

文章编号:1000-582X(2004)07-0045-05

## 潮流跟踪算法综述\*

马玲, 谢开贵, 周家启, 周平, 赵渊, 赵霞

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**电力市场中,为提高输电的透明度,需要对网络中功率的组成及输电设备的利用份额进行分析和计算,因此,潮流跟踪算法被广泛研究。对近年来提出的潮流跟踪算法进行了综合比较分析,根据所提出的分摊原则,将算法分成:功率跟踪法、电流跟踪法和功率解析法,分别进行阐述,指出了现存算法中值得借鉴的地方和不足之处。最后,对潮流跟踪算法在电力系统中的应用和算法的发展方向也进行了阐述,为算法的进一步研究提供了一定的参考。

**关键词:**电力市场;转运;潮流跟踪;输电定价;成本分摊

**中图分类号:**TM711

**文献标识码:**A

电网在电力系统中处于核心的地位,而提供转运业务(wheeling)是市场化电网的一项基本功能。电力市场环境下,如何将输电费用和网络损耗公平、合理地分摊给发电方和电力用户,并基于此科学地制定电价,是电网转运业务分析时必需解决的问题,也是网络优化运行和电力市场的核心问题。

转运成本需在各项转运业务中合理分摊,尽量减少相互间的补贴,这是进行输电费用分摊的基本原则。分摊结果将影响不同市场参与者的成本、收益与决策,进而影响电力系统的经济、安全运行。因此,公平、合理的分摊方法是电力市场研究中很重要的一个方面。

目前,输电费用分摊可分为3类<sup>[1]</sup>:1)非潮流法,如:邮票法、合同路径法等;2)潮流灵敏度分析法,如:边界潮流法、功率距离法等;3)潮流跟踪法(Power flow tracing algorithm)。其中,邮票法和合同路径法最为粗糙;潮流灵敏度方法提供了非常强烈的经济信号以促使输电资源的经济利用,但是用户对输电线路潮流的灵敏度可正可负,不一定能保证收支平衡;潮流跟踪法确定的分摊系数总是正的,能够保证收支平衡<sup>[2]</sup>,并满足输电费用分摊的各项要求,因此潮流跟踪法近来得到了广泛的关注,已成为研究的热点。

笔者首先对目前提出的潮流跟踪算法进行了归类、分析和比较,得出了一些有益的结论,并指出潮流

跟踪在电力系统中的潜在应用,最后对建模及实用化过程中应进一步考虑的问题进行了讨论。

### 1 潮流跟踪算法比较分析

潮流跟踪(power flow tracing)即是在特定的运行状态下,通过潮流分析和计算,明确发电机或负荷功率在输电元件中的分布情况,据此来度量它们对输电网络的使用程度,为收费提供理论依据。潮流跟踪的关键是提出科学的模型和分摊原则,合理地在发电方和电力用户间分摊输电费用和网损。根据建模机制和分摊原则的不同,可将潮流跟踪算法分为:功率跟踪法<sup>[3-11]</sup>、电流跟踪法<sup>[12-13]</sup>和功率解析法<sup>[15-21]</sup>。

#### 1.1 功率跟踪法

对潮流跟踪算法的研究是从文献[3]开始的,文中提出了功率跟踪法的重要原则:比例分摊原则(proportional sharing principle)。

比例分摊原则虽然没有理论依据,但简单直观,易于被用户接受。

从本质上讲,按功率跟踪的方法就是拓扑分析方法。方法的基本思想是:在交流潮流计算的基础上,将有损网络等效成无损网络,将有功、无功解耦形成无损的有功功率有向图和无损的无功功率有向图,然后按比例分摊原则进行功率跟踪。根据“流”的方向,可将

\* 收稿日期:2004-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50307015);重庆市科委科技计划资助项目(2003-7951)

作者简介:马玲(1978-),女,辽宁绥中人,重庆大学硕士研究生,从事电力系统规划及可靠性、电力市场输电定价方面的研究。

功率跟踪分为:顺流跟踪法(downstream-looking algorithm)和逆流跟踪法(upstream-looking algorithm)。

无损网络的形成、跟踪可行路径的探测及网络自环流的处理是功率跟踪法必须首先解决的问题,目前对此方法的研究也是基于这3个问题展开的。

### 1.1.1 无损网络的形成

如果系统无损耗,则根据比例分摊原则可以方便地求得系统中潮流的分布情况,但由于实际系统中损耗的存在,必须充分考虑有功功率、无功功率对损耗的影响,将有损网络进行合理的等效。

