

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.019

基于 Shapley 公理的耗散功率转归分量的网损分摊方法研究

郝晓弘¹, 方婉竹²

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对电力市场中市场成员公平、合理地分摊电网损耗的问题, 对电网损耗分摊方法进行了研究, 根据博弈论中的 Shapley 公理和 Shapley 值的理论, 推导出电网耗散功率转归分量的解析式, 并结合潮流追踪理论, 提出了一种基于耗散功率转归分量和潮流追踪相结合的损耗分摊新方法。先利用支路耗散功率转归分量理论, 将所有支路的耗散功率转归给等值电网中的节点电流源, 再运用潮流追踪理论, 将转归给节点电流源的损耗功率分摊给实际电网中的所有交易成员, 最后利用 IEEE4 节点系统对该方法进行了仿真计算。研究表明, 该方法不仅满足电路定律, 并计及有功和无功潮流的交叉耦合, 使电网中所有电源和负荷都参与了损耗分摊, 具有公平、合理、易于实现的特性。

关键词: 损耗分摊; Shapley 公理; 耗散功率转归分量; 潮流追踪

中图分类号: TM731

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)07-0976-06

Method of grid loss allocation using imputation components of dissipation power based on the Shapley axiom

HAO Xiao-hong¹, FANG Wan-zhu²

(1. Computer and Communication Engineering Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Electrical Engineering And Information Engineering Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the fair and reasonable apportionment of power loss problem to members in electricity market, the method of power loss allocation was researched. A new loss allocation method based on the theory of power flow tracing and imputation components of dissipation power was proposed, based on the Shapley axiom and Shapley value theory in game theory and the rigorous mathematical derivation. The imputation part of branch dissipation power to each current source node can be calculated by the theory of imputation components of dissipation power. And then, the loss of current source node was allocated to all members in actual power grid by using the theory of power flow tracing. Finally, the method was simulated in IEEE 4-bus system. The results indicate that the proposed method is demonstrated by the circuit laws, the interactions between active and reactive powers is also considered, and all the network losses could be allocated to all consumers and generators, which make power loss allocation fair and reasonable.

Key words: loss allocation; Shapley axiom; imputation components of dissipation power; power flow tracing

0 引 言

电网是电力传输的通道, 与发电、输电、配电、用电

等各利益主体之间均有联系, 在电能传输过程中, 由于线路存在电阻, 故必然带来损耗。虽然网损一般只有总发电量的 5% ~ 8% 左右, 但其总量却相当可观^[1-3]。

收稿日期: 2014-12-23

作者简介: 郝晓弘(1965-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量分析、先进控制理论方面的研究。E-mail: 936057270@qq.com

因此, 一个合理的网损分摊方法, 不仅能给投资者、用户提供良好的经济信号, 而且能确保电网的良好运行、以及最佳电源、负荷的接入位置。

目前, 国内外网损分摊方法很多, 其中包括平均网损分摊法、边际网损系数法、网损增量法、潮流跟踪法和 Z-BUS 法等几类^[4]。文献[5]提出了一种网损分摊模式, 主要面向输电元件, 并引入了电网运营机构规定系数, 将其作为一种改进的潮流追踪方法。该方法将有损网转化为无损网, 以少节点的有损系统进行仿真分析, 最终结果证明了该改进方法有实现过程简单、物理意义明确等优点, 对各种可进行潮流追踪的复杂电力系统均适用。文献[6-8]所涉及的方法均是对潮流追踪法的改进, 说明传统潮流追踪法的改进潜力很大。文献[9-10]所涉及的方法均是将电路定理中的叠加定理运用于网损分摊中, 得出电网中某一条支路的功率可分解为: 各个电流源引起的“功率分量”之和; 支路损耗功率可分解为: 各电源单独作用时电流分量共轭值, 与该支路电压降的乘积之和, 从而实现各电源分量损耗功率间的解耦, 得到各电源对支路损耗的贡献份额。文献[11]通过对两种潮流追踪方法优缺点的比较, 指出方法运用时注意的问题, 为电力市场交易提供一定的借鉴指导。文献[12]中, 将贡献因子理论应用在配网网损的分摊中, 使得网损分摊的结果更加公平、合理。文献[13]在跟踪电流的实部和虚部的基础上, 对引入分布式发电机后网损的变化进行了分摊研究。将 DG 接入前的网损分摊给工业、居民用户, 将 DG 接入后的网损分摊给各个分布式电源。文献[14]针对市场成员如何合理分摊配网网损的问题, 建立了基于逆流复功率跟踪的网损转移分布, 以及基于电流分解的交易功率传输的数学模型。最后根据支路功率贡献因子的大小向市场成员分摊网损。文献[15]在数学原理同胚映射、微元分析的基础上, 提出了一种主要针对网损交叉项的分摊方法。文献[16]利用有向图理论、幂序列的基本性质, 提出域的定义及算法, 结合交叉项问题提出基于有向图的网损分摊算法。从损耗分摊原理的角度出发, 文献[17-20]所涉及的方法均在不同程度上存在各自的弱点和条件限制。

