

基于复功率追踪的网损分配方法探讨

伍文城¹,张友刚¹,陈辉²,肖建¹

(1.西南交通大学电气学院,四川 成都 610031; 2.四川启明星信息技术公司,四川 成都 610041)

摘要:指出了建立在有功功率与无功功率解耦追踪基础上的网损分摊方法的不合理性。在复比例共享原则的基础上给出了基于复功率追踪的网损分摊方法,该方法通过逆流跟踪将全网复功率损耗归算到发电机,通过顺流跟踪将全网复功率损耗归算到负荷。给出了由发电机与负荷共同承担电网中每个元件的网损的双向分摊模式。数值算例表明,所提出的网损分摊方法获得了比传统方法更为合理的结果,并可以消除发电厂与负荷间的交叉补贴。

关键词: 电力市场; 网损分摊; 潮流跟踪

中图分类号: TM731; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)12-0082-05

0 引言

在电力工业市场化运营的环境下,输电业务引起的网损分摊方法由于涉及到电网各用户的商业利益而受到较多的关注。现有的实用方法中,功率大小比例分摊法不区分各用户对网损的贡献程度^[1],灵敏度分析类方法不能保证全网网损与分摊给各用户的网损之和相等^[2],这些都不利于电力市场的公平合理。文献[3,4]提出了基于潮流跟踪方法基础上的有功网损分摊方法,一定程度上解决了上述问题。但这种基于有功、无功解耦追踪的方法实质是认为全网各个节点的注入功率或汲取功率的功率因数完全一致,而且没有考虑有功网损与线路中的无功功率的关系,算出的结果必然与实际有较大的出入。基于上述情况,文献[5]认为各线路的损耗应按各用户在该线路上引起的复功率之比分摊,文献[6,7]在此基础上提出了复功率追踪的方法,但文献[6]的方法是建立在有向通路的理论基础上的,不适合有环流网络的追踪;文献[7]是将文献[2]的毛潮流追踪法直接应用于复功率追踪,认为“支路首末端功率支路中的功率损耗均按电流分量的共轭值成比例分摊”,这只在网损较小时成立,应用于复功率追踪时,由于无功网损较大,据此方法得出的误差将相当大。

文献[8]指出现有的网损分摊方法均忽视了电厂与负荷都在使用电网的事实,只向电厂或负荷分摊网损,造成了用户之间的相互补贴。一些省的电力公司也正在改变这种单向分摊的政策,改为由电厂与用户共同承担网损,这需要研究如何衡量电厂与用户对网损的贡献程度。

基于上述情况,本文提出了基于复功率追踪的网损分摊方法,并给出了面向全网用户分摊的方法。最后给出了一个算例,说明利用本文原则进行网损分摊是一种较为合理的方法。

1 复比例共享原则简介

考察图1所示的潮流分布图,假定电网没有损耗。 $S_{io}, \dots, S_{jo}, \dots, S_{ko}$ 是流入节点 o 的复功率; $S_{ol}, \dots, S_{om}, \dots, S_{on}$ 是流出节点 o 的复功率。流过节点 o 的总潮流定义为节点 o 入线复功率潮流之和(也可以定义为节点 o 的出线复功率潮流之和),即 $S_o = S_{io} + \dots + S_{jo} + \dots + S_{ko}$

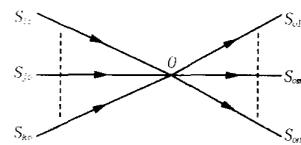


图1 复比例共享原则

Fig. 1 Complex proportional sharing principle

由于电力不可区分,可以认为与节点相关联的任一支路注入复功率是按比例在各流出支路上分配的,且与各流出支路的实际复功率成正比。例如,线路 $o-l$ 上的潮流 S_{ol} 中有 $\frac{S_{io}}{S_o} S_{ol}$ 的功率来自线路 $i-o$,有 $\frac{S_{jo}}{S_o} S_{ol}$ 的功率来自线路 $j-o$,推广到一般情况有

$$S_{io,ol} = \frac{S_{io}}{S_o} S_{ol}, \quad S_{ol,io} = \frac{S_{ol}}{S_o} S_{io} \quad (1)$$