文献[3]中提出的方法只是简单的将有功、无功功率分离,忽略了有功、无功潮流之间的相互影响。文献[9-10]考虑到有功、无功潮流之间的耦合性,通过增加虚拟节点的方法将支路损耗等值,线路的充电功率等效为无功电源,将系统简化成加权有向信号流图的形式,应用图论的方法分别对有功、无功潮流进行跟踪。但这种增加虚拟节点的方法无疑会增加网络的阶数,加大计算量,对于拥有众多节点的电网公司来讲,难以满足计算速度的要求。文献[11]介绍了一种适合大系统的计算方法,该方法根据节点的性质和输电元件中功率的流动方向将系统分成若干电源公共域(common),从而将一个复杂的潮流分布图化简为一个有向潮流分布简图(directed, acyclic graph)。文中虽没有对算法的使用条件作准确的阐述,但所提算法为大电网的潮流跟踪提供了较好的思路。

### 1.1.2 可行路径的跟踪

无论是顺流跟踪还是逆流跟踪,都需要首先在拓扑有向图中确定发电机节点和负荷节点,同时探测跟踪的可行路径。文献[4]提出用图论的方法,在节点关联矩阵的基础上确定发电机节点、负荷节点和跟踪的可行路径。方法的不足是不能解决自环流网络的潮流跟踪问题。文献[6]基于有向通路的思想,从发电机节点出发,找到发电机到每个负荷点的所有有向通路,计算中不必进行复杂的矩阵求逆<sup>[3]</sup>,且可以有针对性的分析某台发电机或某个负荷的分配情况。但事实上,当网络规模增大,寻找有向路的过程还是相当复杂的。

以上方法实际上只适合网络中有功无功功率方向一致的情况,文献[8]考虑到实际网络中两者的流动方向通常并不一致,据此提出一种潮流跟踪迭代算法。算法的前提是:一般情况下,无功功率流动方向与电网中节点电压幅值的下降方向一致,而有功功率流动方向与节点电压角度的下降方向一致。但是我们注意到,实际电网中有功无功潮流的流动方向并不经常满

足以上假设,因此算法的应用受到一定程度的制约。

### 1.1.3 自环流问题

电力系统中,当环网中变压器变比不匹配、支路阻抗异常及故障运行等,系统中可能出现循环功率,即形成自环流网络。当网络存在自环流时,前述方法几乎难于对其进行潮流跟踪计算,文献[5]分析了循环功率产生的原因,并通过求解最优潮流来消除自环流,但是文中并没有给出网络存在自环流时的跟踪算法。文献[7]应用级数理论,求解了网络存在自环流时的潮流跟踪问题,文中先给出了自环流系数的定义和相关性质,并在此基础上证明了自环流潮流跟踪算法的收敛性。

### 1.2 电流跟踪法

功率在系统中流动时存在损失,准确进行潮流追踪有时比较困难,而电流在系统中无损耗,因此相应地提了电流跟踪法。

文献[12]的贡献是提出了电流跟踪法的思想:在潮流计算的基础上,通过跟踪电流来确定每个电源向每个负荷提供的电流,最后再将电流转化为功率。但这种思想并没有在实际算法中得到很好的发挥。

文献[13]从电路的基本理论出发,对功率损耗的分摊原理进行了探讨。方法的前提是电流分量在支路首末端相等,但在实际系统中,由于分布电容、补偿元件等的存在,网络中线路的首末端电流并不相等。也就是说,文中所提出的“支路”和实际系统的“线路”概念并不一致。而对于实际网络,人们所关心的是电源对线路的利用份额和线路上的损耗分摊情况,求等效后“支路”的利用份额和损耗分摊是没有意义的。因此算法并没有从根本上解决有功、无功耦合及功率损耗问题。

从本质上讲,电流跟踪法也是基于比例分摊原则,即将比例分摊原则中的“流”由潮流换成了电流。

### 1.3 功率解析法

无论是功率跟踪法还是电流跟踪法,其基本思想是按比例分摊原则确定线路功率(或损耗功率)对发电机(或负荷)的一个分布系数,严格地说,还不能从线路本身出发考察功率的分布机理,因此,很多文章提出对线路传输的功率进行严格解析,分析线路中各转运业务的功率(或功率损耗)分量,进而描述转运业务对线路的使用程度,据此分摊输电费用。功率解析法的关键是如何确定线路中的功率组成和科学的描述线路的使用程度。

