

## 基于叠加定理和 Aumann-Shapley 法的发电权交易网损分摊

王 峰<sup>1</sup>, 刘创华<sup>2</sup>, 魏 珍<sup>2</sup>, 袁世强<sup>1</sup>, 袁中琛<sup>1</sup>, 王 瑶<sup>1</sup>, 陈少功<sup>3</sup>

(1. 天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 天津市电力公司, 天津 300000;  
3. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 发电权交易使得电网的潮流以及损耗发生变化, 对电网的运行成本产生影响, 因此如何有效计及这种影响并对电网进行相应的补偿是亟待解决的问题。为解决此问题, 首先针对断面网损进行研究, 在断面下将输电网等效为线性电路, 发电机和负荷等效为电流源, 通过叠加原理确定各支路潮流及功率损耗与各电流源的关系式, 进而确定发电权交易量与网损变化量的关系式。其次, 将网损分摊看作一个合作博弈问题, 即网损是由所有参与者共同合作的结果。应用 Aumann-Shapley 法对支路的互耦合功率损耗进行分摊, 可保证结果公平合理, 且具有经济一致性。最后, 通过 IEEE9 节点标准算例进行仿真, 验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 发电权交易; 网损分摊; 叠加定理; Aumann-Shapley 法

### Losses allocation resulting from generation rights trade based on superposition principle and Aumann-Shapley method

WANG Zheng<sup>1</sup>, LIU Chuang-hua<sup>2</sup>, WEI Zhen<sup>2</sup>, YUAN Shi-qiang<sup>1</sup>, YUAN Zhong-chen<sup>1</sup>, WANG Yao<sup>1</sup>, CHNE Shao-gong<sup>3</sup>

(1. Tianjin Electric Power Company Electric Power Academy of Sciences, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China; 3. Yanshan University Power Electronic Energy Saving and Transmission Control Key Laboratory in Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Generation rights trade will change the power flow of the grid as well as losses, and then affect the transmission service costs of the grid. Therefore how to take such influence into account effectively and make the corresponding compensation to power grid are the problems to be solved. Firstly, this paper studies the losses allocation method for the section network. A cross-section grid network is equivalent to a linear circuit. Generators and loads are modelled as current sources and the relationship between current sources and branch losses is then established based on the superposition principle. Based on the first step, the relationship between the quantities of generation rights trade and the variations in losses of the network is established. Moreover, losses allocation can be seen as a cooperative game problem that investigates the allocation of surplus obtained by agents of a coalition through cooperation. The Aumann-Shapley is used to allocate the losses and provide fair and reasonable allocation with good economic coherence. Finally, illustrative numerical results with the IEEE 9-bus test system is presented to prove the validity.

**Key words:** generation rights trade; losses allocation; superposition principle; Aumann-Shapley method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0013-10

## 0 引言

“十二五”期间国家对节能减排提出了更高的要求, 而发电权交易是电力行业实现节能减排的重要手段之一。发电权是电厂在合约市场、日前市场等市场中竞争获得的发电许可份额。发电权交易市场是各发电厂按照一定的规则对发电权进行交易的场所<sup>[1]</sup>。目前对于发电权交易的研究主要集中在发电权交易机制、市场模式模型、报价和阻塞调度方

面<sup>[2-12]</sup>。而在发电权交易对输电网网损的影响方面研究较少。文献[13]基于电路理论计算了发电权交易的增量网损并进行分摊, 但其未对互耦合损耗进行分摊。文献[14]建立了发电权交易矩阵, 通过 B 系数法建立并分析发电权交易对输电网网损的影响, 但其分摊方法会造成过度回收, 需进行归一化处理, 对实际指导意义不大。文献[15]对年度发电权交易增量网损计算和分摊进行了深入的研究, 给出了明确的计算方法, 很好地结合了实际, 但其对

典型日的选择具有随意性,不一定具有代表性,另外利用节点微增微减的过度回收需修正系数进行修正,不能很好地反映经济性。

在网损分摊方面,国内外学者已进行了很多深入研究,取得了一定的研究成果,其中一部分成果已用于实际电力市场中,指导实际的市场分摊活动。目前,对于网损分摊的研究总结起来主要分为以下几个方面。

比例方法是经典方法之一,易于理解和编程实现<sup>[16-17]</sup>。其主要缺点是它没有考虑实际的输电网络拓扑结构。目前,西班牙大陆电力市场采用比例方法进行网损分摊,并将所有网损分摊给用户。

增量网损系数法也称为边际成本法,即网损通过发电机和负荷的增量网损系数进行分配<sup>[18-20]</sup>。此方法的不足之处是分摊结果与总网损不一致,即会造成成本过度回收。另外,选择不同的平衡节点将直接影响到其他各节点的分摊结果,因此,网损分摊之前市场参与者对平衡节点的选择存在争议也是该方法的主要缺陷之一。

文献[21]对基于潮流追踪的各种网损分摊方法进行了分析研究,指出潮流追踪具有明确的物理特性,能清晰地表达实际电网中发电机节点和负荷节点之间的潮流情况,但潮流追踪往往是有功潮流和无功潮流分别进行追踪,忽略了二者之间的耦合关系,因而分摊是不合理的。

基于电路理论的方法简单并易于理解,正如文献[16, 22-25]所示。其在将网损分配给双边交易中的发电机和负荷时遇到的主要困难是,尽管进行了一定近似,但是最终结果仍具有一定的主观性。这主要是由于输电系统网损具有不可分割和非线性的特性<sup>[17]</sup>。

文献[26]设计了一个两步合作博弈论将原始的复杂问题变成了两个简单的问题,但不能面对大系统时计算量变得不能承受。文献[27]提出了考虑有功潮流和无功潮流耦合作用与有功损耗和无功损耗交叉作用的有功和无功损耗分摊的 Shapley 方法,但它不能根据参与者的容量保证相应的公平性。

