 0.06 | 0.0 | 200 |
| 1 | 3 | 0.08 | 0.24 | 0.0 | 200 |
| 2 | 3 | 0.06 | 0.18 | 0.0 | 80 |
| 2 | 4 | 0.02 | 0.18 | 0.0 | 200 |
| 2 | 5 | 0.08 | 0.12 | 0.0 | 200 |
| 3 | 4 | 0.01 | 0.03 | 0.0 | 200 |
| 4 | 5 | 0.03 | 0.24 | 0.0 | 200 |

表 2 5 节点系统的交易数据

Tab. 2 Transaction data of 5-bus system

| 交易编号 | 用户 | 供电商 | 交易量 | |
|------|----|-----|---------------|-----------------|
| | | | P/MW | Q/Mvar |
| 1 | 3 | 1 | 67.5 | 41.83 |
| 2 | 4 | 2 | 60.0 | 37.18 |
| 3 | 5 | 2 | 90.0 | 55.77 |

表 3 5 节点系统的交易网损

Tab. 3 Transaction losses of 5-bus system

| 交易组合 | 有功网损/MW | 无功网损/MVA |
|-------|-----------|-----------|
| 1 | 2.053704 | 6.760428 |
| 2 | 1.792876 | 6.353393 |
| 3 | 5.945731 | 12.472080 |
| 1&2 | 3.532309 | 13.653320 |
| 1&3 | 8.829733 | 19.325456 |
| 2&3 | 8.826877 | 19.118354 |
| 1,2&3 | 13.734904 | 33.532002 |

从表 3 可以看出, 网损计算结果具有下列特征:

(1) 2 个交易组成的交易联盟的网损大于这 2 个交易单独作用时的网损之和。

(2) 3 个交易同时进行时的网损大于其中任意 2 个交易组成的交易联盟的网损再加上另一个交易单独作用时的网损。

造成上述特点的原因就是交易之间的交互作用产生了网损交叉项。使得系统总网损大于各交易单独作用时的网损之和。

由此可知, 交易加入联盟的次序给联盟带来的网损增加值有极大的影响。事实上, 某个交易最后加入联盟给联盟带来的网损增加值比最先加入联盟给联盟带来的网损增加值要大得多。基于核仁的网损分摊方法平等地对待各种可能的交易加入次序, 并赋予相同的权值, 这样产生的分摊结果对各个交易来说都是公平的, 而且易于被市场参与者所接受。这一点与基于 Shapley 值的网损分摊方法相同。

(1) 核仁分摊网损

首先对有功损耗进行分摊计算。由式(2)计算交互作用的网损 $V(S)$, 即

$$V(\{1\}) = v(\{1\}) - v(\{1\}) = 0 \quad (6)$$

$$V(\{2\}) = 0 \quad (7)$$

$$V(\{3\}) = 0 \quad (8)$$

$$V(\{12\}) = v(\{12\}) - v(\{1\}) - v(\{2\}) = -0.314272 \quad (9)$$

$$V(\{13\}) = v(\{13\}) - v(\{1\}) - v(\{3\}) = 0.830297 \quad (10)$$

$$V(\{23\}) = v(\{23\}) - v(\{2\}) - v(\{3\}) = 1.088269 \quad (11)$$

$$V(\{123\}) = v(\{123\}) - v(\{1\}) - v(\{2\}) - v(\{3\}) = 3.942592 \quad (12)$$

将式 (6)~(12)代入式(3), 得

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{y_1, y_2, y_3} \quad \varepsilon \\ \text{s.t.} \quad y_1 + y_2 + y_3 = 3.942592 \\ \varepsilon \geq -y_1 \\ \varepsilon \geq -y_2 \\ \varepsilon \geq -y_3 \\ \varepsilon \geq -0.314272 - y_1 - y_2 \\ \varepsilon \geq 0.830297 - y_1 - y_3 \\ \varepsilon \geq 1.088269 - y_2 - y_3 \end{array} \right. \quad (13)$$