式中: $S_{io,ol}$ 表示线路 $i-o$ 对线路 $o-l$ 复功率潮流的贡献量, $S_{ol,io}$ 的含义类推。当网络中各节点的功率因数相等时,由式(1)可推出有功功率的比例共享

原则

$$P_{io,ol} = \frac{P_{io}}{P_o} P_{ol}, \quad P_{ol,io} = \frac{P_{ol}}{P_o} P_{io} \quad (2)$$

这就是文献[3,4]进行有功、无功解耦追踪的方法。可见运用有功、无功解耦追踪的方法进行网损分摊,仅当全网各节点功率因数均相等时才是正确的。

实际电网是存在损耗的,为将其变成无损网络,可在支路中间增加一个节点,此节点的负荷等于该支路阻抗损耗。

2 逆流追踪

设电网有 n 个节点, m 条支路,按在支路中间增加一个虚拟节点的方法处理成无损网后共有 $(n+m)$ 个节点,虚拟节点的编号分别为 $n+1, n+2, \dots, n+m$ 。同时,将全网潮流变为以有功功率流向为参考方向的顺流网络。

定义流过节点的总潮流为:

$$S_i = \sum_{j \in L_i} S_{ji} + S_{Gi} \quad (i = 1, 2, \dots, n+m) \quad (3)$$

式中: L_i 表示节点的入线集; S_{Gi} 为节点 i 发电机注入的复功率; S_{ji} 是线路 $j-i$ 复功率潮流。

在节点 j 处, S_{ji} 可以表示为: $S_{ji} = C_{ji} S_j$ 。这样,式(3)可变为:

$$S_i = \sum_{j \in L_i} C_{ji} S_j + S_{Gi} \quad (4)$$

$$\text{即: } S_i - \sum_{j \in L_i} C_{ji} S_j = S_{Gi} \text{ 或 } A_u S = S_G \quad (5)$$

式中: A_u 为 $(n+m) \times (n+m)$ 的回溯矩阵; S 为流经网络各节点总复功率潮流的向量; S_G 为网络各发电节点注入的复功率向量。

矩阵 A_u 中的元素为:

$$[A_u]_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -C_{ji} = -\frac{S_{ji}}{S_j} & j \in L_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)可得 $S = A_u^{-1} S_G$, 向量 S 中的元素为:

$$S_i = \sum_{k=1}^{n+m} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (i = 1, 2, \dots, n+m) \quad (7)$$

从式(7)可看出,发电机 k 给节点 i 提供的潮流为 $[A_u^{-1}]_{ij} S_{Gk}$, 通过复比例共享原则,可知节点 i 的负荷 S_{Li} 由发电机组 S_{Gk} 提供的功率为:

$$S_{Li, Gk} = \frac{S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ij} S_{Gk} \quad (8)$$

由于各线路的损耗被虚拟成线路中点的负荷,

因此,要求各发电机应承担的全网网损份额,只需将发电机对各虚拟节点贡献的功率累加起来即可,以发电机 G_k 为例,它应承担的网损为:

$$S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} S_{Li, Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

由于现在还只是对网损的有功部分进行收费,要求 G_k 应承担的全网的有功网损部分只需对式(9)两边进行取实部运算:

$$P_{Gk} = \text{Re} \left(\sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \right) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

这种网损分摊模式通过逆流跟踪将全网网损归算到发电机组,由发电机组承担全部的网损,称为网损分摊的回溯法。

3 顺流追踪

进行顺流追踪时,要将各虚拟节点的损耗功率看成各虚拟节点的发电功率,即对虚拟节点而言,其注入的复功率

$$S_{Gi} = -S_{Li} \quad (i = n+1, n+2, \dots, n+m)$$

流过节点 i 的总复功率潮流为:

$$S_i = \sum_{j \in L_{i+}} S_{ij} + S_{Li} = \sum_{j \in L_{i+}} C_{ij} S_j + S_{Li} \quad (i = 1, 2, \dots, n+m) \quad (11)$$

式中: L_{i+} 表示节点 i 的出线集; $C_{ij} = S_{ij}/S_j$ 。

式(11)可重写为:

$$S_i = \sum_{j \in L_{i+}} C_{ij} S_j + S_{Li} \quad (12)$$

$$\text{即: } S_i - \sum_{j \in L_{i+}} C_{ij} S_j = S_{Li} \text{ 或 } A_d S = S_L \quad (13)$$