文献[28]指出 Shapley 方法本身存在公平性和计算可行性方面的缺陷, Aumann-Shapley 方法通过将代理进行极限化处理和解析方法弥补了这两方面的缺陷,故 Aumann-Shapley 方法是对 Shapley 方法的发展,使其更加适合多代理的场合,保证分摊的公平性。文献[29]利用 Aumann-Shapley 法这方面的优点对网损进行分摊,但是其推导基于节点电流的假设,没有建立发电节点和负荷节点电流源与支路功率损耗的关系,没有考虑节点电压的叠加效果。

综合上述文献,为了更清晰地理清网损责任,本文在断面下将输电网等效为线性电路,发电机和负荷等效为电流源,通过叠加原理确定各支路潮流及功率损耗与各电流源的关系式,进而确定发电权交易量与网损变化量的关系式。然后将网损分摊看作一个合作博弈问题,应用 Aumann-Shapley 法对支路的互耦合功率损耗进行分摊,可保证结果公平合理,且具有经济一致性。

## 1 基于叠加定理的网络损耗分析

在某断面潮流下,将电力网络等效成电路网络。如图 1 所示,其中有  $m$  个电源、 $n-m$  个负荷,  $n$  为节点总数,将所有电源和负荷等效为电流源。

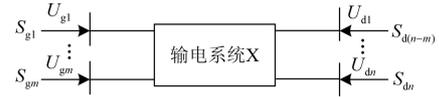


图 1 输电系统 X

Fig. 1 Transmission system X

已知各个节点的注入电流,用向量表示为

$$[I_1, I_2, \dots, I_n]$$

其中

$$\dot{I}_k = \left( \frac{\tilde{S}_k}{\sqrt{3}\dot{U}_k} \right)^* \quad (1)$$

设网络中任意一条支路  $l$ , 其首末节点分别为  $i$  和  $j$ , 阻抗为  $z_l = z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$ 。根据线性电路的叠加定理,每个节点的电压是各个独立电流源分别作用下的叠加和。在电流源  $k$  作用下,根据节点电压方程,节点  $i$  和  $j$  的电压分别为  $U_{ik}$  和  $U_{jk}$ , 其中

$$\dot{U}_{ik} = \sqrt{3}Z_{ik} \dot{I}_k \quad (2)$$

$$\dot{U}_{jk} = \sqrt{3}Z_{jk} \dot{I}_k \quad (3)$$

因此,

$$\dot{U}_i = \sum_{k=1}^n \dot{U}_{ik} = \sum_{k=1}^n \sqrt{3}Z_{ik} \dot{I}_k \quad (4)$$

$$\dot{U}_j = \sum_{k=1}^n \dot{U}_{jk} = \sum_{k=1}^n \sqrt{3}Z_{jk} \dot{I}_k \quad (5)$$

电流源  $k$  单独作用时,从节点  $i$  流向节点  $j$  的自耦合功率为

$$\tilde{S}'_{kl(i \rightarrow j)} = \dot{U}_{ik} \left( \frac{\dot{U}_{ik} - \dot{U}_{jk}}{z_l} \right)^* \quad (6)$$

将式(2)、式(3)代入式(6), 得

$$\tilde{S}'_{kl(i \rightarrow j)} = 3 Z_{ik} \dot{I}_k \frac{Z_{ik} - Z_{jk}^*}{z_l} \dot{I}_k^* \quad (7)$$

同理, 从节点  $j$  流向节点  $i$  的自耦合功率为

$$\tilde{S}'_{kl(j \rightarrow i)} = \dot{U}_{jk} \left( \frac{\dot{U}_{jk} - \dot{U}_{ik}}{z_l} \right)^* \quad (8)$$

将式(7)、式(8)相加, 得

$$\begin{aligned} \tilde{S}'_{kl} &= \tilde{S}'_{kl(i \rightarrow j)} + \tilde{S}'_{kl(j \rightarrow i)} = \\ &3A \frac{r_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} I_k^2 + j3A \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} I_k^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$A = r_{ik}^2 + x_{ik}^2 + r_{jk}^2 + x_{jk}^2 - 2r_{ik}r_{jk} - 2x_{ik}x_{jk}$$

当电流源  $k$  和电流源  $m$  相互耦合时, 支路  $l$  损失的计算包含以下两种情况。

第一种情况是

$$\tilde{S}''_{kl(i \rightarrow j)|m} = \dot{U}_{ik} \left( \frac{\dot{U}_{im} - \dot{U}_{jm}}{z_l} \right)^* \quad (10)$$

$$\tilde{S}''_{kl(j \rightarrow i)|m} = \dot{U}_{jk} \left( \frac{\dot{U}_{jm} - \dot{U}_{im}}{z_l} \right)^* \quad (11)$$

$$\tilde{S}''_{l|m} = \tilde{S}''_{kl(i \rightarrow j)|m} + \tilde{S}''_{kl(j \rightarrow i)|m} \quad (12)$$

第二种情况是

$$\tilde{S}''_{ml(i \rightarrow j)|k} = \dot{U}_{im} \left( \frac{\dot{U}_{ik} - \dot{U}_{jk}}{z_l} \right)^* \quad (13)$$

$$\tilde{S}''_{ml(j \rightarrow i)|k} = \dot{U}_{jm} \left( \frac{\dot{U}_{jk} - \dot{U}_{ik}}{z_l} \right)^* \quad (14)$$

$$\tilde{S}''_{l|k} = \tilde{S}''_{ml(i \rightarrow j)|k} + \tilde{S}''_{ml(j \rightarrow i)|k} \quad (15)$$

