

多种交易模式下的一种网损分摊方法

李秀琴¹, 李晓磊², 彭茂君³, 宋家骅³

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2 中国电力科学研究院, 北京 100085;

3 东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对在多种交易模式 (联营体交易、双边交易、多边交易) 共存的电力市场中, 如何公平合理地分摊输电电网的网损这一问题, 给出了一种网损分摊方法。即以电流分解为基础, 用电流表示交易, 按网损分量分摊法将网损先分摊到交易, 然后再对联营体交易 (或多边交易) 进一步分摊到参与该交易的发电机和负荷, 每个输电设备追溯的网损成本一半分配给用它的发电机, 一半分配给由它送电的负荷。通过对 5 节点系统进行算例分析, 验证了该方法的正确性和合理性。

关键词: 电力市场; 多种交易模式共存; 网损分量分摊法; 电流分解

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2006) 01-0039-07

0 引言

在电力市场中, 输电网的损耗虽只占全部输电成本较小的一部分, 但对具体的交易和电网用户却可能有很大的影响^[1], 如何对其进行公平合理地分摊及成本追溯已是电力市场中需要解决的重要问题之一。目前, 有许多方法可用于网损的分摊, 主要有邮票法、合同路径法、Mw - mile 法、边际网损系数法、复功率潮流追踪法、电流追踪法、网损增量法以及基于阻抗矩阵的网损分摊方法等, 每种方法都有其特点。然而, 对于在多种交易模式 (联营体交易、双边交易、多边交易) 共存的电力市场中, 如何公平合理地分摊输电电网的网损, 这一问题目前还未很好解决。文献 [2] 提出的方法可用于多种交易模式共存的电力市场中的网损分摊, 但随着交易个数的增加, 该方法的计算量将呈指数级增长, 特别是对交易比较多的系统, 计算量将十分巨大。

本文给出了一种在多种交易模式共存的电力市场中分摊网损的方法——“网损分量分摊法”。该方法以电流分解为基础, 用电流表示交易, 按网损分量分摊法将网损先分摊到交易, 对于双边交易, 仅分摊到交易, 至于交易方如何进一步分摊可以采用谈判的方法确定追溯的网损成本。再对多边交易和联营体交易进一步分摊到参与该交易的发电机和负荷。

1 网损分量分摊法

1.1 支路模型

线路输送功率时会产生网损, 它是由线路中所

传输的有功功率、无功功率及线路充电功率所导致的, 也可以说是由线路支路复电流的实部和虚部及两端对地电容电流的实部和虚部共同作用产生的。图 1 为任一电网支路 l (或 $I - J$), 串联等值阻抗为 $r_l + jx_l$, 两端充电电容电纳为 $jb_l/2$, 有功和无功功率正方向从节点 I 流向节点 J , 各电源通过其它支路或直接经节点 I 向支路 l 供给复功率。

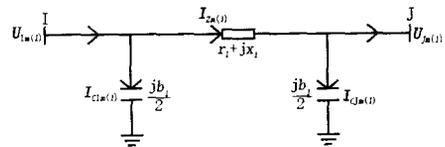


图 1 支路 l 的支路电流、两侧对地电容电流

Fig 1 Branch line l current and its capacitive currents of both sides to earth

设电源 m 贡献给支路 l 的支路电流分量为 $I_{Zm(l)} = I_{Zm(l)r} + jI_{Zm(l)x}$, 贡献给支路 l 的 I 侧对地电容电流为 $I_{Cln(l)} = I_{Cln(l)r} + jI_{Cln(l)x}$, 贡献给支路 l 的 J 侧对地电容电流为 $I_{CJm(l)} = I_{CJm(l)r} + jI_{CJm(l)x}$ (注: $I_{Cln(l)} = U_{In(l)} jb_l/2$, $U_{In(l)}$ 为电源 m 单独作用时支路 l 侧的节点电压; $I_{CJm(l)} = U_{Jm(l)} jb_l/2$, $U_{Jm(l)}$ 为电源 m 单独作用时支路 l 侧的节点电压)。

支路 l 的支路电流、两侧对地电容电流含义见图 1。

则流入支路 l 的总支路复电流为:

$$I_{Z(l)} = I_{Z(l)r} + jI_{Z(l)x} = \sum_{m=1}^n I_{Zm} = \sum_{m=1}^n I_{Zm(l)r} + j \sum_{m=1}^n I_{Zm(l)x}$$

流入支路 l 的 I 侧总的对地电容电流为:

$$I_{C_{l(l)}} = I_{C_{l(l)r}} + jI_{C_{l(l)x}} = \sum_{m=1}^n I_{C_{lm}} = \sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)r}} + j \sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)x}}$$

流入支路 l 的 J 侧总的对地电容电流为:

$$I_{C_{l(l)}} = I_{C_{l(l)r}} + jI_{C_{l(l)x}} = \sum_{m=1}^n I_{C_{lm}} = \sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)r}} + j \sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)x}}$$

