

电力系统网损分摊方法研究

董世勇¹, 倪广魁²

(1. 四川内江电业局变电运检中心, 四川 内江 641000; 2. 华北电力大学电力系统研究所, 北京 102206)

摘要:综合分析和探讨了几种经典的网损分摊方法,并指出了这些网损分摊方法各自的优点和缺点及面临的问题;同时阐述了一般的潮流跟踪法由于分摊因子的存在,产生了本来没有有功、无功损耗,分摊后却产生了有功、无功损耗的不合理现象;从网损产生的本质出发,根据电网能量分布规律,利用能量的一维特性,得出了任意两个节点间支路的线损是由电力系统中所有电源共同引起的结果的网损分摊方法,并给出了该方法的算例分析。

关键词:电力系统;电力市场;功率;网损分摊

Abstract: Several typical power loss allocation methods are analyzed and discussed and their advantages and disadvantages are pointed out. At the same time, the existing drawbacks of the power flow tracking method are analyzed, as the allocation factors resulted in unaccepted phenomena that there is actually no active/reactive loss but in allocation results active/reactive loss appears. From the nature of the losses coming into being according to the law of energy distribution, using the one-dimensional characteristics of the energy, the loss allocation method is obtained based on the description of the linear superposition theorem that the line losses between any two nodes of power system are the results caused by all the power supplies in power system, and the computation example analysis of this approach is given.

Key words: power system; electricity market; power; loss allocation

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0006-05

0 引言

电网线损是电力系统运行的基础参数,在电力市场中正确有效的网损分摊方法是非常有用的。一方面,在电力市场交易过程中,虽然输电损耗占总发电量的 4%~8%^[1],输电网的损耗只占全部成本的一小部分(典型值为 2.5%^[2])。但是,它增加了电能的输送费用,而且对具体的交易和电网用户,也可能有很大的影响。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%^[3]。另一方面,现在网损分摊的研究处于百家争鸣的状态,但是没有任何一个网损分摊方法可以证明自己的网损分摊结果是符合物理实际的。因此,如何科学、公平合理地确定网损分摊方案,是当前电力市场改革所面临的重大课题。

考虑市场因素,传统意义的网损必须附加来源,因此,网损分摊成为研究的热点,提出了多种计算方法。这些网损分摊方法应遵循保证用户的长期和短期经济利益、系统安全性、经济效益、透明度、可行性等原则,并且应当能够提供正确的经济信号、能够促

使整个网络损耗的降低等。如果能科学有效地解决网损分摊中的这些问题,将对输电服务的电力市场化进程产生积极和深远的推动作用。

1 典型网损分摊方法

目前,网损分摊的经典方法主要有:平均网损分摊法^[4]、边际网损系数法^[5]、跟踪潮流法^[6]、合同路径法、基于阻抗矩阵的网损分摊方法、CLP方法、针对双边交易的合同路径法、基于博弈论的网损分摊方法^[7]等。在国外的一些大电网公司采用较多的是平均网损分摊法和边际网损系数法。由于篇幅所限,就平均网损分摊法、边际网损系数法、跟踪潮流法这三种进行探讨,并指出了各自的优缺点。

1.1 平均网损分摊法

平均网损分摊方法是根据用户的电能大小比例来分摊网损,按相同的系数值来分配网损。因此平均网损分摊法实际上是一种“邮票法”,该方法算法简单,不考虑输电网的结构、输电线路的距离和输送功率的收发点位置,在全网范围内按相同的网损系数进行分配,是最早被电力联营市场所采用的方法。西班

牙、英格兰和威尔士电力市场采用的就是这种分摊方法。网损系数为

$$\lambda = \frac{P_{\text{loss}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{GL } i}} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss } i} \quad (2)$$

其中, i 为节点号; $P_{\text{GL } i}$ 为第 i 个节点的有功出力或有功负荷; P_{loss} 为全网网损; $P_{\text{loss } i}$ 是第 i 条支路的损耗, 变压器等输电设备可并入相应的支路计算。