将两种情况进行求和计算, 得

$$\begin{aligned} S''_l &= \tilde{S}''_{l|m} + \tilde{S}''_{l|k} = \\ &3 \frac{2}{z_l} [B(I_{ks} I_{ms} + I_{kx} I_{mx}) - C(I_{ks} I_{mx} - I_{kx} I_{ms})] \end{aligned} \quad (16)$$

式中:

$$B = (r_{ik} - r_{jk})(r_{im} - r_{jm}) + (x_{ik} - x_{jk})(x_{im} - x_{jm});$$

$$C = (r_{ik} - r_{jk})(x_{im} - x_{jm}) - (r_{im} - r_{jm})(x_{ik} - x_{jk});$$

$I_{ks}$  为电流源  $k$  注入电流的实部;  $I_{kx}$  为电流源  $k$  注入电流的虚部。

所有电流源共同作用下, 支路  $l$  的功率损耗为

$$\tilde{S}_l = \sum_{k=1}^n \tilde{S}'_{kl} + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{m=k+1}^n \tilde{S}''_{l} \quad (m \neq k) \quad (17)$$

因此, 在所有电流源共同作用下, 整个网络的损耗为

$$\tilde{S} = \sum_{l=1}^L \tilde{S}_l \quad (18)$$

式中,  $L$  为整个网络的支路数。

## 2 发电权交易与网络损耗之间的关系

基于以上推导, 可得支路  $l$  中与电源  $k$  有关的网损为

$$\begin{aligned} S_{l(k)} &= 3A \frac{r_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (I_{ks}^2 + I_{kx}^2) + j3A \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (I_{ks}^2 + I_{kx}^2) + \\ &\sum_{m=1}^n 3 \frac{2}{z_l} [B(I_{ks} I_{ms} + I_{kx} I_{mx}) - C(I_{ks} I_{mx} - I_{kx} I_{ms})] \end{aligned} \quad (19)$$

$m \neq k$

假设网络中有一对电源进行发电权交易, 即电源  $b$  从电源  $s$  购入一定电量, 交易完成后电流源  $b$  和  $s$  的电流值分别变化  $(\Delta I_{bs}, \Delta I_{bx})$  和  $(\Delta I_{ss}, \Delta I_{sx})$ 。

此时, 支路  $l$  中与电流源  $b$  有关的网损变化为

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{l(b)} &= \Delta \tilde{S}'_{l(b)} + \Delta \tilde{S}''_{l(b)} = \\ &3A \frac{r_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bs} \Delta I_{bs} + \Delta I_{bs}^2 + 2I_{bx} \Delta I_{bx} + \Delta I_{bx}^2) + \\ &j3A \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bs} \Delta I_{bs} + \Delta I_{bs}^2 + 2I_{bx} \Delta I_{bx} + \Delta I_{bx}^2) + \\ &\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq b}}^n 3 \frac{2}{z_l} [B(\Delta I_{bs} I_{ms} + \Delta I_{bx} I_{mx}) - C(\Delta I_{bs} I_{mx} - \Delta I_{bx} I_{ms})] + \\ &3 \frac{2}{z_l} [B(I_{bs} \Delta I_{ss} + \Delta I_{bs} \Delta I_{ss} + I_{bx} \Delta I_{sx} + \Delta I_{bx} \Delta I_{sx}) - \\ &C(I_{bs} \Delta I_{sx} + \Delta I_{bs} \Delta I_{sx} - I_{bx} \Delta I_{ss} - \Delta I_{bx} \Delta I_{ss})] \end{aligned} \quad (20)$$

由此可得出支路  $l$  的损耗变化量为

$$\begin{aligned}
& \Delta \tilde{S}_{l(b)} + \Delta \tilde{S}_{l(s)} = \\
& 3A \frac{r_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bs} \Delta I_{bs} + \Delta I_{bs}^2 + 2I_{bx} \Delta I_{bx} + \Delta I_{bx}^2) + \\
& j3A \frac{x_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bs} \Delta I_{bs} + \Delta I_{bs}^2 + 2I_{bx} \Delta I_{bx} + \Delta I_{bx}^2) + \\
& 3A \frac{r_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{ss} \Delta I_{ss} + \Delta I_{ss}^2 + 2I_{sx} \Delta I_{sx} + \Delta I_{sx}^2) + \\
& j3A \frac{x_{ij}^2}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{ss} \Delta I_{ss} + \Delta I_{ss}^2 + 2I_{sx} \Delta I_{sx} + \Delta I_{sx}^2) + \\
& \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq b}}^n 3 \frac{2}{*} \frac{[B(\Delta I_{bs} I_{ms} + \Delta I_{bx} I_{mx}) - C(\Delta I_{bs} I_{mx} - \Delta I_{bx} I_{ms})]}{Z_l} + \\
& \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq s}}^n 3 \frac{2}{*} \frac{[B(\Delta I_{ss} I_{ms} + \Delta I_{sx} I_{mx}) - C(\Delta I_{ss} I_{mx} - \Delta I_{sx} I_{ms})]}{Z_l} + \\
& 3 \frac{2}{*} \frac{[B(\Delta I_{bs} \Delta I_{ss} + \Delta I_{bx} \Delta I_{sx}) - C(\Delta I_{bs} \Delta I_{sx} - \Delta I_{bx} \Delta I_{ss})]}{Z_l}
\end{aligned} \quad (21)$$

假设有  $r$  对交易, 买方节点集合  $B=(b_1, b_2, \dots, b_r)$ 、相应的电流源集合为  $I_b=(I_{b1}, I_{b2}, \dots, I_{br})$ 、卖方节点集合  $S=(s_1, s_2, \dots, s_r)$ 、相应的电流源集合为  $I_s=(I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sr})$ 。则  $r$  对发电权交易引起的网损变化可同理求得, 见附录公式(1)。