式中 n 为电网中电源的总个数。

1.2 分摊方法

支路 l 串联等值阻抗上的总有功损耗 $L_{z(l)}^p$ 和无功损耗 $L_{z(l)}^q$ 分别为:

$$L_{z(l)}^p = r_l \left(\sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)r}} \right)^2 + r_l \left(\sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)x}} \right)^2 = r_l (I_{Z_{1(l)r}} + I_{Z_{2(l)r}} + \dots + I_{Z_{n(l)r}}) \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)r}} + r_l (I_{Z_{1(l)x}} + I_{Z_{2(l)x}} + \dots + I_{Z_{n(l)x}}) \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)x}}$$

$$L_{z(l)}^q = x_l \left(\sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)r}} \right)^2 + x_l \left(\sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)x}} \right)^2 = x_l (I_{Z_{1(l)r}} + I_{Z_{2(l)r}} + \dots + I_{Z_{n(l)r}}) \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)r}} + x_l (I_{Z_{1(l)x}} + I_{Z_{2(l)x}} + \dots + I_{Z_{n(l)x}}) \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)x}}$$

可见,支路 l 串联等值阻抗上的总有功损耗可看成由复电流实部引起的损耗部分和复电流虚部引起的损耗部分两项组成;总无功损耗也可看成由复电流实部引起的损耗部分和复电流虚部引起的损耗部分两项组成。基于该出发点,本文给出支路 l 串联等值阻抗上的损耗分摊原则如下:电源 m 在支路 l 串联等值阻抗中引起的有功损耗分量 $L_{zm(l)}^p$ (或无功损耗分量 $L_{zm(l)}^q$) 在总支路复电流实部引起的总有功损耗 (或无功损耗) 中所占的份额与该电源向支路提供的支路复电流实部分量成正比,在总支路复电流虚部引起的总有功损耗 (或无功损耗) 中所占的份额与该电源向支路提供的支路复电流虚部分量成正比。即:

$$L_{zm(l)}^p = \frac{I_{Z_{m(l)r}}}{\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}}} \left(\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}} \right)^2 r_l + \frac{I_{Z_{m(l)x}}}{\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}}} \left(\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}} \right)^2 r_l$$

$$L_{zm(l)}^q = \frac{I_{Z_{m(l)r}}}{\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}}} \left(\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}} \right)^2 x_l + \frac{I_{Z_{m(l)x}}}{\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}}} \left(\sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}} \right)^2 x_l$$

整理以上两式得:

$$L_{zm(l)}^p = r_l [I_{Z_{m(l)r}} \sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}} + I_{Z_{m(l)x}} \sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}}]$$

$$L_{zm(l)}^q = x_l [I_{Z_{m(l)r}} \sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)r}} + I_{Z_{m(l)x}} \sum_{h=1}^n I_{Z_{h(l)x}}]$$

支路 l 侧对地电容支路上的总有功损耗为 0 , 总无功损耗

$$L_{C_{l(l)}}^q = [\left(\sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)r}} \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)x}} \right)^2] / j(b_l/2)$$

支路 l J 侧对地电容支路上的总有功损耗为 0 , 总无功损耗

$$L_{C_{l(l)}}^q = [\left(\sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)r}} \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^n I_{C_{lm(l)x}} \right)^2] / j(b_l/2)$$

同支路 l 串联等值阻抗的分摊原则,电源 m 在支路 l 侧 (或 J 侧) 对地电容支路上引起的无功损耗分量 $L_{C_{lm(l)}}^q$ (或 $L_{C_{lm(l)}}^q$) 在 l 侧 (或 J 侧) 总对地电容电流实部引起的总无功损耗中所占的份额与该电源向 l 侧 (或 J 侧) 对地电容支路提供的 l 侧 (或 J 侧) 对地电容电流实部分量成正比,在 l 侧 (或 J 侧) 总对地电容电流虚部引起的总无功损耗中所占的份额与该电源向 l 侧 (或 J 侧) 对地电容支路提供的 l 侧 (或 J 侧) 对地电容电流虚部分量成正比。即:

$$L_{C_{lm(l)}}^q = 1 / (jb_l/2) [I_{C_{lm(l)r}} \sum_{h=1}^n I_{C_{lh(l)r}} +$$

$$I_{C_{lm(l)x}} \sum_{h=1}^n I_{C_{lh(l)x}}]$$

$$L_{C_{lm(l)}}^q = 1 / (jb_l/2) [I_{C_{lm(l)r}} \sum_{h=1}^n I_{C_{lh(l)r}} +$$

$$I_{C_{lm(l)x}} \sum_{h=1}^n I_{C_{lh(l)x}}]$$

故电源 m 在支路 l 上的网损分摊原则如下:分摊的有功损耗分量 $L_m^p(l) = L_{zm(l)}^p$ 即:

$$L_m^p(l) = r_l [I_{Z_{m(l)r}} \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)r}} + I_{Z_{m(l)x}} \sum_{m=1}^n I_{Z_{m(l)x}}]$$