式(13)结果为 $y_1=1.314197$, $y_2=1.314197$, $y_3=1.314197$ 。

由式(4)得, 每个交易应该分摊的有功损耗为

$$x_1=3.367902, x_2=3.107074, x_3=7.259929。$$

同理, 可以计算出每个交易应该分摊的无功损耗, 其结果见表 4。

(2) Shapley 值分摊网损

同样, 首先对有功损耗进行分摊。由式(5)计算交易 1 应该承担的网损为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{0! \cdot 2!}{3!} [v(\{1\}) - v(\{1\} - \{1\})] + \frac{1! \cdot 1!}{3!} [v(\{12\}) - v(\{2\})] + \frac{1! \cdot 1!}{3!} [v(\{13\}) - v(\{3\})] + \\ & \quad 2! \cdot 0! / 3! [v(\{123\}) - v(\{23\})] = 3.091149 \end{aligned}$$

同理, 求得交易 2, 3 应该承担的网损分别为 $\phi_2 = 2.959308$, $\phi_3 = 7.684447$ 。

采用同样的方法对无功损耗进行分摊计算, 分摊结果见表 4。

表 4 5 节点系统的两种分摊方式的网损分摊结果

Tab. 4 Allocation results of two methods in 5-bus system

| 交易编号 | 核仁 | | Shapley 值 | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 有功网损/MW | 无功网损/MVA | 有功网损/MW | 无功网损/MVA |
| 1 | 3.367902 | 9.409128 | 3.091149 | 9.416909 |
| 2 | 3.107074 | 9.002093 | 2.959308 | 9.109841 |
| 3 | 7.259929 | 15.120780 | 7.684447 | 15.005252 |
| 总计 | 13.734904 | 33.532002 | 13.734904 | 33.532002 |

(3) 分摊结果分析

从表 4 的分摊结果可以看出, 无论是对单个交易

还是交易联盟以及整个分摊而言, 两种分摊方法的分摊结果都是理性的。以核仁方法为例具体表现在:

(1) 对单个交易而言, 每个交易分摊的网损大于该交易单独作用时产生的网损, 即

$$x_1 = 3.367902 + j9.409128 > v\{1\} = 2.053704 + j6.760428$$

$$x_2 = 3.107074 + j9.002093 > v\{2\} = 1.792876 + j6.353393$$

$$x_3 = 7.259929 + j15.120780 > v\{3\} = 5.945731 + j12.472080$$

(2) 对交易联盟而言, 交易联盟中每个交易分摊的网损之和大于该交易联盟的网损, 即:

$$x_1 + x_2 = 6.474976 + j18.411221 > v\{1,2\} = 3.532309 + j13.653320$$

$$x_1 + x_3 = 10.627831 + j24.529908 > v\{1,3\} = 8.829733 + j19.325456$$

$$x_2 + x_3 = 10.367003 + j24.122873 > v\{2,3\} = 8.826877 + j19.118354$$

(3) 对整个分摊方法而言, 整个分摊是收支平衡的, 即:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 13.734904 + j33.532002 = v\{1,2,3\}$$

Shapley 值分摊法同样满足上述结果。

3.2 案例 2 -- 14 节点电力系统

图 2 所示为 IEEE-14 节点电力系统。该系统有 5 个发电机组和 5 个负荷。系统的线路参数和变压器支路参数分别见表 5 和表 6。

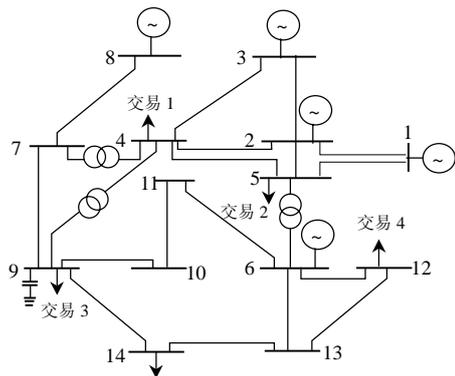


图 2 14 节点系统拓扑结构图

Fig. 2 14-bus system diagram

假设只有两个独立发电机组 G_1 和 G_2 与用户签订双边交易合同 (即发电机组 G_1 与用户 4、9、12、14 签订交易合同, 发电机组 G_2 与用户 5 签订交易合同, 交易量见表 7), 其他发电机组不参与交易。