文献[21]中, 从电路基本理论出发, 推导出一种基于耗散功率转归分量和戴维南模型的电网损耗分摊的算法。该法较准确地保证损耗分摊的结果与潮流计算结果一致, 确保“收支平衡”, 对减少、增加线路总发热功率的电源或负荷具有奖惩性, 对促进电网优化运行及发展有重要作用。但在进行损耗分摊时, 将电网

负荷等值为阻抗, 更改了节点阻抗矩阵, 使计算量随之变大。

因此, 本研究在借鉴文献[21]中提到的基于 Shapley 公理的耗散功率转归分量理论, 将这种理论与潮流追踪理论相结合, 提出一种改进的网损分摊方法, 这种方法能公平、公正地对待每个市场交易, 使网内所有电源、负荷均参与损耗分摊, 过程中还考虑到了无功功率对电网损耗的影响。通过在 IEEE4 节点系统下, 此方法和不同的网损分摊方法结果的对比分析, 可验证该方法的有效性、可行性, 使其更容易被市场成员理解和接受。

1 基于耗散功率分量和潮流追踪的网损分摊

1.1 基于 Shapley 公理的支路耗散功率转归模型

博弈论, 作为现代数学的一个分支, 主要研究 2 个或 2 个以上利益有冲突的个体, 在有相互作用的条件下, 如何进行各自优化决策的理论。对于有 n 人合作博弈模型的具体求解, 根据不同角度出发, 有核心解、核仁解和 Shapley 值。

Shapley 值法, 作为合作博弈中最有实用价值的方法之一, 被用来研究多人合作博弈的收益分配问题, 该方法的假设是全部局中人是理性人, 并且按照贡献和收益对等的原则, 根据各局中人给合作联盟带来的边际贡献, 来对联盟总收益进行合理分配, 使得集体理性与个体理性达到均衡。此法是基于一种概率的解释, 因此, 各局中人的收益分配值都衡量了其“平均”贡献。

Shapely 值是由 Shapley 公理而来的, 而 Shapley 公理是由美国学者 Shapley 提出的, 包括对称性、有效性和可加性共三方面^[22]内容, 具体来说, 对于特征函数为 v 的博弈, 局中人 i 的期望 $\Phi_i(v)$ 应满足以下 3 方面的内容:

(1) 对称性。每个局中人 i 的分配量跟局中人所处的位置无关, 设 π 为 i 的一个排列, 则:

$$\Phi_{\pi i}(\pi v) = \Phi_i(v) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: πv —重排后的特征函数; πi —重排序后, 原局中人 i 的新的位置编号。即当局中人的位置改变时, 局中人分配所得的份额不受影响。

(2) 有效性。每个局中人所获得的分配之和与总的分配量相等, 即:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i(v) = v(N) \quad (2)$$

(3) 可加性。每个局中人在两个博弈中分别获得的分配量之和,与他们在这两个和博弈中所获得的分配量相等。

$$\Phi(v+w) = \Phi(v) + \Phi(w) \quad (3)$$

式中: v, w —两个对策的特征函数; $v+w$ —同时实施两种对策时的特征函数,即若 n 个人同时进行两项合作时,每个人的分配份额是在两项合作中分配的份额之和。

满足上述 3 条公理的唯一函数 $\Phi_i(v)$,即 Shapley 值,具体由如下式所示:

$$\Phi_i(v) = \sum_{\pi} \frac{[v(S_{\pi}^i \cup \{i\}) - v(S_{\pi}^i)]}{n!} \quad (4)$$