则节点 i 的有功出力或有功负荷应该分摊的网损量为

$$P_{N_{\text{loss } i}} = P_{\text{GL } i} \lambda \quad (3)$$

这种网损分摊方法既直接又透明, 可以通过事前计算、事后计算、实时计算或三者之间组合来完全回收输电损耗成本, 也可以减少网损分摊量的意外波动, 从而降低了独立发电厂投资的风险性。

但是这种网损分摊方法也有其缺点, 无论用户是就近买电, 还是向离其电气距离较远的发电厂买电, 其网损是均摊的, 因此它忽略实际运行情况和输电用户的电气位置, 可能会向用户提供不正确的损耗成本信号。并且平均网损分摊方法不能提供电网短期和长期经济运行的经济学信号, 缺乏强有力的电力市场经济激励机制。因此, 在电力市场运营初期, 相关理论还不成熟的情况下采用该方法。有不少方法是在这种分摊方法的基础上进行了一些改进, 但随着电力市场理论研究的逐步完善和实践的不断深入, 该方法将被其他方法所取代。

1.2 边际网损系数法

边际网损系数法根据节点注入功率的单位变化引起全网网损变化量的大小来对各节点上负荷或发电机进行网损的分摊, 是一种灵敏度方法, 各发电节点的损耗灵敏度 K_i 为

$$K_i = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{G_i}} \quad (4)$$

式中, P_{G_i} 为第 i 个发电用户发电功率; P_{loss} 为总输电功率损耗。

发电机应承担的功率损耗为

$$P_{G_{\text{loss } i}} = K_i \cdot P_{G_i} \quad (5)$$

这种分摊方法能反映各节点造成全网网损的微增成本信息, 从而能够提供很好的经济信号, 通过市场的手段促使潮流向网损减少的方向流动, 达到优化潮流、提高经济效益以及指导用户投资决策的目的。

虽然在美国加州、澳大利亚的电力市场均采用这种网损分摊方法, 分摊方法的具体实现方式也有所不同, 但该方法计算出所有交易分摊网损之和与实际系统网损不相等, 不能完全回收输电损耗成本。

1.3 潮流追踪法

潮流追踪是以潮流计算或状态估计所得到的系统潮流分布为基础, 根据节点功率比例分配原则, 追溯潮流走向, 从而确定输电用户功率在每个输电设备中通过功率所占份额, 以此作为输电功率损耗分摊的依据, 该方法的计算直接针对输电用户功率总量。其基本原理是判定由发电节点注入的功率如何在电网的各输电线及负荷节点间进行分配。由于其原理简单, 符合人们的常规思维, 故一般都将其作为输电损耗分摊的一个备选方案。该方法按所追踪的量不同主要包括按电流追踪损耗分摊方法和按功率追踪损耗分摊方法。

1.3.1 按电流追踪损耗分摊方法

按电流量跟踪方法是各电源对支路的使用程度计算各电源对各支路应承担的损耗, 从而计算系统网损在电源中的分摊。通过研究网络中支路电流的组成及其对网络损耗的影响来进行全网网损的分摊。在忽略无功潮流影响的情况下, 文献 [8] 证明了“利用份额”采用电流比值与采用功率比值等价, 提出各出线分摊节点网损按电流幅值进行分摊, 认为按电流幅值的平方进行分摊的原则是不合理的。因为按电流幅值的平方分摊可能使全局网损和电源分摊网损的增长趋势出现矛盾的情况, 并且这种分摊将使电源对线路“利用份额”在首末端不再保持一致。

从现实中电磁耦合存在性出发, 为了体现潮流追踪的公平性, 有些按电流量跟踪的方法考虑了线路上各电流分量的耦合, 引入耦合网损系数, 使所分摊的网损不仅包括自身电流分量所产生的部分 $I_i^2 R_i$ (I_i 为线路 i 上的自身电流分量, R_i 为线路上的电阻), 而且还包括由于其他线路上的电流在此线路上产生的耦合电流分量而成的网损量, 即由电流量耦合的交叉网损部分 $I_k^2 R_i$ (I_k 为线路 i 上的由于线路 k 上电流引起的耦合电流分量, R_i 为线路 i 上的电阻)。这种方法新颖, 但计算量大, 在复杂的电力系统中不宜使用。