分摊的无功损耗分量 $L_m^q(l)$ 为在支路等值阻抗上分摊无功损耗、在 l 侧对地电容电流支路分摊无功损耗和在 l 侧对地电容电流支路分摊无功损耗三分量之和,所以本分摊方法称为网损分量分摊法。

$$L_{m(l)}^a = x_l [L_{2m(l)r} \sum_{h=1}^n L_{zh(l)r} + L_{2m(l)x} \sum_{h=1}^n L_{zh(l)x}] +$$

$$1 / (jb_l / 2) [L_{3m(l)r} \sum_{h=1}^n L_{3h(l)r} + L_{3m(l)x} \sum_{h=1}^n L_{3h(l)x}] +$$

$$1 / (jb_l / 2) [L_{3m(l)r} \sum_{h=1}^n L_{3h(l)r} + L_{3m(l)x} \sum_{h=1}^n L_{3h(l)x}]$$

2 网损在电能交易间的分摊

n 节点电力系统 s 有 m 个电源, k 个负荷, b 条支路 (如图 2 所示)。



图 2 系统 s 结构简图

Fig 2 Simplified circuit of system s

为阐述清晰,假设在某段时间内,该系统中仅存在一个双边交易和一个联营体交易 (若同时存在多个双边交易,同样适用)。负荷 1 和发电机 1 间为一双边交易,其贸易额占负荷 1 功率的 α %,称为交易 1,其中发电机 1 位于母线 1,负荷 1 位于母线 x ; 发电机 1~发电机 m 与负荷 1~负荷 k 间为一联营体交易,称为交易 2 (发电机 1 既参与双边交易,又参与联营体交易,负荷 1 的其余功率由联营体交易提供)。

先对该系统进行正规的潮流计算。其中 $S_{G1} \sim S_{Gm}$ 为各发电机的输入功率, $U_{G1} \sim U_{Gm}$ 为各发电机处的节点电压, $S_{L1} \sim S_{Lk}$ 为各负荷的输出功率, $U_{L1} \sim U_{Lk}$ 为各负荷处的节点电压。

为应用网损分量分摊法分摊网损,再对系统中各个负荷进行处理,将每个负荷等效成流出的独立电流源,即

$$I_{Li} = (S_{Li} / U_{Li})^* \quad (i=1, \dots, k) \quad (1)$$

然后对各个发电机进行处理,将每个发电机等效成注入的独立电流源,即

$$I_{Gi} = (S_{Gi} / U_{Gi})^* \quad (i=1, \dots, m) \quad (2)$$

经处理后的系统如图 3 所示。

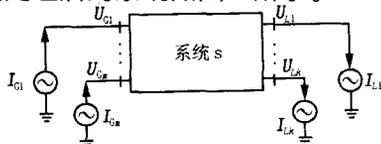


图 3 发电机和负荷等值为独立电流源

Fig 3 Generators and loads equalized by independent current sources

然后用电流表示交易,将图 3 系统中电流源分为两组 (有几个交易就分为几组),见图 4 (a)和图 4 (b)。第一组电流源 I_1 单独作用代表交易 1 (图 4 (a)所示),第二组电流源 I_2 单独作用代表交易 2 (图 4 (b)所示)。 I_1 和 I_2 均包含 n 个分量,每个分量对应于各自交易中各节点的发电机等效注入电流源或负荷等效注入电流源 (负荷等效流出电流源作为负的等效注入电流源),或两者的叠加。其中, $I_1 = [\alpha \times 10^{-2} I_{L1}, 0, 0, \dots, - (1 - \alpha) \times 10^{-2} I_{L1}, 0, \dots, 0]$, I_1 的第一个分量为 $\alpha \times 10^{-2} I_{L1}$ (对应发电机 1,对于既参与双边交易又参与联营体交易的发电机,其在双边交易中的等效注入电流等于该双边交易中的负荷等效流出电流),第 x 个分量为 $- (1 - \alpha) \times 10^{-2} I_{L1}$ (对应负荷 1),其余分量均等于 0。 I_2 的第一个分量为 $I_{G1} - \alpha \times 10^{-2} I_{L1}$ (对应发电机 1);第 x 个分量为 $- (1 - \alpha) \times 10^{-2} I_{L1}$ (对应负荷 1);其余分量如对应发电机节点则为 I_{Gi} ($i \in \{2, 3, \dots, m\}$),对应负荷节点则为 $- I_{Li}$ ($i \in \{2, 3, \dots, k\}$),对既有发电机又有负荷的节点则为 $I_{Gi} - I_{Li}$ ($i \in \{2, 3, \dots, k\}$)。 $- I_{Li}$ 和 I_{Gi} 由公式 (1) 和 (2) 计算而得。