### 3 应用 Aumann-Shapley 法对网络损耗进行分摊

支路损耗分摊可以看作是一个合作博弈问题, 合作博弈是研究局中人达成合作时如何分配合作得到的盈余, 即盈余分配问题。采用的方法一般是 Shapley 值法和 Aumann-Shapley 值法, Aumann-Shapley 值法是 Shapley 值法的极限化过程, 即 Shapley 值法是离散的, Aumann-Shapley 值法是连续的。Aumann-Shapley 值法能很好地解决无限多个局中人的收益分配问题, 它具有经济一致性和平等性等性质, 能够实现公平合理的分配; 又因其是 Shapley 值法的扩展, 所以能回收全部成本, 即分摊量之和与总成本相等。

对于没有进行发电权交易的电网, 要想求得各电流源对于网损损耗的参与量, 每个电流源的自耦合功率损耗已代表各自电源网损参与量的一部分, 无需进行分配, 只需对互耦合功率损耗部分利用 Aumann-Shapley 值法进行分摊。

利用 Aumann-Shapley 值方法求取单位参与因子  $\phi_{ks}$  和  $\phi_{kx}$ :

$$\begin{aligned}
\phi_{ks} &= \int_0^1 \frac{\partial \Delta S_k(tI)}{\partial I_{ks}} dt = \\
& 3 \sum_{m=1}^n \frac{1}{*} \frac{(BI_{ms} - CI_{mx})}{Z_l} \quad m \neq k \quad (22)
\end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned}
\phi_{kx} &= \int_0^1 \frac{\partial \Delta S_k(tI)}{\partial I_{kx}} dt = \\
& 3 \sum_{m=1}^n \frac{1}{*} \frac{(BI_{mx} + CI_{ms})}{Z_l} \quad m \neq k \quad (23)
\end{aligned}$$

那么, 电流源  $k$  对支路  $l$  的损耗参与量为

$$\tilde{S}_{l \leftarrow k} = \tilde{S}'_{kl} + I_{ks} \phi_{ks} + I_{kx} \phi_{kx} \quad (24)$$

进而, 电流源  $k$  对整个网络的网损参与量为

$$\tilde{S}_{L \leftarrow k} = \sum_{l=1}^L \tilde{S}_{l \leftarrow k} \quad (25)$$

当电网中存在发电权交易时, 根据第 3 节的推导可得发电权交易对各支路损耗以及整个电网的网损的影响也可分为自耦合功率损耗和互耦合功率损耗。因此, 为了清晰地界定各个发电权交易参与者的网损责任, 需要对互耦合功率损耗部分利用 Aumann-Shapley 值方法进行分摊。

分别对  $\Delta I_{bi}$  求取单位参与因子  $\phi_{\Delta bis}$  和  $\phi_{\Delta bix}$ :

$$\begin{aligned}
\phi_{\Delta bis} &= \sum_{i=1}^r \int_0^1 \frac{\partial \Delta \tilde{S}_{l(b)}(tI)}{\partial \Delta I_{bis}} dt = \\
& \sum_{i=1}^r \frac{3}{*} \frac{[B \Delta I_{ss} - C \Delta I_{sx}]}{Z_l} \quad (26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{\Delta bix} &= \sum_{i=1}^r \int_0^1 \frac{\partial \Delta \tilde{S}_{l(b)}(tI)}{\partial \Delta I_{bix}} dt = \\
& \sum_{i=1}^r \frac{3}{*} \frac{[B \Delta I_{sx} + C \Delta I_{ss}]}{Z_l} \quad (27)
\end{aligned}$$

那么电流源  $b$  对支路  $l$  的网损变化参与量为

$$\Delta S_{l \leftarrow \Delta bi} = \Delta \tilde{S}'_{l(bi)} + I_{\Delta bis} \phi_{\Delta bis} + I_{\Delta bix} \phi_{\Delta bix} \quad (28)$$

## 4 算例分析

本文采用 IEEE9 节点系统进行仿真, 并使用 Matlab 编写了仿真程序。如图 2 所示, 该系统有 9 个节点, 其中 1、2、3 为电源节点, 5、6、8 为负荷节点。

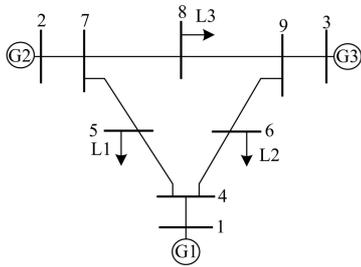


图 2 IEEE9 节点系统图

Fig. 2 IEEE 9-bus power system

首先, 对 IEEE9 节点系统应用叠加定理进行分析, 得到各节点电压的幅值, 电流源注入的实部和虚部, 以及各支路的自耦合损耗功率和互耦合损耗功率, 如表 1 和表 2 所示。

表 1 电压幅值和注入电流及与潮流结果对比

Table 1 Voltage amplitude and injection current and comparison with the trend results

节点号	潮流计算所得电压幅值	本文方法所得电压幅值	注入电流	
			实部	虚部
1	1.040	1.038 8	0.397	-0.150
2	1.025	1.024 2	0.912	0.111
3	1.025	1.024 1	0.472	0.100
4	1.026	1.024 6	0	0.000
5	0.996	0.994 3	-0.703	0.340
6	1.013	1.011 5	-0.501	0.203
7	1.026	1.024 8	0	0.000
8	1.016	1.014 9	-0.571	0.191
9	1.032	1.031 3	0	0.000

从表 2 可以看出, 本文所提算法计算所得各支路功率损耗与潮流计算所得结果一致。另外, 本文所提算法将支路损耗进行划分, 即定义了自耦合功率损耗和互耦合功率损耗。表中已经列出了各支路

的自耦合功率损耗和互耦合功率损耗。为了更加清晰地表达本文所做工作, 下面将各支路中各电流源的自耦合功率损耗和互耦合功率损耗一一列出, 也为分摊工作打下基础。支路上各电流源的自耦合功率损耗的分布情况如表 3 所示。