式中: A_d 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的顺流分配矩阵; S 为流经网络各节点潮流的向量; S_L 为网络各负荷节点的负荷功率向量。

矩阵 A_d 中的元素为:

$$[A_d]_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -C_{ji} = -\frac{S_{ji}}{S_j} & \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

由式(13)可得 $S = A_d^{-1} S_L$, 向量 S 中的元素为:

$$S_i = \sum_{k=1}^{n+m} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (i = 1, 2, \dots, n+m) \quad (15)$$

由式(13)可以看出,负荷 k 的复功率中流经节点 i 的潮流为:

$$S_{i, Lk} = [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (16)$$

通过复比例共享原则,可知节点 i 的发电机组 S_{Gi} 给各个负荷提供的功率为:

$$S_{Gi,Lk} = \frac{S_{Gi}}{S_i} S_{i,Lk} = \frac{S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (17)$$

由于各线路的损耗被虚拟成线路中点的电源,因此要求各负荷应承担的全网网损只需将负荷来自这些虚拟节点的功率累加起来即可,

$$S_{Lk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} S_{Gi,Lk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (18)$$

由式(18)可得负荷 k 应承担的有功网损为:

$$P_{Lk} = \text{Re} \left(\sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \right) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

式(18)~(19)中:由于我们将虚拟节点的负荷看成电源,所以要将 S_{Gi} 取负。

这种网损分摊模式通过顺流跟踪将全网网损归算到负荷,由负荷承担全部的网损,称为网损分摊的顺流法。

4 网损的双向分摊模式

上面两种模式都是仅对电厂或负荷进行网损分摊,忽视了两者都对网损产生造成贡献的事实,无法体现由于负荷、发电机或供电路径的不同导致的电网网损的变化,从而使得电源对负荷或负荷对电源在输电网损方面进行了程度不同的补贴。

本文提出了一种面向元件的网损分摊模式,基本思想是:每个元件上的网损的 α 份额分配给利用该线路的发电机,剩下的 $(1-\alpha)$ 分配给由它供电的负荷。 $\alpha=0$ 时,可由电网运营机构规定,也可由电厂和负荷协商; $\alpha=0$,即为网损分摊的顺流模式; $\alpha=1$,即为网损分摊的回溯模式。为体现电厂和负荷均对网损的产生造成了贡献,可由电厂和负荷承担每个元件网损的一半,即取 $\alpha=0.5$ 。

对电网的虚拟负荷元件 S_{Li} ($i = n+1, n+2, \dots, n+m$),由回溯法确定发电机 k 对它贡献的潮流分量为 $S_{Li,Gk}$,则发电机应承担的网损应为 $S_{Li,Gk}$ 。对全网全部元件求和,得发电机 k 应承担的总网损为:

$$S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

对电网的虚拟电源元件 S_{Gi} ($i = n+1, n+2, \dots, n+m$)。由跟踪法确定节点 k 的负荷由它供应的功率为 $S_{Gi,Lk}$,则负荷应承担此元件的网损应为

$(1-\alpha) S_{Gi,Lk}$ 。对电网全部元件求和,得负荷 k 应承担的总输电网损为:

$$S_{Lk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} S_{Gi,Lk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{(1-\alpha) S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (21)$$

这种方法是由电厂和负荷共同承担电网中每个元件的网损,故称为网损分摊的双向模式。

5 数值仿真

为便于比较,这里采用文献[3]的一个4节点网络作为例子。

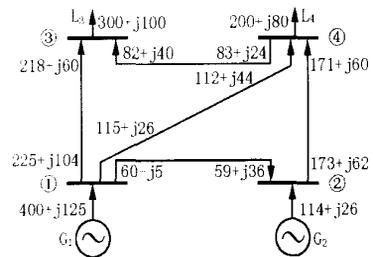


图2 4节点网络的潮流分布图

Fig. 2 Power flow of four-bus network

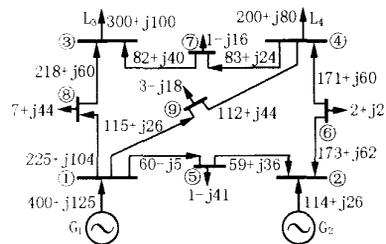


图3 增加虚拟节点后的潮流分布图

Fig. 3 Power flow with fictitious line buses

由式(5)~(8),可计算出各个发电机组对各负荷的贡献,如表1。

表1 发电机复功率的分布

负荷	G ₁	G ₂
L ₃	266.87 + j89.05	33.13 + j10.95
L ₄	120.1 + j59.95	79.90 + j20.05
L ₅	1 - j41	0
L ₆	0.59 + j0.89	1.42 + j1.11
L ₇	1.44 - j9.89	-0.44 - j6.11
L ₈	7 + j44	0
L ₉	3 - j18	0