1.3.2 按功率追踪损耗分摊方法

对于按功率追踪损耗分摊方法, 如果从复功率出发进行分析, 由于存在着有功功率和无功功率的耦合关系, 分析计算相当复杂。为了计算简便, 最初的分

析方法是对复功率进行解耦。又由于线路的损耗是由有功功率引起的,所以解耦后,按有功功率进行跟踪。

有功功率跟踪为了分析与计算的简便,忽略了有功和无功的联动的影响,直接对有功潮流和无功潮流进行解耦,而不考虑节点无功对有功功率损耗影响,按照有功功率比例共享的原则,进行有功跟踪和网损分摊。但是,各发电厂在实际的运行当中,由于电压控制等原因,其功率因数不可能相等。当功率因数较差且不相等时,有功跟踪方法在确定输电设备利用份额及分摊的网损时会引起较大的误差。

随着计算机的发展及其计算速度的提高,人们对网损分摊的精度要求更加精准。在有功功率跟踪会引起较大误差的情况下,人们对这种跟踪方法进行了改进,也就产生了另一种功率跟踪方法,即复功率跟踪和按复功率进行网损分摊的方法。

复功率跟踪的方法,考虑了有功功率和无功功率对全网网损的综合影响,所采用的简化少,因此,比有功功率跟踪方法更趋于公平合理,理论上更易被用户接受。但是,这种方法涉及大量复数运算,包括复数矩阵的求逆,因而计算复杂,对于复杂电力系统中的实际应用,还有待进一步的研究。

由于基于潮流跟踪的网损分摊法只考虑了各交易引起的支路潮流对网损的影响,而对交易之间相互作用产生的网损责任问题未予计及。因此,按照这种方法分摊网损的结果可能有失公平的原则。

2 经典方法存在的问题

经典网损分摊方法各有其优点和使用范围,但是目前对网损分摊问题本质的认识还没有达到透彻的程度,有必要再度审视这一问题。因为,任何一种分摊因子为复数的网损分摊方法都会出现一种不合理的现象,即本来没有有功、无功损耗,分摊后却产生了有功、无功损耗,因而在原则上是难以接受的。如下例所示。

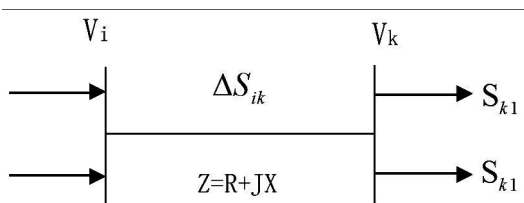


图 1 含分支的简单系统

对图 1 所示简单系统,考虑一种特殊的情况,

假设 $V_k=1, R=1, X=0, \Delta S_{ik}=3.6, S_{k1}=0.65 + j0.562731, S_{k2}=0.8 + j0.435726$ 时,由于线路的电抗 $X=0$,显然没有无功损耗,线路的损耗为 $\Delta S_{ik}=3.6$ 。如果网损分摊按 S_{k1}, S_{k2} 复功率之比进行分摊,按此原则 S_{k1}, S_{k2} 分得的损耗分别为

$$\begin{aligned} \Delta S_{k1} &= \Delta S_{ik} \frac{S_{k1}}{S_{k1} + S_{k2}} \\ &= 1.747331 + j0.193329 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{k2} &= \Delta S_{ik} \frac{S_{k2}}{S_{k1} + S_{k2}} \\ &= 1.747331 - j0.193329 \end{aligned} \quad (7)$$

从式 (6)、(7) 可以看到 S_{k1} 分到了正的无功损耗, S_{k2} 分到了负的无功损耗,但线路上实际是没有无功损耗的, S_{k1} 会认为这种方法是不符合实际的。