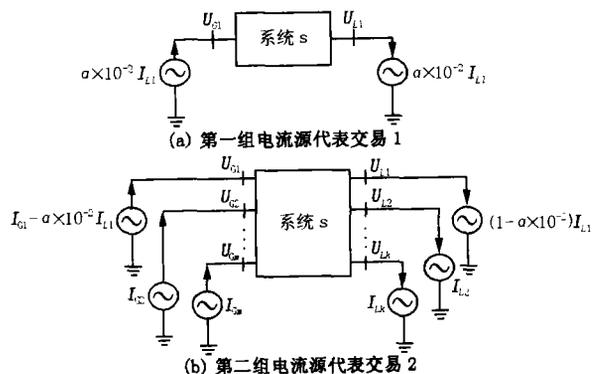


图 4 用电流表示交易

Fig 4 Transactions described by current sources

系统 s 支路 l 的串联等值阻抗为 $r_l + jx_l$, 两端充电电容纳为 $jb_l / 2$ 。交易 1 (即第一组电流源) 单独作用时,支路 l 的支路电流为 $I_{21(l)} = I_{21(l)r} + jI_{21(l)x}$, I 侧对地电容电流为 $I_{C11(l)} = I_{C11(l)r} + jI_{C11(l)x}$ 。交易 2 (即第二组电流源) 单独作用时,支路 l 的支路电流为 $I_{22(l)} = I_{22(l)r} + jI_{22(l)x}$, I 侧对地电容电流为 $I_{C2(l)} = I_{C2(l)r} + jI_{C2(l)x}$ 。

则交易 1 在支路 l 分摊的有功损耗为:

$$L_{1(l)}^p = r_l [I_{21(l)r} \sum_{i=1}^2 I_{2i(l)r} + I_{21(l)x} \sum_{i=1}^2 I_{2i(l)x}]$$

无功损耗为:

$$L_{1(l)}^q = x_l [L_{21(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)r} + L_{21(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)x}] +$$

$$1 / (j b_l / 2) [L_{2(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)r} + L_{2(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)x}] +$$

$$1 / (j b_l / 2) [L_{31(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{3i(l)r} + L_{31(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{3i(l)x}]$$

则交易 2 在支路 l 分摊的有功损耗为:

$$L_{2(l)}^p = r_l [L_{22(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)r} + L_{22(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)x}]$$

无功损耗为:

$$L_{2(l)}^q = x_l [L_{22(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)r} + L_{22(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)x}] +$$

$$1 / (j b_l / 2) [L_{2(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)r} +$$

$$L_{2(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{2i(l)x}] +$$

$$1 / (j b_l / 2) [L_{32(l)r} \sum_{i=1}^2 L_{3i(l)r} +$$

$$L_{32(l)x} \sum_{i=1}^2 L_{3i(l)x}]$$

追溯的网损成本一般指由有功网损引起的成本,所以如在某一时段内,给定输电系统中各条支路的有功网损单价 $C = [C_1, C_2, \dots, C_b]$,则交易 1 应分摊的网损成本 C_{loss1} 为:

$$C_{\text{loss1}} = \sum_{l=1}^b C_l L_{1(l)}^p$$

则交易 2 应分摊的网损成本 C_{loss2} 为:

$$C_{\text{loss2}} = \sum_{l=1}^b C_l L_{2(l)}^p$$

3 网损在多边交易或联营体交易内部的进一步分摊

按网损分量分摊法,可用于将由上节所述方法确定的每个交易应该承担的网损进一步分摊到各个交易的参与者。由于发电机和电力用户共同使用电力网,所以本文将每个输电设备追溯的网损成本一半分配给用它的发电机,另一半分配给由它送电的负荷。算法以上文交易 2 为例进行说明。

3.1 将网损分摊给发电机

将交易 2(图 4(b))中各个负荷等效电流源进行处理,将每个电流源等效成负荷阻抗,即

$$Y_{Li} = I_{Li} / U_{2j}, \quad Z_{Li} = 1 / Y_{Li} \quad (i=2, \dots, k, j=n)$$

而对于交易 2 中的负荷 1,

$$Y_{L1} = (1 - \alpha \times 10^{-2}) \cdot I_{L1} / U_{21}$$

其中 $U_2 = [U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2j}, \dots, U_{2n}]$, 为交易 2 中电流源(即第二组电流源)单独作用时各节点的母线电压,设第 i 个负荷对应的系统网络节点号为 $j(j=2, \dots, n)$ 。

处理后交易 2 如图 5 所示,共有 m 个电流源。

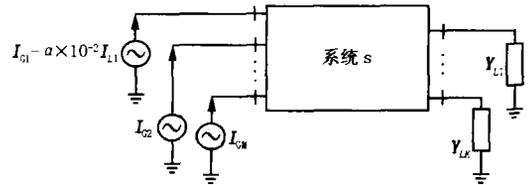


图 5 交易 2 中负荷等值成负荷阻抗

Fig 5 Loads equalized by impedance in transaction 2

将图 5 系统中电流源分为 m 组,每一组电流源 $I_i (i=1, 2, \dots, m)$ 代表一台发电机单独作用。

当 $i=1$ 时, $I_i = [I_{G1} - \alpha \times 10^{-2} I_{L1}, 0, \dots, 0]$, 第 1 个分量为 $I_{G1} - \alpha \times 10^{-2} I_{L1}$, 其余 $n-1$ 个分量均为 0。