由式(13)~(17),可计算出各个发电机组对各负荷的贡献,如表2。

表2 负荷复功率的分布

Tab.2 Distribution of load complex power

发电机	L_3	L_4
G_1	$275.45 + j106.46$	$124.55 + j18.54$
G_2	$33.11 + j5.12$	$80.89 + j20.88$
G_3	$-0.54 - j11.74$	$1.54 - j29.26$
G_6	$0.61 + j0.53$	$1.39 + j1.47$
G_7	$1 - j16$	0
G_8	$7 + j44$	0
G_9	$0.49 - j5.21$	$2.51 - j12.79$

由式(9)、(18)、(20)、(21),取 $\alpha = 0.5$,得各方法中各输电网用户应承担的网损份额。

表3 本文方法的网损分摊结果

Tab.3 Loss allocation results using the proposed method

方法	G_1	G_2	L_3	L_4
回溯法	$13.03 - j24.00$	$0.97 - j5.00$	0	0
顺流法	0	0	$8.56 + j11.59$	$5.44 - j40.59$
双向法	$6.51 - j12.00$	$0.49 - j2.50$	$4.28 + j5.79$	$2.72 - j20.29$

文献[3]使用有功与无功解耦的方法获得的网损分摊结果如表4。

表4 传统方法的网损分摊结果

Tab.4 Loss allocation using the conventional method

方法	G_1	G_2	L_3	L_4
回溯法	12.28	1.72	0	0
跟踪法	0	0	9.76	4.24

对比表3、4,可发现以下两个特点:

1) 使用复功率追踪方法可获得更准确的有功网损分摊结果。以回溯法为例,本文方法中 G_1 、 G_2 的分摊额分别为 13.027、0.973 41,而文献[1]中分别为 12.28、1.72。即在本文方法中, G_1 的分摊额上升了, G_2 的分摊额下降了。考察 G_1 、 G_2 的功率因数,可发现 G_1 的功率因数要比 G_2 的功率因数低,因此 G_1 的分摊额上升了。因无功功率亦可引起有功网损,因此利用复功率追踪的方法获得的网损分摊结果较为合理。

2) 采用回溯法分摊,负荷的分摊额为 0,完全为发电机所补贴;而采用跟踪法分摊则正好相反。利用双向分摊方法可消除上两种模式中的交叉补贴。

鉴于本文增加了与线路数相等的虚拟节点,要求解 $(n+m) \times (n+m)$ 阶矩阵的逆阵,应用于大规模电网求解时将会消耗大量的时间。但当网络没有

环流时,可以按文献[1]的方法,通过递归搜索来为各节点重新编号,这时矩阵 A_u 、 A_d 将会是一个上三角或下三角矩阵。对这种矩阵可以不通过显式求逆,而通过简单的递归迭代运算获得逆阵的各元素,这将极大地提高计算速度。

6 讨论

1) 应该注意到按复比例共享原则分摊网损的方法并不是在所有情况下都是合理的。例如出于电网安全运行的要求或出于调整网络潮流的要求,调度可能要求一些电厂多发无功。在传统电力调度方式下,电厂是不会从其所发的无功中获得收益的,如果按复比例分摊网损,这些电厂还要为其造成的网损付费,这显然是不合理的。

但在电力市场环境下,无功也将建立市场,电厂也会从其所发出的无功中获得收益,这时根据复比例共享原则向电厂分摊有功网损就有一定的合理性,因为无功功率也会引起有功网损。因此,在建立了无功市场的前提下,根据复比例共享原则向电厂分摊网损的作法是合理的。