造成这种不合理现象的原因是分摊公式中出现的分摊因子 $\frac{S_{k1}}{S_{k1} + S_{k2}}$, 一般情况下是虚、实部都不为零的复数,显然不论线路损耗是纯有功还是纯无功,乘以这一分摊因子后都将成为一个虚实部都不为零的复损耗,产生这种现象。复数分摊因子将使分摊结果的定性性质发生变化,有功可能变成无功,无功也可能变成有功,对大多数用户而言这种情况是不易接受的。

一般说来,电力网络中任一节点的电压(除作为参考点的平衡节点外)都是由所有节点注入功率共同维持的。因此,各个节点的电压以及各个支路的电流与所有节点的注入功率有关,这样一般的分摊因子都会带来不合理的计算结果。

3 改进方法

既然潮流跟踪法基于物理潮流,概念清晰,易于理解和实施,这样对这种方法进行改进,可以从另一个角度来考虑分析,从而得到一种合理的物理潮流跟踪法。

在电流、电压所在的正交空间内,功率与电流和电压量间呈非线性关系,直接利用电力系统和电路理论现有的结论,最终必须解决两乘数占其积的比例问题,是一个没有定义的数学命题,没有解决方案,无法获得令人满意的解释。为此,利用在能量空间求证网络中支路功率的物理组成的观念,得出电网络中电流参量证明网络中任意支路线损的功率组成和分布特征的思路。

为不失一般性, 设电网具有 n 个节点, q 个电源。为使所得结果具有规律性, 约定电源节点编号从 1 开始, 依次到 q 其后的节点编号次序任意。电源以电流源描述, 记为 \dot{I}_{ks} , $k=1, 2, \dots, q$

电网的节点电压导纳矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1q} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2q} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{q1} & y_{q2} & \cdots & y_{qq} & \cdots & y_{qn} \\ y_{q+1,1} & y_{q+1,2} & \cdots & y_{q+1,q} & \cdots & y_{q+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nq} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) 中, y_{ij} 为电网导纳矩阵的元素; \dot{U}_i , $i=1, 2, \dots, n$ 为第 i 个节点的电压, 是未知量; \dot{I}_{ks} , $k=1, 2, \dots, q$ 为第 k 个电源的电流源电流, 为已知量。利用式 (8) 求解节点电压量。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1q} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2q} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{q1} & A_{q2} & \cdots & A_{qq} & \cdots & A_{qn} \\ A_{q+1,1} & A_{q+1,2} & \cdots & A_{q+1,q} & \cdots & A_{q+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nq} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 中, A_{ij} 为式 (8) 中节点导纳阵对应元素 (i, j) 的代数余子式, 于是可得各个节点电压 \dot{U}_i , $i=1, 2, \dots, n$

$$\dot{U}_i = \left[\frac{A_{i1}}{\Delta} \quad \frac{A_{i2}}{\Delta} \quad \cdots \quad \frac{A_{iq}}{\Delta} \right] \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ \vdots \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

于是得节点 i 和 k 间的支路线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{ik} &= (\dot{U}_i - \dot{U}_k) \dot{I}_k \\ &= (\dot{U}_i - \dot{U}_k) \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_k}{\dot{Z}_{ik}} \right)^* \\ &= \frac{1}{Z_{ik}^*} \left[\frac{1}{\Delta} (A_{1k} \dot{I}_{1s} + A_{2k} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qi} \dot{I}_{qs}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Delta} (A_{1k} \dot{I}_{1s} + A_{2k} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qk} \dot{I}_{qs}) \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{\Delta} (A_{1i} \dot{I}_{1s} + A_{2i} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qi} \dot{I}_{qs}) \right] \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{\Delta} (A_{ki} \dot{I}_{1s} + A_{ki} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{ki} \dot{I}_{qs})]^* \quad (11)$$

根据式 (9), 将式 (11) 整理得

$$\begin{aligned} \Delta S_{ik} &= \frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} \left[(A_{1i} - A_{1k})(A_{1i} - A_{1k})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{1s}^* + \right. \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{2s}^* + \cdots + \\ &\quad (A_{qi} - A_{qk})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{qs}^* + \\ &\quad (A_{1i} - A_{1k})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad \cdots + (A_{qi} - A_{qk})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad \cdots + (A_{1i} - A_{1k})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{qs}^* + \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{qs}^* + \cdots + \\ &\quad \left. (A_{qi} - A_{qk})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{qs}^* \right] \quad (12) \end{aligned}$$