表5 14节点系统的线路参数

Tab. 5 Branch parameters of 14-bus system

| 起始节点 | 终止节点 | 越限情况 | R/pu | X/pu | B/2/pu | Rating/MVA | 额定电流/pu |
|------|------|------|---------|---------|---------|------------|---------|
| 1 | 2 | 0 | 0.01938 | 0.05917 | 0.02640 | 7.13 | 3.42 |
| 2 | 3 | 0 | 0.04699 | 0.19797 | 0.02190 | 300 | 1.71 |
| 2 | 4 | 0 | 0.05811 | 0.17632 | 0.01870 | 300 | 1.71 |
| 1 | 5 | 1 | 0.05403 | 0.22304 | 0.02460 | 300 | 1.71 |
| 2 | 5 | 1 | 0.05695 | 0.17388 | 0.01700 | 300 | 1.71 |
| 3 | 4 | 1 | 0.06701 | 0.17103 | 0.01730 | 300 | 1.71 |
| 4 | 5 | 1 | 0.01335 | 0.04211 | 0.00640 | 300 | 1.71 |
| 7 | 8 | 0 | 0.0 | 0.17615 | 0.0 | 300 | 0.50 |
| 7 | 9 | 0 | 0.0 | 0.11001 | 0.0 | 300 | 0.65 |
| 9 | 10 | 0 | 0.03181 | 0.08450 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 6 | 11 | 0 | 0.09498 | 0.19890 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 6 | 12 | 0 | 0.12291 | 0.15581 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 6 | 13 | 0 | 0.06615 | 0.13027 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 9 | 14 | 0 | 0.12711 | 0.27038 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 10 | 11 | 0 | 0.08205 | 0.19207 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 12 | 13 | 0 | 0.22092 | 0.19988 | 0.0 | 100 | 0.50 |
| 13 | 14 | 0 | 0.17093 | 0.34802 | 0.0 | 100 | 0.50 |

表6 14节点系统的变压器支路参数

Tab. 6 Transformer branch parameters of 14-bus system

| 起始节点 | 终止节点 | R/pu | X/pu | 变比 | 变比上限 | 变比下限 | 额定电流/pu |
|------|------|------|---------|-------|------|------|---------|
| 4 | 7 | 0.0 | 0.20912 | 0.978 | 1.10 | 0.90 | 0.65 |
| 4 | 9 | 0.0 | 0.55618 | 0.969 | 1.10 | 0.90 | 0.40 |
| 5 | 6 | 0.0 | 0.25202 | 0.932 | 1.10 | 0.90 | 0.65 |

表7 14节点系统的交易数据

Tab. 7 Transaction data of 14-bus system

| 交易编号 | 用户 | 供电商 | 交易量 | |
|------|----|-----|-------|--------|
| | | | P/pu | Q/pu |
| 1 | 4 | 1 | 0.478 | -0.039 |
| 2 | 5 | 2 | 0.942 | 0.19 |
| 3 | 9 | 1 | 0.295 | 0.166 |
| 4 | 12 | 1 | 0.135 | 0.058 |
| 5 | 14 | 1 | 0.149 | 0.05 |
| 合计 | | | 1.999 | 0.503 |

该系统共有5笔交易，这些交易同时进行。按博弈论规则，把这5笔交易视为5个局中人。电力市场的网损分摊问题可视为一个合作对策问题。本文分别采用核仁和 Shapley 值进行网损分摊。全体局中人的集合为 $N = \{1,2,3,4,5\}$ ，它的所有非空子集有 $2^5 - 2 = 30$ 个。

全体局中人的集合以及每一个非空子集都形成一个组合。每一个组合就是一个联盟 S ，共有 $2^5 - 1 = 31$ 个联盟或称 $2^5 - 1$ 个交易模式。采用最优潮流方法分别计算每个交易模式下的网损，结果略。采用核仁分摊网损和 Shapley 值分摊网损，分摊结果见表8。

由表8的分摊结果可以看出，无论是对单个交

表8 14节点系统的两种分摊方式的网损分摊

Tab. 8 Allocation results of two methods in 14-bus system

| 交易编号 | 核仁 | | Shapley 值 | |
|------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | 有功网损 /MW | 无功网损 /MVA | 有功网损 /MW | 无功网损 /MVA |
| 1 | 1.594090 | 0.225016 | 1.592751 | 0.167795 |
| 2 | 2.080631 | 5.280567 | 1.790328 | 4.285014 |
| 3 | 0.696655 | -1.210594 | 0.703339 | -2.206200 |
| 4 | 0.178724 | -5.230704 | 0.326010 | -4.001265 |
| 5 | 0.345899 | -4.235395 | 0.483571 | -3.416453 |
| 总计 | 4.895999 | -5.171109 | 4.895999 | -5.171109 |