表 2 支路损耗及与潮流计算结果对比

Table 2 Branch loss and comparison with the trend results

支路	首节点	末节点	自耦合损耗	互耦合损耗	所提算法的损耗	潮流计算的损耗
1	1	4	0	0	0	0.000 0
2	2	7	0	0	0	0.000 0
3	3	9	0	0	0	0.000 0
4	4	5	0.006 7	-0.004 1	0.002 6	0.002 6
5	4	6	0.008 5	-0.006 8	0.001 7	0.001 7
6	5	7	0.026	-0.003	0.023	0.023 0
7	6	9	0.015 2	-0.001 7	0.013 5	0.013 5
8	7	8	0.007 8	-0.003	0.004 8	0.004 8
9	8	9	0.007 8	-0.007	0.000 9	0.000 9
总和			0.072	-0.025 6	0.046 5	0.046 4

表 3 列出了每条支路上各电流源的自耦合功率损耗分布情况, 从表中可以看出, 由于节点 4、7 和 9 没有注入, 所以自耦合功率损耗为零。电流源 1 在支路 8 和 9 上的自耦合功率损耗为零, 说明电流源 1 没有为此处的负荷供电, 所以没有引起损耗。其他为零的同样情况亦是如此。将每行求和可以得到各支路的自耦合功率损耗, 数值和表 3 中的数值相同。将每列相加可以得到各电流源的自耦合功率损耗。

互耦合功率损耗是由两个电流源共同作用产生的, 由于图中有 9 个节点, 所以对每条支路而言, 将会有 36 种组合, 限于篇幅原因, 不能将每条支路的互耦合功率损耗分布情况一一列出, 只列出支路 9 的互耦合功率损耗情况, 如表 4 所示。

表 3 支路上各电流源的自耦合功率损耗

Table 3 Coupling power loss of each current source of the branch

支路	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总和
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.001 1	0.001 1	0	0	0.003 6	0.000 9	0	0.000 1	0	0.006 8
5	0.001 8	0.000 3	0.000 4	0	0.003 2	0.002 8	0	0	0	0.008 5
6	0.001 3	0.012	0.000 4	0	0.009 1	0.000 5	0	0.002 7	0	0.026
7	0.001 4	0.001 4	0.003 8	0	0.001 2	0.005 2	0	0.002 2	0	0.015 2
8	0	0.004 6	0.000 5	0	0.000 8	0	0	0.001 8	0	0.007 7
9	0	0.003 3	0.001 5	0	0.000 2	0.000 3	0	0.002 4	0	0.007 7
总和	0.005 6	0.022 7	0.006 6	0	0.018 1	0.009 7	0	0.009 2	0	

表4 支路9上各电流源的互耦合功率损耗

Table 4 Current source coupled to each power loss of branch 9

电流源	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总和
1	0	-0.000 3	0.000 2	0	0.000 1	-0.000 1	0	0.000 3	0	0.000 2
2	0	0	-0.004 5	0	-0.001 3	0.001 9	0	-0.005 2	0	-0.009 1
3	0	0	0	0	0.000 8	-0.001 2	0	0.003 4	0	0.003
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	-0.000 5	0	0.001 3	0	0.000 8
6	0	0	0	0	0	0	0	-0.001 8	0	-0.001 8
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总和	0	-0.000 3	-0.004 3	0	-0.000 4	0.000 1	0	-0.002	0	-0.006 9

从表中可以看出，第一行为电流源 1 与其余各电流源相互作用的互耦合功率损耗，其余各行同理。表中数据再次证明了之前的推导，即互耦合功率损耗可正可负。将表中所有数据求和可以得到支路 9 的互耦合功率损耗-0.006 9，与表 2 中的-0.007 刚好吻合。这部分损耗交叉项正是损耗不能合理分摊的症结所在，为此应用 Aumann-Shapley 法对此部分损耗进行分摊，如表 5 所示。表 5 中数据先是通过 Aumann-Shapley 法求得各电流源的单位参与因子，再与各电流源的实部和虚部相乘得到的，是对互耦

合功率损耗的合理分摊。正如叠加原理中所提到的，整个网络是由所有电流源共同作用构成的，因此网络中产生的损耗，尤其是互耦合功率损耗也是由所有电流源共同作用的结果，任何个体都不能独善其身，所以表中每个电流源承担网损责任，数值不为零。将表中每行数据求和即可得到各支路的互耦合损耗，所得数值与表 2 中数值相同。将表中每列数据相加可得各电流源从互耦合功率损耗中分摊得到的损耗。

表 5 支路上互耦合功率损耗的分摊情况

Table 5 Apportionment of mutual coupling power loss of the branch

支路	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总和
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.000 5	-0.002 2	0.000 1	0	-0.000 6	-0.002 3	0	0.000 4	0	-0.004 1
5	-0.000 1	0.000 3	-0.001 1	0	-0.005 5	-0.000 7	0	0.000 2	0	-0.006 9
6	-0.006 3	0.004 4	0.002 6	0	0.004 1	0.002 6	0	-0.010 3	0	-0.002 9
7	-0.005 4	0.003	0.003 2	0	0.002 4	0.002 5	0	-0.007 4	0	-0.001 7
8	0.000 4	0.000 1	-0.002 1	0	-0.002 6	0.000 2	0	0.001	0	-0.003
9	0.000 1	-0.004 7	-0.000 6	0	0.000 2	-0.000 9	0	-0.001	0	-0.006 9
总和	-0.010 8	0.000 9	0.002 1	0	-0.002	0.001 4	0	-0.017 1	0	

在表 3~表 5 的基础上，将表 3 和表 5 相加，即将各电流源的自耦合功率损耗和分摊的功率损耗求和，即可得到各电流源最终的网损贡献量。所得结果如表 6 所示。