当 $i=2, 3, \dots, m$ 时, 设第 i 台发电机对应的系统网络节点号为 $j(j=2, \dots, n)$, 则 $I_i = [0, \dots, 0, I_{Gi}, 0, \dots, 0]$, 第 j 个分量为 I_{Gi} , 其余 $n-1$ 个分量均为 0。

交易 2 中第 i 台发电机单独作用时,系统 s 支路 l 的支路电流为 $I_{Zfdi(l)} = I_{Zfdi(l)r} + j I_{Zfdi(l)x}$, I 侧对地电容电流为 $I_{Cfdi(l)} = I_{Cfdi(l)r} + j I_{Cfdi(l)x}$, J 侧对地电容电流为 $I_{Cfdi(l)} = I_{Cfdi(l)r} + j I_{Cfdi(l)x}$ 。

则交易 2 中第 i 台发电机在支路 l 分摊的有功损耗为:

$$L_{fdi(l)}^p = r_l [I_{Zfdi(l)r} (I_{1(l)r} + I_{2(l)r}) + I_{Zfdi(l)x} (I_{1(l)x} + I_{2(l)x})]$$

无功损耗为:

$$L_{fdi(l)}^q = x_l [I_{Zfdi(l)r} (I_{21(l)r} + I_{22(l)r}) + I_{Zfdi(l)x} (I_{21(l)x} + I_{22(l)x})] + 1 / (j b_l / 2) [I_{Cfdi(l)r} (I_{2(l)r} + I_{3(l)r}) + I_{Cfdi(l)x} (I_{2(l)x} + I_{3(l)x})] + 1 / (j b_l / 2) [I_{Cfdi(l)r} (I_{31(l)r} + I_{32(l)r}) + I_{Cfdi(l)x} (I_{31(l)x} + I_{32(l)x})]$$

交易 2 中第 i 台发电机应分摊的网损成本 $C_{\text{fdloss}i}$ 为:

$$C_{\text{fdloss}i} = \sum_{l=1}^b 0.5 C_l L_{fdi(l)}^p$$

上式中系数 0.5 表示发电机 i 承担其引起网损成本的一半。

3.2 将网损分摊给负荷

将交易 2(图 4(b))中各个发电机等效电流源进行处理,将每个电流源等效为负阻抗,即

$$Y_{Gi} = -I_{Gi} / U_{2j}, Z_{Gi} = 1 / Y_{Gi} \quad (i=2, 3, \dots, m; j=1, \dots, n)$$

U_2 的含义同 3.1 节, 设第 i 台发电机对应的系统网络节点号为 j ($j=1, \dots, n$)。

而对于交易 2 中的发电机 1, 其

$$Y_{G1} = \frac{I_{G1} - \alpha \times 10^{-2} I_{L1}}{U_{21}}$$

再将各负荷等效电流源作为负的注入电流源, 处理后交易 2 如图 6 所示, 共有 k 个电流源。

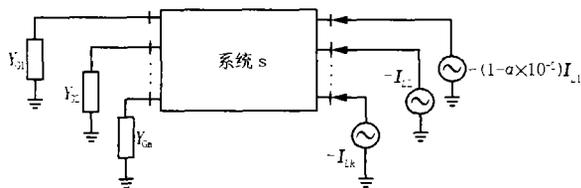


图 6 交易 2 中发电机等值成负阻抗

Fig 6 Generators equalized by negative impedance in transaction 2

将图 6 系统中电流源分为 k 组, 每一组电流源 I_i ($i=1, 2, \dots, k$) 单独作用代表仅为第 i 个负荷提供服务。

当 $i=1$ 时, 由于前文设负荷 1 位于母线 x , 则 $I_i = [0, \dots, -(1 - \alpha \times 10^{-2}) I_{L1}, 0, \dots, 0]$, 第 x 个分量为 $-(1 - \alpha \times 10^{-2}) I_{L1}$, 其余 $n-1$ 个分量均为 0。

当 $i=2, 3, \dots, k$ 时, 设第 i 个负荷对应的系统网络节点号为 j ($j=1, \dots, n$), 则 $I_i = [0, \dots, 0, -I_{Lj}, 0, \dots, 0]$, 第 j 个分量为 $-I_{Lj}$, 其余 $n-1$ 个分量均为 0。

交易 2 中仅为第 i 个负荷提供服务时, 系统 s 各支路的支路电流为 $I_{Z_{fhi}(l)} = I_{Z_{fhi}(l)r} + jI_{Z_{fhi}(l)x}$, 侧对地电容电流为 $I_{C_{fhi}(l)} = I_{C_{fhi}(l)r} + jI_{C_{fhi}(l)x}$, 侧对地电容电流为 $I_{C_{fhi}(l)} = I_{C_{fhi}(l)r} + jI_{C_{fhi}(l)x}$ 。则交易 2 中仅为第 i 个负荷提供服务时, 在支路 l 分摊的有功损耗为:

$$L_{fhi}^p = r_l [I_{Z_{fhi}(l)r} (I_{Z1(l)r} + I_{Z2(l)r}) + I_{Z_{fhi}(l)x} (I_{Z1(l)x} + I_{Z2(l)x})]$$