式中:求和是对局中人 $1, 2, \dots, n$ 的所有排列 π 进行的; S_{π}^i —排列 π 中排在 i 之前的那些局中人所构成的联盟。

对于联盟中有 n 个局中人,且对于 $n \geq 2$ 的合作博弈来说,联盟 $S \subseteq (N \setminus \{i\})$ 的局中人的个数的取值范围是 $0, 1, 2, \dots, n-1$ 。可以再用以下的形式表示:

$$\Phi_i = \frac{0!(n-0-1)!}{n!} [v(\{i\}) - 0] + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{k!(n-k-1)!}{n!} \sum_{h=1}^m [v(S_{kh} \cup \{i\}) - v(S_{kh})] \quad (5)$$

式中: $S_{kh} (h=1, 2, \dots, m)$ — N 的非空子集; k —除去第 i^{th} 个局中人后的联盟成员个数;符号 m —子集 $S_{kh} \subseteq (N \setminus \{i\})$ 的个数。

电力市场为博弈论的应用提供了一个良好的应用平台。首先,各个市场参与者需要尽力运用博弈论使其在和他人的竞争中取得最大利益;其次,市场的监管机构要利用它来预测和判断在市场参与各方的“博弈”行为下,是否发生操纵市场、哄抬价格等不合理的现象。电能作为一种非常特殊的商品,以及电能交易形式的多样化,使得博弈论在电力市场中的应用研究具有很大的理论价值和实际意义。

在电力市场环境下,大量的电力交易同时依靠电网的转运功能来实现。在这个过程中,这些交易及交易之间的交互作用产生了系统总网损。也就是说,所有的电力交易共同使用了整个电网,它们之间构成了事实上的合作关系。因此,利用 Shapley 值把系统总网损分摊给各交易是合适的。

支路耗散功率转归,即如何将支路耗散功率转归给各个电源的问题。只有具备 Shapley 公理的 3 个条件^[22]的内容,即对称性、有效性和可加性,才能有效地解决支路耗散功率的转归问题:

(1) 网络内任意一条支路 l 的耗散功率转归给某

个电源 i 的分量,与其转归的计算顺序无关。

(2) 支路耗散功率转归给各个电源的分量总和,等于支路耗散功率总量。

(3) 一个电源输出的功率分成若干部分,支路耗散功率转归给这个电源的这些部分的分量之和,等于支路耗散功率直接转归给这个电源的分量。

由此可见,上述 3 个条件仅依赖于得到的转归结果。可得出结论:一个等值网络中,任意一条支路的耗散功率转归给某节点电源的部分,等于该节点电源单独激励时该支路的电流响应相量与该支路的总电流相量的点积,再乘以该支路的阻抗。

1.2 网损分摊模型

本研究的网损分摊模型是根据 Shapley 公理和 Shapley 值的理论,推导出电网耗散功率转归分量的解析式,并结合潮流追踪理论,提出的一种基于耗散功率转归分量和潮流追踪相结合的损耗分摊方法。

首先笔者根据支路耗散功率转归分量理论,将所有支路的耗散功率转归给等值电网中的节点电流源;然后运用潮流追踪中顺流追踪和逆流追踪的理论,将转归给节点电流源的损耗功率分摊给实际电网中的所有交易成员,即所有电源和负荷。具体模型分析如下:

根据电力系统分析理论,将所有电源、负荷都等值成节点电流源。设在一个电网中,存在 p 个电源、 q 个负荷,则:

k 节点电源的等效注入电流为:

$$I_{k_s} = (P_{k_s} - jQ_{k_s}) / U_k^* \quad (s=1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

k 节点负荷的等效注入电流为:

$$I_{k_d} = -(P_{k_d} - jQ_{k_d}) / U_k^* \quad (d=p+1, p+2, \dots, p+q) \quad (7)$$

k 节点的注入电流:

$$I_k = I_{k_s} + I_{k_d} \quad (8)$$

式中: $P_{k_s} + jQ_{k_s}$ — k 节点电源的注入功率; $-(P_{k_d} + jQ_{k_d})$ — k 节点负荷的注入功率; U_k — k 节点电压。

电流源决定着全网的电压,即:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $[U_1 \ U_2 \ \cdots \ U_n]^T$ —节点电压; Z 矩阵—电网阻抗矩阵; $[I_1 \ I_2 \ \cdots \ I_n]^T$ —电网节点注入电流。则:

$$U_k = \sum_{m=1}^n Z_{km} I_m \quad (10)$$

式中: Z_{km} — Z 矩阵的第 k 行, 第 m 列的元素。

因此, 电网中的支路 l 电流可表示为:

$$I_l = (U_i - U_j) / z_l = \sum_{k=1}^n \frac{(z_{ik} - z_{jk})}{z_l} I_k \quad (11)$$