从表 6 中可以看出，每行的和即为各支路的功率损耗，与表 2 中数值相同，每列的和为各电流源最终的网损贡献量，这些数据中有正有负，说明各电流源对网损的作用不尽相同。数值为正表明，该

电流源将会增大网损；数值为负表明，该电流源可以减少网损，因此可以适当增大此类电流源的容量，减少其他电流源的容量，这样就可以在一定程度上降低整个网络的损耗。因此，本文所提算法可以较好地指导实际电力系统的运行，有效降低网络损耗，且具有一定的经济性。

当系统中存在发电权交易时，可以将交易分为两种情况。第一种情况为电流源 1 与电流源 2 交易，

其中电流源 1 为发电权的买方, 电流源 2 为发电权的卖方。交易后, 电流源 1 实部变化量为 0.3, 电流源 2 的实部变化量为-0.3。按照式(19)~式(21), 可以求得发电权交易后电流源 1 和 2 在各支路中各自的

功率损耗, 和相互作用的互耦合功率损耗。按照式(26)~式(28)即可将互耦合功率损耗进行分摊。具体结果如表 7 所示。

表6 各电流源对各支路功率损耗的分摊情况

Table 6 Apportionment for each branch of power loss of current source

支路	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总和
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.001 6	-0.001 1	0.000 1	0	0.002 9	-0.001 4	0	0.000 5	0	0.002 6
5	0.001 7	0.000 6	-0.000 7	0	-0.002 3	0.002 1	0	0.000 2	0	0.001 6
6	-0.005 1	0.016 4	0.002 9	0	0.013 2	0.003 1	0	-0.007 6	0	0.022 9
7	-0.004	0.004 4	0.007	0	0.003 5	0.007 8	0	-0.005 1	0	0.013 6
8	0.000 4	0.004 6	-0.001 6	0	-0.001 8	0.000 2	0	0.002 8	0	0.004 6
9	0.000 1	-0.001 4	0.000 9	0	0.000 4	-0.000 5	0	0.001 4	0	0.000 9
总和	-0.005 3	0.023 5	0.008 6	0	0.015 9	0.011 3	0	-0.007 8	0	

表 7 互耦合损耗分摊前后电流源1和2的损耗比较

Table 7 Loss comparison of the current source 1 and 2 before and after the mutual coupling loss sharing

支路	交易前损失	交易后损失	分摊前电流源引起的网损			分摊后各电流源损失	
			1	2	1 和 2	1	2
1	0.000 0	0	0	0	0	0	0
2	0.000 0	0	0	0	0	0	0
3	0.000 0	0	0	0	0	0	0
4	0.002 6	0.006 3	0.002 3	0.000 9	0.000 5	0.002 6	0.001 2
5	0.001 7	0.004 2	0.003 2	-0.000 4	-0.000 3	0.003	-0.000 5
6	0.023 0	0.008 2	-0.007	-0.009 6	0.001 8	-0.006 1	-0.008 7
7	0.013 5	0.006 1	-0.005 4	-0.002 7	0.000 6	-0.005 1	-0.002 4
8	0.004 8	0.002 7	0.000 7	-0.002 6	-0.000 2	0.000 6	-0.002 7
9	0.000 9	0.002 4	0.000 1	0.001 3	0.000 1	0.000 2	0.001 4
总和	0.046 4	0.029 9	-0.006 1	-0.013 1	0.002 5	-0.004 8	-0.011 7

在表 7 中, 分别列出了发电权交易前后各支路损耗以及网损分摊前后电流源承担的功率损耗。这里, 将电流源 1 和 2 共同作用的互耦合功率损耗通过 Aumann-Shapley 法分摊给电流源 1 和 2。从表中可以看出, 交易后支路 4、5、9 的损耗较交易前有所增加, 支路 6、7、8 的损耗较交易前有所减少, 总体网络损耗在交易后呈现减小趋势。说明发电权交易能够在一定程度上均衡网络潮流, 减少大容量远距离输电, 增加就近供电, 从而使得网损在一定程度上有所下降。根据各支路的分摊情况, 可以看

出分摊前后保证总的支路损耗不变, 有效避免了边际网损分摊所带来的过度回收问题。另外, 将最后各支路中各电流源的分摊结果与交易前的各支路的功率损耗相加, 正好和交易后各支路的功率损耗相等, 从而证明了本文所提算法可以通过交易前的运行状态数据、网络拓扑以及交易量对交易后整个系统的运行状态起到预测作用, 可以为交易中心或者调度人员提供参考数据。最后, 分摊后的网损为每个电流源的真实网损责任, 可以为以后的定价收费提供便利, 为制定合理的网损补偿政策奠定基础。

当系统中存在两对发电权交易时, 电流源 1 与

电流源 2 和电流源 3 进行交易, 其中电流源 1 为发电权的买方, 电流源 2 和 3 为发电权的卖方。交易后, 电流源 1 实部变化量为 0.5, 电流源 2 的实部变化量为-0.3, 电流源 3 的实部变化量为-0.2。同理,

按照式(19)~式(21), 可以求得发电权交易后电流源 1 和 2 在各支路中各自的功率损耗, 和相互作用的互耦合功率损耗。按照式(26)~式(28)即可将互耦合功率损耗进行分摊。如表 8、表 9 所示。

表 8 交易前后各支路损耗及电流源1、2和3的损耗比较

Table 8 Each branch loss before and after transactions and the comparison of loss of the current source 1, 2 and 3