目前,对线路是用程度的描述大致存在两种观点:即用线路中各项转运业务的功率分量描述线路的使用

程度<sup>[14-17]</sup>和用线路中各项转运业务的功率损耗分量来描述线路的使用程度<sup>[18-21]</sup>。

1)用各项转运业务“引起”的功率来描述线路的使用程度。文献[14]和文献[17]都提出用线路的转运功率分量来描述各项转运业务对线路的使用程度,并在相关文献中给出了功率分量和损耗分量的计算方法。

文献[15-16]应用叠加定理,对实际电路进行等值,文中虽然采用了严格的等值条件,但是忽略了叠加定理的应用条件是线性元件,在实际系统中还存在许多非线性元件,如 FACTS 元件等。网损的计算也只计及了阻抗支路,而实际等效系统中的对地导纳中也存在功率损耗,这些都导致了算法的局限。

2)用各项转运业务“引起”的功率损耗来描述线路的使用程度。文献[18]给出了发电机和负荷对元件使用份额的新定义:发电机(负荷)对元件的使用份

额等于该发电机(负荷)在该元件上引起的有功损耗分量占该元件上的总有功损耗的比例。定义反映了各转运业务对输电线路热稳定容量的利用率。基于全微分和定积分的概念,作者在文献[19]中给出了支路功率和功率损耗分量的计算方法,但文中忽略了导纳支路中的损耗,因此文献[20-21]在文献[19]的基础上,对输电元件(线路或变压器)的模型进行了改进,不只解析阻抗支路中功率损耗,还考虑了导纳支路中的功率损耗,将所有的功率损耗按照一个整体加以考虑,整个推导过程中没有进行假设和省略,保证了算法的准确性。

综上所述可以看出,由于建模原理、计及因素等的差别产生了不同算法,并导致了分摊原则上的差别,各种方法并没有从本质上对分摊的原则达成共识,表 1 归纳了这些算法的原理和特点。

表 1 潮流跟踪算法比较

方法	建模原理	网络因素处理方法		对电网特点的适应性				结 论
		网 损	充电功率	有功无功耦合	非线性	大规模	自环流	
功率跟踪法	[3] 节点关联矩阵	等效负荷	-	-	-	×	×	按功率比值分摊综合成本
	[4] 节点关联矩阵	等效负荷	无功电源	-	-	-	×	按功率比值分摊综合成本
	[6] 有向通路	等效负荷	等效负荷	-	-	-	×	按功率比值分摊综合成本
	[7] 级数理论	等效负荷	等效负荷	-	△	△	△	按功率比值分摊综合成本
	[8] 迭代算法	计入	-	△	△	△	-	按复功率模的比值分摊综合成本
	[9] 有向通路	虚拟节点	无功电源	-	-	-	-	按复功率模的比值分摊综合成本
	[10] 有向通路	虚拟节点	无功电源	△	△	×	-	按复功率模的比值分摊综合成本
[11] 公共域	部分计入	-	-	-	-	△	-	按复功率模的比值分摊综合成本
电流跟踪法	[12] 有功/无功电流	计入	计入	△	-	×	×	-
	[13] 有向路	计入	-	-	×	×	×	按电流分量比例分摊支路上的功率损耗
功率解析法	[15] 叠加定理	计入	计入	△	×	-	-	按线路上功率分量分摊综合成本
	[16] 叠加定理	计入	电流源	-	×	-	-	按线路上功率损耗分量分摊网损
	[18] 支路功率分量理论	只计入阻抗支路	计入	△	△	-	-	按转运功率分量计算对电力设备的使用份额
	[20] 支路功率分量理论	计入	计入	△	△	-	-	使用份额按转运功率分量计算
[21] 分量理论	计入	计入	△	△	-	-	使用份额按转运功率分量计算	

说明:“△”代表适应;“-”代表未考虑,即作者并未在这方面进行论证或得出结论;“×”代表不适应。

从表 1 可以看出,尽管各种方法在建模原理、网络因素处理方法、计及因素及对网络特点的适应性上各有短长,不能直接比较其优劣,但有一些值得关注的特点和共性问题值得一提:

1)从方法的演变,我们可以看出,算法的发展经历了一个从粗糙到精细,从简单到复杂的过程,例如:从忽略损耗到计及损耗;从只考虑有功到综合考虑有

功和无功的影响;从简单的按比例分摊原则到对功率进行解析,原有算法不断被改进。但是,目前的方法还没有提出一个令人满意的分配方案,算法还停留在讨论阶段,所提出的分摊原则并没有得到人们的共识。