式中: i, j —支路 l 的首尾节点编号; z_l —支路 l 的阻抗。

设 $I_k^l = (z_{ik} - z_{jk}) I_l / z_l = \alpha_{lk} I_k$ 则:

$$I_l = \sum_{k=1}^n I_k^l \quad (12)$$

式中: I_l —等值网络中, 通过支路 l 的总电流; I_k^l —等值电网中节点 k 的电流源单独作用下支路 l 上的电流响应。

根据 Shapley 值推导出的支路耗散功率转归理论, 可得到:

$$L_k^l = (I_k^l \cdot I^l) \times z_l = (\alpha_{lk} I_k \cdot I^l) \times z_l \quad (13)$$

其中: 支路 l 的耗散功率转归给节点电流源 k 的部分用 L_k^l 表示。

由于电网的直接用户是电源和负荷, 在进行上述分摊后, 还要将电网损耗在电源和负荷之间进行合理的分配, 以便确定各个电源对负荷功率的供电情况。

在此, 根据的潮流追踪理论, 分两种情况对等值电网中支路耗散功率转归给节点电流源的网损进行分摊。

(1) 当节点处既有电源又有负荷, 或者只有电源时。

首先, 确定一个比例系数 α , 该系数 α 由电源与负荷依据协商机制确定, 介于 $0 \sim 1$ 之间。其次, 在各个电源与其所供电的所有负荷之间按该比例分摊电网损耗:

$$L_{Ck}^l = \alpha L_k^l \quad (14)$$

$$L_{Ck}^l = (1 - \alpha) L_k^l \quad (15)$$

式中: L_{Ck}^l —分摊给电源 k 的网损, L_k^l —分摊给电源 k 供电的所有负荷, 比例系数一般取 $\alpha = 0.5$:

接着确认各个电源都给哪些负荷供电, 并且供多少。根据潮流追踪理论中的顺流追踪, 确定 L_{Ck}^l 由哪些负荷承担:

$$L_{Ck}^l = \frac{L_{Ck}^l}{P_k} \sum_{i=1}^n [A_d]_{ki}^{-1} P_{Li} \quad (16)$$

式中: $A_{d(ki)}$ = $\begin{cases} 1 & k = i \\ -\frac{|P_{i-k}|}{P_i} & i \in \alpha_k^{(d)} \text{—顺流分配矩阵,} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\alpha_k^{(d)}$ —以节点 k 为输入的一组节点; P_k —节点 k 的注入功率; P_{Li} —负荷节点功率。

(2) 当节点只有负荷时。

将 α 份额的网损分配给此节点负荷, 剩余的 $(1 - \alpha)$ 份额的负荷网损根据潮流追踪理论中的逆流追踪, 分配给电源, 以此确定这 $(1 - \alpha)$ 份额的网损由电源提供多少。则:

$$L_{Ck}^l = \alpha L_k^l \quad (17)$$

$$L_{Ck}^l = (1 - \alpha) L_k^l \quad (18)$$

式中: L_{Ck}^l —分摊给负荷 k 的网损。

接着确定 $(1 - \alpha)$ 份额的负荷网损是由哪些电源提供, 各供多少。根据潮流追踪理论中的逆流追踪, 确定 L_{Ck}^l 由哪些电源提供:

$$L_{Ck}^l = \frac{L_{Ck}^l}{P_k} \sum_{h=1}^n [A_u]_{kh}^{-1} P_{Ch} \quad (19)$$

其中: $A_{u(kh)}$ —逆流分配矩阵, $A_{u(kh)} = \begin{cases} 1 & k = h \\ -\frac{|P_{h-k}|}{P_h} & h \in \alpha_k^{(u)}; \alpha_k^{(u)} \text{—直接流向节点 } k \text{ 的一组节点;} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

点; P_h —节点 h 的注入功率; P_{Ch} —电源节点功率。

2 算例与分析

本研究用 Matlab 编写基于耗散功率分量和潮流追踪相结合的网损分摊法的计算程序。以节点 IEEE4 节点系统为模型(如图 1 所示), 笔者用平均网损分摊法, 双向分摊模式的潮流追踪法, 以及本研究中提出的方法对系统进行算例分析。由潮流计算结果可知, 系统的有功损耗为 4.81 MW, 无功损耗为 24.05 MVar。取比例系数 $\alpha = 0.5$, 则算例结果如表 (1~5) 所示。