支路	交易前 损失	交易后 损失	电流源引起的网损					
			1	2	3	1 与 2	2 与 3	3 与 1
1	0.000 0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.000 0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.000 0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.002 6	0.008 5	0.004 5	0.000 9	-0.000 1	0.000 8	0	-0.000 1
5	0.001 7	0.008 5	0.006 3	-0.000 4	0.000 7	-0.000 5	-0.000 1	0.000 8
6	0.023 0	0.004 3	-0.011	-0.009 6	-0.002 4	0.003	0.000 6	0.000 7
7	0.013 5	0.001 2	-0.008 3	-0.002 7	-0.005 3	0.001 1	0.000 6	0.002 2
8	0.004 8	0.004 1	0.001 1	-0.002 6	0.001 4	-0.000 3	-0.000 4	0.000 2
9	0.000 9	0.001 2	0.000 2	0.001 3	-0.000 6	0.000 1	-0.000 6	-0.000 1
总和	0.046 4	0.027 8	-0.007 2	-0.013 1	-0.006 3	0.004 2	0.000 10	0.003 7

表 9 互耦合损耗分摊前后电流源1、2和3的损耗比较

Table 9 Comparison of the loss of the current source 1, 2 and 3 before and after mutual coupling loss allocation

支路	分摊前损耗			分摊后损耗		
	电流源 1	电流源 2	电流源 3	电流源 1	电流源 2	电流源 3
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0.004 5	0.000 9	-0.000 1	0.004 8	0.001 3	-0.000 2
5	0.006 3	-0.000 4	0.000 7	0.006 5	-0.000 7	0.001 1
6	-0.011	-0.009 6	-0.002 4	-0.009 2	-0.007 8	-0.001 8
7	-0.008 3	-0.002 7	-0.005 3	-0.006 6	-0.001 9	-0.003 9
8	0.001 1	-0.002 6	0.001 4	0.001 1	-0.002 9	0.001 3
9	0.000 2	0.001 3	-0.000 6	0.000 2	0.001 1	-0.001
总和	-0.007 2	-0.013 1	-0.006 3	-0.003 2	-0.010 9	-0.004 5

## 5 结论

发电权交易作为一种节能减排的工具, 在提高经济效益和增强市场竞争方面的作用是非常重要的。然而, 随着发电权交易的引入, 传输网络的潮流和网损也将发生改变。所以本文提出基于叠加定理的建立网络中各支路损耗与各节点电流源的关系式。支路损耗划分为自耦合损耗和互耦合损耗。其中自耦合损耗为各电流源自己产生的网损责任, 不需要分摊。而互耦合损耗是任意两个电流源相互作

用产生的网损, 需要在两个相关电流源之间进行分摊。基于以上分析, 建立了发电权交易量与网损变化量之间的关系式。进而, 将损耗分摊问题看作合作博弈问题, 即网损是由所有电流源共同作用产生的。然后应用 Aumann-Shapley 法对互耦合损耗进行分摊。应用基于合作博弈论的 Aumann-Shapley 法可以公平合理地将损耗分摊给各个电流源, 可以使得市场参与者得到公平合理的结果, 避免了不公平等现象的出现, 从而能保证市场有序的运行。通过对 IEEE9 节点标准算例的仿真分析, 充分验证了本文

算法的真实性和有效性。

## 附录

$$\begin{aligned}
 \Delta \tilde{S}_{l(b)} + \Delta \tilde{S}_{l(s)} = & \\
 & \sum_{i=1}^r \left[ 3A \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bis} \Delta I_{bis} + \Delta I_{bis}^2 + 2I_{bix} \Delta I_{bix} + \Delta I_{bix}^2) + j3A \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{bis} \Delta I_{bis} + \Delta I_{bis}^2 + 2I_{bix} \Delta I_{bix} + \Delta I_{bix}^2) \right] + \\
 & \sum_{i=1}^r \left[ 3A \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{sis} \Delta I_{sis} + \Delta I_{sis}^2 + 2I_{six} \Delta I_{six} + \Delta I_{six}^2) + j3A \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (2I_{sis} \Delta I_{sis} + \Delta I_{sis}^2 + 2I_{six} \Delta I_{six} + \Delta I_{six}^2) \right] + \quad (1) \\
 & \sum_{i=1}^r \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq B}}^n 3 \frac{2}{Z_l} \left[ B(\Delta I_{bis} I_{ms} + \Delta I_{bix} I_{mx}) - C(\Delta I_{bis} I_{mx} - \Delta I_{bix} I_{ms}) \right] + \\
 & \sum_{i=1}^r \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq S}}^n 3 \frac{2}{Z_l} \left[ B(\Delta I_{sis} I_{ms} + \Delta I_{six} I_{mx}) - C(\Delta I_{sis} I_{mx} - \Delta I_{six} I_{ms}) \right] + \\
 & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r 3 \frac{2}{Z_l} \left[ B(\Delta I_{bis} \Delta I_{sjs} + \Delta I_{bix} \Delta I_{sjx}) - C(\Delta I_{bis} \Delta I_{sjx} - \Delta I_{bix} \Delta I_{sjs}) \right]
 \end{aligned}$$