从式 (12) 可以看出, 对于 q ($q > 1$) 个电源的电力系统, 其支路的线损功率为电源自功率和互功率的代数和。

对于节点 i 和 k 间支路线损的自功率具有 $\dot{I}_{ms} \cdot \dot{I}_{ms}^*$ ($m=1, 2, \dots, q$) 的项, 是由电源 mS 独立提供能量的形式, 其表达式为

$$\begin{aligned} &\frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} \left[(A_{mi} - A_{mk})(A_{mi} - A_{mk})^* \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ms}^* \right. \\ &\quad \left. = \frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} |A_{mi} - A_{mk}|^2 \cdot |\dot{I}_{ms}|^2 \quad (13) \end{aligned}$$

对于节点 i 和 k 间支路线损的互功率具有 $\dot{I}_{ms} \cdot \dot{I}_{ns}^*$ ($m=1, 2, \dots, q, n=1, 2, \dots, q, m \neq n$) 的项, 表示电源 mS 和 nS 共同存在时, 向网络提供能量的形式, 其表达式为

$$\frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} (A_{mi} - A_{mk})(A_{ni} - A_{nk})^* \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ns}^* \quad (14)$$

由此可知, 电力系统中任意两个节点之间的支路线损是由电力系统中所有电源共同引起的结果。系统中线损功率由多种功率形式组成, 为各种组成成分的代数和, 这就是功率线性叠加定理。线损功率可以根据其电源提供能量的组合, 表现为多种功率形式, 数值等于电源自功率和互功率的代数和。这样很好地解决了系统网损的真正来源与分摊问题。

4 改进方法算例分析

这种改进方法是建立在潮流计算的基础上的网

损分摊方法,利用潮流计算的结果,将电力系统等效。

以下述简单的三节点电路为例,如图 2 所示。

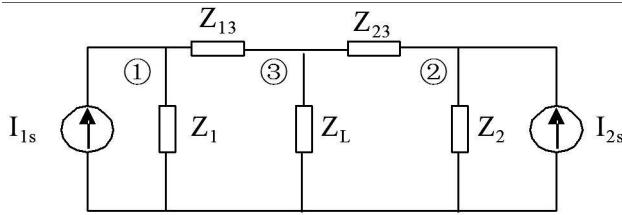


图 2 两电流源直流网络

其中电源 1S 的内阻 $Z_1 = 1.10 + j0.36$; 电源 2S 内阻 $Z_2 = 0.9 + j0.2$; 线路阻抗分别为 $Z_{13} = 0.04 + j0.12$, $Z_{23} = 0.03 + j0.09$; 负载为 $Z_L = 1.05 + j0.21$; 两电流源电流分别为 $I_{1s} = 1.85 + j0.24$, $I_{2s} = 1.64 + j0.2$ 。

则图 2 对应的节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 3.3210 - j0.7687 & 0 & -2.5 + j0.5 \\ 0 & 4.3922 - j0.2353 & -3.3333 + j0 \\ -2.5 + j0.5 & -3.3333 + j0 & 6.7491 - j1.6832 \end{bmatrix}$$

其对应的等效阻抗矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} 0.3611 + j0.1501 & 0.3182 + j0.0413 & 0.3314 + j0.0716 \\ 0.3182 + j0.0413 & 0.3573 + j0.1239 & 0.3353 + j0.0719 \\ 0.3314 + j0.0716 & 0.3353 + j0.0719 & 0.3467 + j0.1053 \end{bmatrix}$$