2)元件模型的处理上,有些算法由于忽略了网络的实际特点,如:有功、无功的耦合作用、网损及线路充电功率、非线性、自环流问题等,导致算法先天不足。

因此,必须充分考虑到这些因素的影响,这是对系统进行合理等效的前提。

3)为提高供电质量、增加系统稳定性,电力系统中需要增设无功补偿设备对无功进行平衡,无功供应原则上就地平衡,在这种情况下,有些算法将无功补偿设备等效成无功电源参与输电费用的分摊,提供无功补偿的用户不仅得不到奖励,反而会为这部分无功支付转运费用,这样做不仅是不公平的,而且可能降低无功补偿的积极性,危及系统稳定。因此,必需处理好这方面的问题。

## 2 需进一步研究的问题

从表1和前面的分析可以看出,潮流跟踪算法在建模机理和分摊原则上还存在许多问题,为使潮流跟踪算法的研究和应用工作更上一个台阶,还需要重点研究以下几个问题:

1)使算法更具经济学信息:实行市场机制以后,电力系统各用户的行为很容易被经济利益左右,因此更要求算法能提供较强的经济性信号。潮流跟踪算法虽然可以方便地分析输电设备的利用份额,在各成员关系上做到公平合理,但是却不能为市场成员提供经济学信号,用户可能要为电网公司不合理的投资无条件的付费。因此必须对算法加以改进,如采用与微增定价法相结合的方法,增强算法的有效性。

2)与电力市场的实际情况相结合:不同的电力市场存在不同的运营机制及交易模式,如电力联营(pool)模式或双边合同交易等。算法应与电力市场实际情况相结合,费用的分摊也要根据转运类型的不同,选择分摊给发电机、用户或两者皆是,建立适应运营机制和交易模式的分摊原则。

3)研究新问题:潮流跟踪理论的研究和分摊原则的确立应该适应新环境、新技术对电力系统分析的要求,发现新问题。电力系统中元件复杂,需要考虑的因素很多,且随着网络规模的扩大和联网进程的加快,出现的问题将越来越复杂,如非线性元件的处理、直流输电线路的问题、网络阻塞问题等,只有充分考虑到这些因素,才能制定出公平合理的分摊原则。

## 3 潮流跟踪算法应用

目前,潮流跟踪算法主要在以下几个方面发挥作用:

1)输电成本分摊<sup>[3-11,15,18-21]</sup>。综合成本法输电定价、标准长期边际成本法计算转运费用时,都需要将容量成本和运行成本在多项转运业务间进行合理分

配,以形成最终面向市场成员的输电价格。

2)网损分摊<sup>[13,16,18-24]</sup>。通过潮流跟踪,确定的线路中功率损耗是由哪些发电机及负荷引起的,从而可将损耗公平地分摊给市场成员。

3)阻塞成本分摊<sup>[25-26]</sup>。输电网输电能力不足时将导致输电阻塞,市场条件下,必须通过阻塞管理消除阻塞并将阻塞费用分摊到市场成员。利用潮流跟踪结果,全面考虑发电和负荷对引起阻塞的作用,实现阻塞费用在市场成员之间的公平分摊,促进输电网的有效使用。

4)无功功率定价<sup>[27]</sup>。无功功率服务收费的一个必要信息是要确定系统各无功负荷用了哪些无功源的无功功率以及这些无功功率在网络中的实际传输路径,从而才能把无功源的生产成本和无功输送成本合理地分摊到用户。这些信息可以通过潮流跟踪分析得到。

5)电力系统安全控制。潮流跟踪虽然是在建立电力市场过程中提出的,但它也可用于电力系统的安全控制中。比如,在确定预想事故校正方案时,在确定在哪个节点削负荷或调整发电量以使线路不过载、电压不越限时,即可应用潮流跟踪信息。

## 4 结束语

笔者对已提出的潮流跟踪算法进行归类、分析和比较,并对算法的应用和发展方向进行了归纳总结。通过分析,明确了电力市场条件下,要想公平、合理地在各项转运业务间进行分摊,并尽量减小相互间的补贴,必需将输电费用的分摊方法建立在严格的理论基础,充分结合电力系统的实际情况、实际特点进行综合分析,两者必需紧密结合,缺一不可。