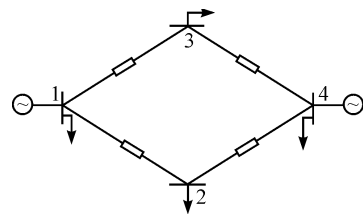


图 1 IEEE4 节点系统

表 1 3 种网损分摊方法的比较(有功损耗)

节点	平均网损 分摊法/MW	双向分摊模式的 潮流追踪法/MW	本研究的 方法/MW
1	1.13	0.63	0.65
2	0.81	0.97	0.83
3	0.96	1.44	1.26
4	1.91	1.78	2.08
总计	4.81	4.82	4.82

通过上述数据,由表 1 可知,平均分摊法的分摊结果相对稳定,不会产生意外波动;但是忽略了节点位置的不同对电网潮流分布的影响,因此,分摊结果将会存在交叉补贴现象,不能提供良好的经济激励信号。

双向分摊模式的潮流追踪法实现过程相对简单、有明确的物理意义,消除了逆流(顺流)追踪法中发电机(负荷)对负荷(发电机)的网损费用补贴。

本研究中提到的方法弥补了平均分摊法不足、利用了双向分摊模式的潮流追踪法的优势,使得该方法满足电网的物理特性,为市场参与者提供有效的经济激励信号。该方法的分摊结果计及了电网用户的电气位置和注入功率的大小;确保了“收支平衡”,避免了网损分摊中的交叉项的问题。

表 2、表 3 的数据体现了各支路有功损耗和无功损耗的分摊。

表 2 各支路有功损耗的分摊

支路	节点 1/MW	节点 2/MW	节点 3/MW	节点 4/MW
1-2	0.30	0.38	-0.21	-0.23
1-3	0.55	-0.23	0.84	-0.15
2-4	-0.24	0.94	-0.18	1.25
3-4	-0.33	-0.41	1.22	1.34
总计	0.26	0.68	1.67	2.21

表 3 各支路无功损耗的分摊

支路	节点 1/Mvar	节点 2/Mvar	节点 3/Mvar	节点 4/Mvar
1-2	1.51	1.92	-1.06	-1.16
1-3	2.76	-1.16	4.21	-0.75
2-4	-1.24	4.75	-1.02	6.26
3-4	-1.63	-2.10	6.11	6.71
总计	1.40	3.41	8.24	11.06

表 2 和表 3 的数据是根据支路耗散功率转归理论得出的,也就是将每个支路的耗散功率转归给等值电网中的节点电流源,即各个等值电流源应分摊的总的支路损耗。表中,有的分摊结果为负,这表示该节点引起全网总损耗减小,结果的正负具有奖惩性的经济特征。总体来说,节点 4 所分摊的损耗比节点 1 分摊的损耗多,这是因为它引发的支路电流大,即对支路使用程度高,可见,计算结果与实际情况相符。

接下来笔者运用上述网损分摊模型中的潮流追踪理论,确定损耗在电源和负荷之间的分配,从而得出系统电源和负荷分摊的网损如表 4、表 5 所示。

表 4 基于耗散功率分量和潮流追踪的网损分摊法(有功损耗)

电源 1 /MW	负荷 1 /MW	负荷 2 /MW	负荷 3 /MW	电源 4 /MW	负荷 4 /MW	总计 /MW
0.60	0.05	0.83	1.26	1.80	0.28	4.82
0.65	0.83	1.26	20.8			

表 5 基于耗散功率分量和潮流追踪的网损分摊法(无功损耗)

电源 1 /Mvar	负荷 1 /Mvar	负荷 2 /Mvar	负荷 3 /Mvar	电源 4 /Mvar	负荷 4 /Mvar	总计 /Mvar
3.04	0.19	4.15	6.33	9.01	1.39	24.11
3.23	4.15	6.33	10.40			

表 2 和表 3 反映了包括平衡节点在内的所有电源和负荷都平等地参与了损耗分摊。在分摊过程中,可以明确地判断出每个负荷是由哪些发电机提供功率,分别提供了多少;以及每个发电机的功率流向了哪些负荷。因此,该方法的分摊结果更加公正、合理。

3 结束语

基于 Shapley 公理理论,本研究将耗散功率转归分量理论与潮流追踪理论相结合,提出了一种电网损耗分摊的算法,以 IEEE4 节点为模型,将该方法结果与平均网损分摊法,双向分摊模式的潮流追踪法分摊结果进行对比分析,证明该方法在满足电路定律的基础上,完整考虑了 P-Q 间交叉作用对损耗分摊的影响,同时该法适用于任意结构的输电网和配电网。