2) 按复功率之比分摊网损方法还会造成一种难以让用户接受的“无中生有”现象:即一条线路中没有无功损耗,但是按复比例分摊后某一用户却分摊到了正的无功损耗^[9]。

但是,本文认为这种现象不会让用户额外付费。虽然按复比例分摊方法在计算过程中部分用户可能分摊到额外的无功网损,但本文的方法只是对网损的有功部分进行分摊,各用户均不用为无功网损付费,因此“无中生有”并不会让这部分用户额外付费。从另一方面来看,“线路有功功率的损耗不仅与线路有功功率有关,而且与无功功率有关”^[10],采用按复比例分摊的方法可以同时考虑各用户的有功功率与无功功率对网损造成的影响,获得的分摊结果更合理了。尽管不存在一个绝对正确的网损分摊方法^[9],但从计算的复杂度与所获的结果的准确程度来看,按复比例分摊的方法仍不失为一种好方法。

7 结论

本文讨论了基于复功率追踪的网损分摊模式,包括顺、逆流追踪模式,并将它们应用到网损的双向分摊模式中,获得了较好的效果,可以应用于输电计费软件中。

参考文献:

- [1] Conejo A J, Arroyo J M, Alguacil N. Transmission Loss Allocation: A Comparison of Different Practical Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3):571-576.
- [2] 吴政球(WU Zheng-qiu). 关于网损分摊公平性的思考(Notes on the Reasonableness of Loss Allocation)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002,26(17):24-26.
- [3] Bialek J. Tracing the Flow of Electricity[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1996,143(4):313-320.
- [4] Bialek J. Topological Generation and Load Distribution Factors for Supplement Charge Allocation in Transmission Open Access[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3):1185-1193.
- [5] 于继来,柳焯(YU Ji-lai, LIU Zhuo). 基于网络状态严格等值条件下的网损分摊分析(Loss Allocation with Strict Equivalence of the Network State)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2001,25(21):37-42.
- [6] SUN Hong-bo, Yu D C, ZHEN Qiong-lin. AC Power Flow Tracing in Transmission Networks[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting,2000. 1715-1720.
- [7] 李志民,潘明惠,杨松岩,等(LI Zhi-min, PAN Ming-hui, YANG Song-yan, et al). 跟踪潮流的理论研究(Study on Tracing Power Flow)[J]. 中国电力(Electric Power),2000,22(11):41-42.
- [8] 彭建春,刘卫华,陈景怀(PENG Jian-chun, LIU Wei-hua, CHEN Jing-huai). 面向全电网用户的输电费用分配模式与仿真研究(Modes and Simulations of User-oriented Transmission Cost Allocation)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(22):13-17.
- [9] 常乃超,郭志忠(CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong). 网损分摊问题的思考(Pondering on the Loss Allocation Problem)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2003,23(4):43-47.
- [10] 李卫东,魏立明,孙辉,等(LI Wei-dong, WEI Li-ming, SUN Hui, et al). 潮流追踪算法比较研究(Research on Comparison of Power Flow Tracing Methods)[J]. 大连理工大学学报(Journal of Dalian University of Technology),2002,42(4):491-497.

收稿日期: 2003-08-14; 修回日期: 2003-12-23

作者简介:

伍文城(1977-),男,硕士,研究方向为电力市场、智能控制技术;

张友刚(1974-),男,博士,研究方向为现代控制理论;

陈辉(1974-),男,硕士,研究方向为电力系统信息化技术。

Discussion on the methods for loss allocation using complex power tracing

WU Wen-cheng¹, ZHANG You-gang¹, CHEN Hui², XIAO Jian¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 600031, China;

2. Northern Star Information Technology Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper first points out that the loss allocation method, which is based on the active power and reactive power decoupled tracing, is not reasonable. Based on the complex sharing principle, a complex power tracing based loss allocation method is proposed. This method allocates all the loss to generators employing the upstream-tracing algorithm, and distributes all the loss to loads using the downstream-tracing algorithm. The bi-directional allocation method, namely each component's transmission loss in the network is shared by both the generators and loads, is also put forward. A numerical case shows that the proposed method is superior to the conventional one and can eliminate the compensation between the generators and loads.

Key words: electricity market; loss allocation; power flow tracing

更正

本刊 2004 年第 11 期广告前插 8“GRPOUP”应为“GROUP”,特此更正。