根据式 (12)、(13), 可计算节点 1、3 间支路上由

$I_{1s} \cdot \dot{I}_{1s}^*$ 作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|1s} &= -\frac{y_{13}}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{11} - A_{13})^* \cdot \dot{I}_{1s} \cdot \dot{I}_{1s}^*] \\ &= y_{13} \left(\frac{A_{11}}{\Delta} - \frac{A_{13}}{\Delta} \right) \left(\frac{A_{11}}{\Delta} - \frac{A_{13}}{\Delta} \right)^* |\dot{I}_{1s}|^2 \\ &= (2.5 - j0.5)^* [(0.3611 + j0.1501) - (0.3314 + j0.0716)] \cdot [(0.3611 + j0.1501) - (0.3314 + j0.0716)]^* \cdot |1.85 + j0.24|^2 \\ &= 0.0613 + j0.1840 \end{aligned}$$

同理, 可计算节点 1、3 间支路上由 $I_{2s} \cdot \dot{I}_{2s}^*$ 、 $I_{1s} \cdot \dot{I}_{2s}^*$

各自作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|2s} &= -\frac{y_{13}}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{21} - A_{23})^* \cdot \dot{I}_{2s} \cdot \dot{I}_{2s}^*] \\ &= 0.0084 + j0.0252 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|12} &= -\frac{y_{13}}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{21} - A_{23})^* \cdot \dot{I}_{1s} \cdot \dot{I}_{2s}^*] \\ &= -0.0119 - j0.0707 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|21} &= -\frac{y_{13}}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{11} - A_{13})^* \cdot \dot{I}_{2s} \cdot \dot{I}_{1s}^*] \\ &= -0.0329 - j0.0637 \end{aligned}$$

同理, 可计算节点 2、3 间支路上由 $I_{1s} \cdot \dot{I}_{2s}^*$ 、 $I_{2s} \cdot \dot{I}_{2s}^*$

各自作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|21} &= -\frac{y_{23}}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{11} - A_{13})^* \cdot \dot{I}_{1s} \cdot \dot{I}_{1s}^*] \\ &= 0.0289 + j0.0868 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|22} &= -\frac{y_{23}}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{21} - A_{23})^* \cdot \dot{I}_{2s} \cdot \dot{I}_{2s}^*] \\ &= -0.0126 - j0.0379 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|12} &= -\frac{y_{23}}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{21} - A_{23})^* \cdot \dot{I}_{1s} \cdot \dot{I}_{2s}^*] \\ &= -0.0193 - j0.0573 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|21} &= -\frac{y_{23}}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{11} - A_{13})^* \cdot \dot{I}_{2s} \cdot \dot{I}_{1s}^*] \\ &= -0.0190 - j0.0574 \end{aligned}$$

对于符号下标, 以 $\Delta S_{13|11}$ 、 $\Delta S_{13|12}$ 为例, 下标 13 表示节点 1、3 间的支路; 11 表示该支路上的线损是由电源 1S 引起的自功率, 12 表示该线路上的线损是由电源 2S 引起的互功率。其他下标类同。

于是可得, 系统的总网损是

$$\sum S = \Delta S_{13|11s} + \dots + \Delta S_{23|21s} = 0.281 + j0.0848$$

其中, 节点 1、3 间支路上由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|1s} &= \Delta S_{13|11} + \Delta S_{13|21} \\ &= 0.0284 - j0.0455 \end{aligned}$$

节点 1、3 间支路上, 由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|2s} &= \Delta S_{13|22} + \Delta S_{13|12} \\ &= -0.0035 - j0.0455 \end{aligned}$$

节点 2、3 间支路上, 由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|1s} &= \Delta S_{23|11} + \Delta S_{23|21} \\ &= 0.0099 + j0.0294 \end{aligned}$$

节点 2、3 间支路上, 由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|2s} &= \Delta S_{23|22} + \Delta S_{23|12} \\ &= -0.0067 - j0.0194 \end{aligned}$$

全系统的网损中由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{1s} &= \Delta S_{13|1s} + \Delta S_{23|1s} \\ &= 0.0383 + j0.01497 \end{aligned}$$

全系统的网损中由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{2s} &= \Delta S_{13|2s} + \Delta S_{23|2s} \\ &= -0.0102 - j0.0649 \end{aligned}$$