无功损耗为:

$$L_{fhi}^q = x_l [I_{Z_{fhi}(l)r} (I_{Z1(l)r} + I_{Z2(l)r}) + I_{Z_{fhi}(l)x} (I_{Z1(l)x} + I_{Z2(l)x})] + 1 / (j b_l / 2) [I_{C_{fhi}(l)r} (I_{C1(l)r} + I_{C2(l)r}) + I_{C_{fhi}(l)x} (I_{C1(l)x} + I_{C2(l)x})] + 1 / (j b_l / 2) [I_{C_{fhi}(l)r} (I_{C1(l)r} + I_{C2(l)r}) + I_{C_{fhi}(l)x} (I_{C1(l)x} + I_{C2(l)x})]$$

交易 2 中第 i 个负荷应分摊的网损成本 $C_{fhibssi}$ 为:

$$C_{fhibssi} = \sum_{l=1}^b \alpha C_l L_{fhi}^p$$

上式中系数 0.5 表示负荷 i 承担为其服务引起的网损成本的一半。

4 算例

本文用一 5 节点系统 (图 7 所示, 系统数据见表 1) 为例进行实际计算, 来说明所提出的方法。将该系统分为两个交易。第一个交易为双边交易: 发电机 1 和负荷 5 间为双边交易, 其贸易额占负荷 5 功率的 50% ($0.3 + 0.1$ 标么值); 第二个交易为联营体交易: 发电机 1、2 共同为负荷 5 提供另 50% 的功率和 3、4 负荷的全部功率。该系统有 7 条线路, 为计算简便, 又能充分说明问题, 在某一时段内 (如 15 min), 令线路的有功网损单价为 50 元 / MW (以 1 000 kWh 为 200 元计算), 则各交易分摊结果如表 2 所示, 交易 2 中进一步分摊结果如表 3 所示, 表 4、表 5 和表 6 列出了每一步分摊的网损结果及其误差。

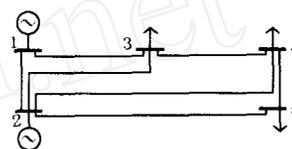


图 7 5 节点系统图

Fig 7 5-bus system

表 1 5 节点系统数据 (标么值)

Tab 1 Data of the 5-bus system (pu)

母线名	有功发电	无功发电	有功负荷	无功负荷
bus1	1.297 69	0.141 85	0	0
bus2	0.2	0.095	0	0
bus3	0	0	0.45	0.1
bus4	0	0	0.4	0.1
bus5	0	0	0.6	0.2

表 2 各交易网损成本分摊结果 (单位: 元)

Tab 2 Allocation results of loss cost of each transaction (元)

交易 1	60.643 8
交易 2	177.802 2

表 2 中, 交易 1 与交易 2 分摊的总和等于 $60.643 8 + 177.802 2 = 238.446$ 元, 整个输电网的网损成本为 238.45 元 (由电科院 PSASP 软件计算出每条线路网损, 乘以线路的有功网损单价, 求和而得), 有 0.004 元的误差, 满足要求。

表 3 交易 2 中的分摊结果 (单位: 元)

Tab 3 Allocation results in transaction 2 (元)

发电机 1	80.267 0	负荷 3	31.094 0
发电机 2	8.634 1	负荷 4	29.940 4
		负荷 5	27.866 7

表 3 中,所有发电机分摊网损成本之和为 1 元,体现了发电机和负荷各分摊交易 2 应承担的 88.901 1 元,所有负荷分摊网损成本之和为 88.901 元,网损成本的一半,结果准确。

表 4 网损成本分摊到交易时的网损校验 (标么值)

Tab 4 Loss examination of loss costs being allocated to each transaction (pu)

线路号	$L_1^p + jL_1^q$	$L_2^p + jL_2^q$	$loss - (L_1^p + jL_1^q + L_2^p + jL_2^q)$ (网损误差)
线路 1	0.004 1 + 0.011 7j	0.010 3 - 0.034 8j	(- 0.062 2 + 0.059 2j) $\times 10^{-4}$
线路 2	0.0021 + 0.005 9j	0.010 3 - 0.022 7j	(0.031 5 + 0.122 5j) $\times 10^{-4}$
线路 3	0.000 1 + 0.000 3j	0.003 4 - 0.031 8j	(- 0.073 8 + 0.031 3j) $\times 10^{-4}$
线路 4	0.000 3 + 0.001 0j	0.004 2 - 0.029 4j	(0.047 3 + 0.003 2j) $\times 10^{-4}$
线路 5	0.004 9 + 0.014 8j	0.007 3 - 0.009 5j	(- 0.066 3 + 0.102 8j) $\times 10^{-4}$
线路 6	0.000 1 + 0.000 4j	0.000 2 - 0.019 9j	(0.051 9 + 0.105 7j) $\times 10^{-4}$
线路 7	0.000 5 + 0.002 1j	- 0.000 1 - 0.051 4j	(0.079 5 + 0.125 6j) $\times 10^{-4}$