易还是交易联盟以及整个分摊而言，两种分摊方法的分摊结果都是理性的。

4 说明

本文在计算各个交易联盟的网损时，采用了最优潮流方法，这样计算出来的结果更能体现系统条件和市场环境因素的影响。

如果市场交易中既有双边交易又有 Pool 交易，可以把 Pool 交易视为包括多台发电机和多个负荷的一笔双边交易，然后按本文的方法计算各笔交易应分摊的网损。此时等效的那笔交易的网损为所有 Pool 交易的网损总和。要得到 Pool 中各笔交易应分摊的网损，需要进一步进行分摊。

5 结论

本文提出了在双边交易模式下，基于合作博弈论中的核仁理论的网损分摊方法。该方法考虑了各市场参与者对网损的影响，不受各交易追加次序的影响，公平对待每个交易，其分摊原理公平合理，收支完全平衡，其分摊结果易于被各个交易接受。

与 Shapley 值分摊方法相比，核仁分摊方法只与联盟值有关，其计算比 Shapley 值分摊方法简单。此外，核仁分摊方法是否受反向潮流因素的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 杜正春, 夏道止. 输电系统网损的合理分摊 [J]. 电力系统自动化,

- 2002,26(4): 18-22.
- Du Zhengchun, Xia Daozhi. A novel method for allocation of transmission losses[J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(4): 18-22.
- [2] 刘梓洪, 程浩忠, 刘晓冬, 等. 国外典型区域电力市场网损分摊方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 29-32.
- Liu Zihong, Cheng Haozhong, Liu Xiaodong, *et al.* Review of overseas typical loss allocation methods[J]. Automation of Electric Power System, 2003,27(4): 29-32.
- [3] 常乃超, 郭志忠. 损耗分摊问题的思考 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 43-47.
- Chang Naichao, Guo Zhizhong. Pondering on the loss allocation problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 43-47.
- [4] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 潮流追踪迭代算法 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 38-42.
- Li Weidong, Sun Hui, Wu Yaguang. An iterative load flow tracing method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 38-42.
- [5] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 输电成本计算中损耗分摊原则的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 85-90.
- Li Weidong, Sun Hui, Wu Yaguang. Research on rule for losses allocation in transmission cost calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 85-90.
- [6] 魏立明, 李卫东, 肖宏飞. 输电开放下基于交叉影响矩阵的损耗分摊方案研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 54-59.
- Wei Liming, Li Weidong, Xiao Hongfei. Research on the cross interaction matrix based loss allocation scheme under transmission open access[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 54-59.
- [7] 吴政球, 郭志忠. 非合同交易电力市场网损和输电设备瞬时使用程度分摊 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 36-40.
- Wu Zhengqiu, Guo Zhizhong. Loss and temporary usage allocation under pool dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 36-40.
- [8] Francisco, D. Galiana and Mark Phelan. Allocation of transmission losses to bilateral contracts in a competitive environment[J]. IEEE Transactions On Power Systems, 2000, 15(1): 143-150.
- [9] George Gross, Shu Tao. A physical-flow-based approach to allocating transmission losses in a transaction framework[J]. IEEE Transactions On Power Systems, 2000, 15(2): 631-637.
- [10] Mesut E. Baran, Venkat Banunarayanan and Kenneth E. Garren, A transaction assessment method for allocation of transmission services[J]. IEEE Transactions On Power Systems, 1999, 14(3): 920-928.
- [11] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于 Shapley 值的输电网损分配 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 18-21.
- Jiang Hui, Peng Jianchun, Ou Yaping. Shapley-value based transmission power loss allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 18-21.
- [12] 陈息, 李锐, 徐敏. 网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法用于有功优化计算的比较 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 34-36, 39.
- Chen Ken, Li Xiaorui, Xu Min. Comparisons between new method and transposed Jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 34-36, 39.
- [13] 托马斯 L.C 著, 靳敏, 王辉青, 译. 决策论及其应用[M]. 天津: 解放军出版社, 1988.
- [14] 何坚勇. 运筹学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

收稿日期: 2004-10-08。

作者简介:

周兴华 (1978-), 男, 重庆合川人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和电力市场;

杜松怀 (1963-), 男, 河南孟州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化和电力市场。