## 参考文献

- [1] 黎灿兵, 康重庆, 夏清, 等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 13-18.  
LI Can-bing, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Generation rights trade and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 13-18.
- [2] 陈赓, 严正. 考虑节能减排与网络约束的发电权交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 52-57.  
CHEN Yun, YAN Zheng. Generation rights trade model based on energy-saving emission-reducing and network constraint[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 52-57.
- [3] 王雁凌, 程倩. 基于节能降耗的发电权交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 28-32.  
WANG Yan-ling, CHENG Qian. Generation rights trade model based on conservation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 28-32.
- [4] 谭忠富, 董力通, 刘文彦, 等. 发电机组污染排放约束下电量互换合作博弈优化模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 245-251.  
TAN Zhong-fu, DONG Li-tong, LIU Wen-yan, et al. A cooperation game optimization model for energy generating interchange between power generation units with enviromental emission constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 245-251.
- [5] 黄大为, 刘志向, 杨春雨, 等. 计及网损成本的发电权交易模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 38-42.  
HUANG Da-wei, LIU Zhi-xiang, YANG Chun-yu, et al. Generation rights trade model considering transmission losses cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 38-42.
- [6] 葛亮, 谢翔宇, 李湘祁, 等. 与市场机制相协调的发电交易与调度的节能减排方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 167-173.  
GE Liang, XIE Xiang-yu, LI Xiang-qi, et al. The method about energy saving and emission reduction of power generation transaction dispatch conformed to market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 167-173.
- [7] 张粒子, 王睿, 金允剑, 等. 基于跨省发电权交易的“疆电外送”交易模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 69-75.  
ZHANG Li-zi, WANG Rui, JIN Yun-jian, et al. Study of transaction modes of Xinjiang electricity transmission based on trans-provincial generation right exchange theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 69-75.
- [8] 李啸虎, 李磊, 赵岩, 等. 考虑非计划停运及检修的发电权多目标优化交易[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 35-40.  
LI Xiao-hu, LI Lei, ZHAO Yan, et al. Multi-objective optimized trade of generation rights considering non-plan outage and repair[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 35-40.
- [9] 彭春华, 孙惠娟, 余延芳. 考虑竞价风险的多目标优化发电研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 210-216.  
PENG Chun-hua, SUN Hui-juan, YU Yan-fang. Multi-objective optimization of thermal power units output considering the bidding risk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 210-216.
- [10] 卢志刚, 陈静思. 计及网损的发电权交易报价修正方法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 146-149.  
LU Zhi-gang, CHEN Jing-si. A method to modify quoted price of generation right trade off considering network

- loss[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 146-149.
- [11] 肖健, 文福栓. 混合发电权交易市场环境下的阻塞协调调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 44-48.  
XIAO Jian, WEN Fu-shuan. Coordinated congestion dispatching in a hybrid generation-rights trading market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 44-48.
- [12] 肖健, 杨爱民, 文福栓. 联营体与双边合同混合市场的阻塞协调调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 176-192.  
XIAO Jian, YANG Ai-min, WEN Fu-shuan. Coordinated congestion dispatch in combined pool/bilateral electricity markets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 176-192.
- [13] AI Dong-ping, BAO Hai, YANG Yi-han. Analysis of loss compensation on generation rights trade by circuit theory[C] // Power and Energy Eng Conf(APPEEC), 2010: 1-4.
- [14] 周明, 赵颖, 李庚银. 发电权交易对电网输电服务成本的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 134-138.  
ZHOU Ming, ZHAO Ying, LI Geng-yin. Impacts of generation rights transaction on transmission service cost[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 134-138.
- [15] 王楠, 张粒子, 赵新, 等. 发电权交易增量网损计算及分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 25-30.  
WANG Nan, ZHANG Li-zi, ZHAO Xin, et al. An incremental loss-calculation and allocation method for generation right trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 25-30.
- [16] Conejo A J, Galiana F, Kockar I. Z-bus loss allocation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 105-110.
- [17] Conejo A, Arroyo J, Guijarro A. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 571-576.
- [18] 张红燕, 袁荣湘, 崔雪. 改进的边际网损系数法及其应用研究[J]. 华中电力, 2010, 23(3): 75-78.  
ZHANG Hong-yan, YUAN Rong-xiang, CUI Xue. Research on improved marginal loss coefficient approach[J]. Central China Electric Power, 2010, 23(3): 75-78.
- [19] 徐耀良, 夏磊, 杨晓红, 等. 电力市场双边交易模式下应用边际网损系数法的网损分摊[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(1): 87-90.  
XU Yao-liang, XIA Lei, YANG Xiao-hong, et al. Loss allocation with the marginal loss coefficient method in bilateral trade model of power market[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(1): 87-90.
- [20] 黄泽荣, 彭建春, 肖文娟, 等. 基于耗散功率转归分量的网损微增率新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 31-36.  
HUANG Ze-rong, PENG Jian-chun, XIAO Wen-xian, et al. Incremental transmission loss algorithm based on the imputation of impedance-branch dissipation power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 31-36.
- [21] 李卫东, 魏立明, 孙辉, 等. 潮流追踪算法比较研究[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(7): 491-497.  
LI Wei-dong, WEI Li-ming, SUN Hui, et al. Research on comparison of power flow tracing methods[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(7): 491-497.
- [22] Unsuhay C, Saavedra O R. Transmission loss unbundling and allocation under pool electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 77-84.
- [23] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.  
BAO Hai, MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.
- [24] 颜丽, 鲍海. 基于电流分布的电网功率分布因子的计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 80-85.  
YAN Li, BAO Hai. Algorithm of power distribution factor based on current distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 80-85.
- [25] 王海霞, 刘娆, 李卫东. 基于电路理论和正交投影的支路损耗分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 114-120.  
WANG Hai-xia, LIU Rao, LI Wei-dong. Branch loss allocation based on circuit theories and orthogonal projection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 114-120.
- [26] Peng J C, Jiang H. Fair and analytical allocating of transmission losses using two-step coalitional game[C] // Proc IEEE Power Eng Soc General Meeting, 2004, 1(1): 186-191.
- [27] Peng J C, Jiang H, Song Y H. A weekly conditioned imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2124-2133.
- [28] Max Junqueira, Luiz Carlos da Costa, Jr Luiz Augusto Barroso, et al. An Aumann-Shapley approach to allocate transmission service cost among network users in electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1532-1546.
- [29] Molina Y P, Prada R B, Saavedra O R. Complex losses allocation to generators and loads based on circuit theory and Aumann-Shapley method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(4): 1928-1936.

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-08-20

作者简介:

王 峰(1983-), 女, 工程师, 从事电力系统分析及其自动化。E-mail: wangzhengncepu@163.com