注: $L_1^p + jL_1^q$ 是交易 1 电流源单独作用时各支路的复功率损耗, $L_2^p + jL_2^q$ 是交易 2 电流源单独作用时各支路的复功率损耗, $loss$ 是两交易电流源共同作用时各支路的复功率损耗 ($loss$ 由电科院 PSA SP 软件计算而得)。

表 5 交易 2 中网损成本分摊给发电机时的网损校验 (标么值)

Tab 5 Loss examination of loss costs being allocated to generators in transaction 2 (pu)

线路号	$L_{fd1}^p + jL_{fd1}^q$	$L_{fd2}^p + jL_{fd2}^q$	$L_2^p + jL_2^q - (L_{fd1}^p + jL_{fd1}^q + L_{fd2}^p + jL_{fd2}^q)$ (网损误差)
线路 1	0.010 8 - 0.021 8j	- 0.000 6 - 0.013 0j	(0.039 9 + 0.166 5j) $\times 10^{-15}$
线路 2	0.0093 - 0.016 4j	0.001 0 - 0.006 2j	(- 0.026 0 - 0.065 9j) $\times 10^{-15}$
线路 3	0.002 6 - 0.026 8j	0.000 8 - 0.005 0j	(- 0.034 7 - 0.090 2j) $\times 10^{-15}$
线路 4	0.003 3 - 0.024 8j	0.000 9 - 0.004 6j	(0 + 0.027 8j) $\times 10^{-15}$
线路 5	0.005 9 - 0.008 2j	0.001 4 - 0.001 3j	(0.035 6 + 0.131 8j) $\times 10^{-15}$
线路 6	0.000 2 - 0.016 4j	0.000 0 - 0.003 5j	(0.021 5 + 0.062 5j) $\times 10^{-15}$
线路 7	- 0.000 1 - 0.042 3j	- 0.000 1 - 0.009 1j	(0.003 7 + 0.048 6j) $\times 10^{-15}$

注: $L_{fd1}^p + jL_{fd1}^q$ 是交易 2 中发电机 1 单独作用时各支路的复功率损耗, $L_{fd2}^p + jL_{fd2}^q$ 是交易 2 中发电机 2 单独作用时各支路的复功率损耗。

表 6 交易 2 中网损成本分摊给负荷时的网损校验 (标么值)

Tab 6 Loss examination of loss costs being allocated to loads in transaction 2 (pu)

线路号	$L_{hd1}^p + jL_{hd1}^q$	$L_{hd2}^p + jL_{hd2}^q$	$L_{hd3}^p + jL_{hd3}^q$	$L_2^p + jL_2^q - (L_{hd1}^p + jL_{hd1}^q + L_{hd2}^p + jL_{hd2}^q + L_{hd3}^p + jL_{hd3}^q)$ (网损误差)
线路 1	0.003 5 - 0.014 8j	0.003 5 - 0.012 3j	0.003 3 - 0.007 6j	(- 0.015 6 + 0.256 7j) $\times 10^{-15}$
线路 2	0.004 8 - 0.006 3j	0.003 7 - 0.007 3j	0.001 8 - 0.009 1j	(- 0.006 9 + 0.270 6j) $\times 10^{-15}$
线路 3	0.001 9 - 0.010 3j	0.001 3 - 0.010 6j	0.000 2 - 0.010 9j	(0.001 3 + 0.249 8j) $\times 10^{-15}$
线路 4	0.001 8 - 0.010 9j	0.002 1 - 0.008 2j	0.000 4 - 0.010 2j	(0.019 9 + 0.298 4j) $\times 10^{-15}$
线路 5	0.001 1 - 0.008 9j	0.001 3 - 0.006 9j	0.004 9 + 0.006 3j	(0.0607 + 0.3556j) $\times 10^{-15}$
线路 6	- 0.000 3 - 0.008 8j	0.000 4 - 0.005 9j	0.000 1 - 0.005 2j	(0.009 1 + 0.156 1j) $\times 10^{-15}$
线路 7	- 0.000 3 - 0.020 7j	- 0.000 4 - 0.018 8j	0.000 5 - 0.011 9j	(- 0.001 4 + 0.312 3j) $\times 10^{-15}$

注: $L_{hd1}^p + jL_{hd1}^q$ 是交易 2 中仅为负荷 3 提供服务时各支路的复功率损耗, $L_{hd2}^p + jL_{hd2}^q$ 是交易 2 中仅为负荷 4 提供服务时各支路的复功率损耗, $L_{hd3}^p + jL_{hd3}^q$ 是交易 2 中仅为负荷 5 提供服务时各支路的复功率损耗。