作为一个正在发展的研究课题,潮流跟踪算法的研究在很多问题上尚未达成共识,新的观点算法层出不穷,本文篇幅有限,不可能对所有的问题进行更加细致的讨论,但希望能通过本文的讨论对潮流跟踪问题的研究与应用提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 汤振飞,唐国庆,于尔铿. 电力市场输电定价[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):91-95.
- [2] BIALEK J. Topological generation and load distribution factors for supplement cost allocation in transmission open access[J]. IEEE Trans on Power System,1997,12(3):1 185-1 193.
- [3] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceeding - Generation Transmission Distribution, 1996,143(4):313-320.
- [4] WU F F, NI YIXIN. Power transfer allocation for open ac-

- cess using graph theory[J]. IEEE Trans on Power System, 1997, 12(1): 52 - 60.
- [5] WEI PING, YUAN BIN, NI YIXIN, et al. Power flow tracing for transmission open access[A]. Proceedings of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies [C]. London: DRPT, 2000. 476 - 481.
- [6] 谢开贵, 周家启. 基于有向通路的潮流跟踪新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 87 - 91.
- [7] 谢开贵, 周家启. 自环流网络潮流跟踪算法[J]. 中国科学(E辑), 2003, 33(1): 74 - 81.
- [8] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 潮流追踪迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 38 - 42.
- [9] 孙洪波, 常宝波, 周家启. 网损分摊决策研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(2): 59 - 62.
- [10] SUN HONGBO, YU D C, ZHENG QIONGLIN. AC power flow tracing in transmission networks[J]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, 3(3): 1 715 - 1 720.
- [11] KIRSCHEN D, ALLAB R, STRBAC G. Contribution of individual generators to loads and flows[J]. IEEE Trans on Power System, 1997, 12(1): 52 - 60.
- [12] KIRSCHEN D, STRBAC G. Tracing active and reactive power between generators and loads using real and imaginary currents[J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(4): 1 312 - 1 319.
- [13] 王锡凡, 王秀丽. 电流追踪问题[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(3): 265 - 270.
- [14] 乔振宇, 陈学允, 张粒子, 等. 输电线路中转运功率分量的计算及应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 19 - 23.
- [15] 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.
- [16] RERA R, VARGAS A. Electricity tracing and loss allocation methods based on electric concepts[J]. IEE Proceeding - Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(6): 518 - 522.
- [17] 吴政球. 非线性函数贡献因子理论及其在应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 32 - 34.
- [18] 彭建春, 江辉, 王耀南, 等. 直接考虑 P-Q 耦合的输电费用分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 20 - 25.
- [19] 彭建春, 江辉, 成连生. 复功率电源的支路功率分量理论[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 1 - 5.
- [20] PENG J C, JIANG H. Contributions of individual generators to complex power losses and flows - Part I: fundamental theory[J]. IEE Proceeding - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 182 - 185.
- [21] PENG J C, JIANG H. Contributions of individual generators to complex power losses and flows - Part II: Algorithm and simulations[J]. IEE Proceeding - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 186 - 190.
- [22] 吴政球, 郭志忠. 非合同交易电力市场网损和输电设备瞬时使用程度分摊[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 36 - 40.
- [23] 吴政球. 关于网损分摊公平性的思考[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 24 - 26.
- [24] GOMEZ EXPOSITO A, RIQUELME SANTOS J M, GONZALEZ GARCIA T, et al. Fair allocation of transmission power losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 184 - 188.
- [25] 江辉, 欧亚平. 面向全电网用户的阻塞成本分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(11): 26 - 29.
- [26] JIAN YANG, ANDERSON M D. Tracing the flow of power in transmission networks for use - of - transmission - system charges and congestion management[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting [C]. New York: IEEE, 1999. 399 - 405.
- [27] 戴彦, 倪以信. 基于潮流组成分析及成本分摊的无功功率电价[J]. 电力系统自动化, 2000, 9(25): 13 - 17.

## A Survey of Power Flow Tracing Algorithm

MA Ling, XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi, ZHOU Ping, ZHAO Yuan, ZHAO Xia

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Competition in the electricity markets requires identifying the responsibility in the use of transmission networks or the associated effects. Power Flow Tracing algorithms have been developed recently to enhance the transparency of transmission system. This paper focuses on power flow tracing procedures and provides a detailed comparison of three classified algorithms: 1) power flow tracing based methods; 2) current tracing based methods; and 3) power flow analytic methods. The advantage and disadvantage of each method are discussed. Finally, the potential applications and development of the methodology is presented for furthermore research.

**Key words:** electricity market; wheeling; power flow tracing; transmission pricing; cost allocation