通过以上计算, 一方面, 计算结果与节点法计算结果一致; 另一方面, 利用这种方法可以清晰明确地得出系统网损的真正来源, 从而很好地解决了电力系统的网损分摊问题。

(下转第 46 页)

波电流在电网中引起的谐波电压倾向于减小变压器磁通的谐波含量和电流的谐波含量;而当谐波阻抗呈容性时,则变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。当电网在负荷低谷时段时,会有一些电容器组未切除,使电网的谐波阻抗呈容性,一方面会使电网电压升高,另一方面会引起某次谐波放大现象。

参考文献

[1] 贺建闽,黄治清,李群湛. 电网背景谐波电压测量与研究 [J]. 铁道学报, 2005(6): 28—33.

[2] 张直平主编. 城市电网谐波手册 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[3] 张直平. 电力系统中谐波的某些主要影响 [J]. 电网技

术, 1989(1): 8—14.

[4] 柴宇,房俊龙,高延英. 农村电网的谐波分析及治理 [J]. 农机化研究, 2006(3): 68—70.

[5] 余培岩,马卫平,界金星. 变压器 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响 [J]. 电力设备, 2004, 8(5): 27—30.

[6] Acha E, Arrillaga J, Medina A, Semlyen A. General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Nonlinearities [J]. Generation Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings — Generation Transmission and Distribution], IEE Proceedings C, 1989, 36(5): 271—278.

[7] 施围. 电力系统过电压计算 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988. (收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 10 页)

5 结 语

电力系统的网损分摊方法有多种,但目前还没有一种让各国电力市场都接受的方法,大多数国家倾向于实行边际网损系数法或直接包括网损在内的实时节点定价。潮流跟踪法是一种会计学方法,许多人认为特别适合于固定成本回收,所以也很引人注目。但该方法不能提高电力系统的效益和为用户的投资决策提供有效的经济信号,而边际网损系数法则可以做到这点。由于分摊因子的存在,经典方法存在一些问题,使得原本没有有功损耗、无功损耗,分摊后却产生了有功损耗、无功损耗的不合理现象。功率线性叠加定理从网损产生的物理本质出发,经过严格的数学推导,有效解决了这一问题,体现了其优越性。

参考文献

[1] Alaywan Z, Allen J. California Electric Restructuring: A Broad Description Of the Development Of the California ISO [J]. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13: 1445—1452.

[2] Christie R. Markets and Economic Dispatch and Transmission Losses [J]. IEEE Power System Economics 2001.

[3] Shuttleworth G, Williams I. Allocation Transmission Losses: Methods and Criteria [A]. A Submission to the DICG Prepared by NERA. London, 1999.

[4] 曾鸣. 电力市场理论及应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.

[5] Mutale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of Losses in Distribution Systems with Embedded Generation [J]. IEEE Proc on Gener, Transm & Distrib, 2000, 147(1)

: 7214.

[6] Wu Z Q, Chen G Z. MVA Power Flow and Loss Analysis for Electricity Market [J]. IEE Proc on Gener Transm & Distrib, 2001, 148(2): 153—158.

[7] 刁勤华,林济铿,倪以信,等. 博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 19—23.

[8] Macqueen C N, Irving M R. An Algorithm for the Allocation of Distribution System Demand and Energy Losses [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 338—343.

[9] Slavickas R A. Allocation of Network Losses to Variable Electrical Loads [C]. The Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, (2): 391—396.

[10] 鲍海,马千. 电网线损物理分布机理 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82—86.

[11] 王锡凡,王秀丽,郑斌. 电力市场过网费的潮流分析基础——网损分摊问题 [J]. 中国电力, 1998, 6(31): 6—9.

[12] 常乃超,郭志忠. 网损分摊问题的思考 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 4(23): 43—47.

[13] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (一) [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(3): 9—13.

[14] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (二)——有功、无功联合贡献因子及其应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 9—22.

[15] 吴政球,姚建刚. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (三)——拓扑潮流分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 14—22.

作者简介

董世勇 (1980—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护工作。

倪广魁 (1984—),硕士研究生,男,从事电力系统分析与控制方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—12—17)