表 4 数据显示交易 1 和交易 2 分摊网损之和等于系统总网损;表 5 数据显示交易 2 中发电机 1 和 2 分摊网损之和等于交易 2 分摊网损;表 6 数据显示交易 2 中负荷 3、4 和 5 分摊网损之和等于交易 2 分摊网损。用本文方法每一步分摊网损均满足叠加定理,结果准确。表 4 网损误差精度为 10^{-4} ,表 5、表 6 网损误差精度为 10^{-15} 。

5 结论

本文给出了一种适用于在多种交易模式 (双边交易、多边交易和联营体交易) 共存的电力市场中

分配输电系统网损的一种方法。

1) 该方法以电流分解为基础,用电流表示交易,物理意义明确;可以直接处理任意的串并联网络,不用进行支路化简或移植;从交易间到交易中每一步网损分摊均满足叠加定理。

2) 以系统中已经发生了的实际潮流为基础进行分摊,既考虑了有功的影响,又考虑了无功的影响,对参与交易的各个贸易方而言是比较公平的。

3) 顾及了发电机和电力用户共同使用电力网的事实,使其共同分摊网损成本,减少了补贴现象;通过算例验证了参与交易的各个贸易方所分摊的网

损成本总和等于整个输电网的网损成本,能够完全回收由电能损耗引起的成本。

4) 该方法当双边交易个数较多时,手算计算量较大,但用计算机编程计算非常易于实现,所以该方法具有一定的实用性。应用本文方法也对 IEEE30 节点系统进行了计算,结果准确。

参考文献:

- [1] 刘梓洪,程浩忠,刘晓冬,等. 电力市场网损分摊方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(7): 70-76
LIU Zi-hong, CHENG Hao-zhong, LIU Xiao-dong, et al Review of Loss Allocation Methods in Power Market[J]. Relay, 2004, 32(7): 70-76
- [2] 胡朝阳,韩祯祥. 基于 Shapley 值的网损分摊新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 32-35.
HU Zhao-yang, HAN Zhen-xiang A New Shapley Value Based Method for Allocation of Transmission Losses[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 32-35.
- [3] 乔振宇,陈学允,张粒子,等. 功率分解潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 77-79.
QIAO Zhen-yu, CHEN Xue-yun, ZHANG Li-zi, et al A New Concept of the Separation of Electrical Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 77-79.
- [4] 江辉,彭建春,欧亚平,等. 支路损耗分摊方法在输电网损公正分配中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 7-12
JIANG Hui, PENG Jian-chun, OU Ya-ping, et al Appli-

cation of Branch Power Loss Allocation Method in Fair Allocation of Transmission Power Losses[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 7-12.

- [5] 彭建春,刘卫华,陈景怀,等. 面向全电网用户的输电费用分配模式与仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 13-15.
PENG Jian-chun, LIU Wei-hua, CHEN Jing-huai, et al Modes and Simulations of User-oriented Transmission Cost Allocation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 13-15.
- [6] 乔振宇,陈学允,张粒子,等. 基于电流共轭的转运网损成本分摊方法[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 76-79.
QIAO Zhen-yu, CHEN Xue-yun, ZHANG Li-zi, et al A Research on Cost Allocation of Transmission Loss in Electricity Market [J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 76-79.

收稿日期: 2005-05-16; 修回日期: 2005-08-22

作者简介:

李秀琴(1975-),女,硕士研究生,从事电力市场、继电保护方面的研究工作; Email: lixiuqin@163.com

李晓磊(1981-),男,博士研究生,从事电力系统分析与控制的研究;

彭茂君(1981-),女,硕士研究生,从事电力系统分析与控制方面的研究;

宋家骅(1939-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统稳定分析与控制领域的教学与科研工作。

A loss allocation method in electricity markets with different transaction modes coexisted

LIXiu-qin¹, LIXiao-lei², PENG Mao-jun³, SONG Jia-hua³

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China; 3. Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: A method of loss allocation is presented in electricity market coexisting with different transaction modes such as Pool transaction mode, bilateral transaction mode and multilateral transaction mode. The method is based on the separation of current. Each transaction is described by corresponding current, and the loss that should be borne by each transaction is calculated with the method of loss component allocation. Then, the previously determined loss of Pool transaction mode or multilateral transaction mode is further allocated to all of the generators and loads that take part in the transaction. A half of loss cost of each transmission element is allocated to generators, and the other half is allocated to loads. Analysis of 5-bus system shows that the proposed method is correct and reasonable.

Key words: electricity market; different transaction modes coexisted; method of loss component allocation; separation of current

(上接第 17 页 continued from page 17)

cost, and high dependability graphic oriented programming design in protective relay. A practical implementation method of graphic oriented programming in protective relay is presented. This method hardly depends on CPU, thus can be used in graphic oriented programming design of CPUs in a flexible scope functions.

Key words: field programmable gate array; modular programming; graphic-oriented programming