其中,针对配电网线路中电压等级过小、线路的充电功率忽略不计,导致其节点导纳矩阵不可逆的问题,文献[23]已提出解决方案,即只对而且必须只对无接地支路的电源和负荷节点做电纳摄动、其余节点不做电纳摄动,所得改造后的配电网全节点导纳矩阵为可逆。因此,该分摊方法同样适用于配电网。

此外,该方法也使网内所有电源和负荷都参与损耗分摊,保证了损耗分摊的公平、合理性。

参考文献(References):

[1] 刘梓,程浩忠,刘晓东,等. 电力市场网损分摊方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(7): 70-76.
 [2] 杨极,邓武军,郭永涛,等. 电力市场下网损分摊策略综述[J]. 四川电力技术, 2005(3): 48-51.
 [3] 张诗滔,顾明宏,李扬. 考虑网损分摊的潮流跟踪方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 89-93.

- [4] 伍 艳, 张立辉. 网损分摊方法研究[J]. 电气开关, 2012 (6): 65-68.
- [5] 文跃秀, 韩宝民, 邱 惠, 等. 基于改进潮流追踪法的网损分摊方法研究[J]. 电网技术, 2013(1): 37-41.
- [6] 郑 文, 徐政勋, 张伟民. 基于潮流跟踪的网损分摊新方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(3): 16-19.
- [7] 孙 峰, 白雪, 范 维, 等. 基于潮流追踪的东北电网过网损失分摊研究[J]. 东北电力技术, 2013(12): 1-5.
- [8] 王金喜, 闫丽梅, 张 江. 基于改进的潮流跟踪算法的网损分摊方法研究及应用[D]. 东北: 东北石油大学电气信息工程学院, 2013.
- [9] 王 勋. 基于电路叠加定理的网损分摊模型研究[J]. 科技风, 2012(8): 23-25.
- [10] 王 峥, 刘创华, 魏 珍, 等. 基于叠加定理和 Aumann-Shapley 法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 13-22.
- [11] 文跃秀, 黄 瑞, 闵向东, 等. 基于网损分摊的两种潮流追踪法对比研究[J]. 电力经济研究, 2012(3): 47-51.
- [12] 张俊芳, 吴军基, 杨 超, 等. 配电网网损分摊的应用研究[J]. 电力需求侧管理, 2004, 6(4): 21-23.
- [13] 王义贺, 栗 然, 胡 博, 等. 含分布式发电的配电网网损分摊方法研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2013.
- [14] 叶 华, 杜松怀, 黄振伟, 等. 配电网开放市场环境下配电网网损分摊方法研究[C]. 北京: 中国农业工程学会, 2007.
- [15] 胡福年, 刘亚军, 胥 璐. 基于同胚映射和微元分析的网损交叉项分摊方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 96-102.
- [16] 胡福年, 刘亚军, 胥 璐. 基于有向图的网损分摊机理分析与建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 40-46.
- [17] 吴晓蓉, 谢开贵, 周家启. 基于电流实部与虚部双向追踪的输电设备利用份额模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 12-17.
- [18] MUTALE J, STRBAC G, CURCIC S, et al. Allocation of losses in distribution systems with embedded generation [J]. **IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, 2000, 147(1): 7-14.
- [19] COSTA P M, MATOS M A. Loss allocation in distribution networks with embedded generation [J]. **IEEE Trans on Power Systems**, 2004, 19(1): 384-389.
- [20] GOMEZ EXPOSITO A, RIQUELME SANTOS J M, GONZALEZ GARCIA T, et al. Fair allocation of transmission power losses [J]. **IEEE Trans on Power Systems**, 2000, 15(1): 184-188.
- [21] 彭建春, 曲桂颖. 运用耗散转归分量的电网损耗分摊方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 8-12.
- [22] THOMAS L C. Games Theory and Applications [M]. Tianjin: Jiefangjun Press, 1988.
- [23] 江 辉, 周有庆, 彭建春, 等. 基于节点电纳摄动的通用配电网损耗分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 42-48.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

郝晓弘, 方婉竹. 基于 Shapley 公理的耗散功率转归分量的网损分摊方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7): 976-981.

HAO Xiao-hong, FANG Wan-zhu. Method of grid loss allocation using imputation components of dissipation power based on the Shapley axiom [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(7): 976-981. **《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>**