

电力系统功率跟踪方法综述

李健¹, 刘明波¹, 刘斌²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 大亚湾核电站设备管理处, 广东 深圳 518124)

摘要: 对电力市场环境功率跟踪的重要性进行分析, 详细讨论了两种典型的、基于比例共享原则的功率跟踪方法: 基于有功无功解耦的功率跟踪法和基于复数电流的功率跟踪法, 并在此基础上将两者进行了比较, 指出了现有功率跟踪法的不足和今后的发展方向。

关键词: 电力市场; 功率跟踪; 有功无功解耦; 复数电流

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)06-0001-05

1 引言

80年代以前, 电力系统通常被看成是一个统一的整体。然而, 随着社会的发展和技术的进步, 传统的自上而下、垄断式的电力系统管理模式受到了挑战。在电力企业中引入竞争机制, 建立电力商品市场, 将发电、输电、配电环节相分离, 努力降低电能成本, 提高生产效率, 提高用户满意程度, 已成为世界各国电力工业发展的趋势。

传统的电力系统经营模式是垄断模式, 即发电、输电、配电统一垄断经营。在这种经营模式下, 由电力公司统一经营, 不区分发电费、输电费、配电费, 各种费用都简单地转嫁给最终用户, 因而发电、输电、配电三者之间不会有利益冲突。而到了将来, 电力系统的经营模式将转变为电网开放模式, 即发电竞争, 输电和配电开放。在这种经营模式下, 各个发电厂需竞价上网; 输电公司向独立电厂或电力批发商提供服务, 或为其他电力公司提供转运服务; 用户有了更多的自主权, 可以根据电网服务供应商所提供的服务质量来选择服务供应商, 同时获取较低的价格。在这种情况下, 发电公司、输电公司、配电公司三者之间有了利益上的冲突。由于存在利益上的冲突, 因此这三者都想知道这样一些问题: 发电商想知道本厂的电能都去了哪里, 本厂的电能对输电线及输电设备的利用情况如何, 本厂向哪些用户提供电能, 可以使电能的损耗最少, 使本厂的收益最大? 输电公司想知道各个发电厂对输电线路及输电设备的利用情况? 用户想知道整个电网的潮流分布及在各种运行方式下他们对电网输变电设备的利用份额是多少, 网损应如何分摊等。为了解决上述问题, 增加电力市场的透明度, 充分显示电力市场环境网损分摊的公平性, 需要对线路潮流进行更为详细的分析。目前, 常规的潮流计算方法主要是根据系统的结构

和参数以及系统当前的负荷状态来计算出系统各个母线的电压和各个支路流过的功率, 但无法知道线路上的功率都是由哪些发电厂供给的, 因此有必要进行功率跟踪。所谓功率跟踪就是明确线路潮流是由哪些负荷引起的, 或者由哪些发电机提供的。从上述定义可以看出, 功率跟踪是系统处于稳定时刻的潮流的进一步细化。本文首先介绍功率跟踪的基本前提比例共享原则, 然后介绍两种典型的功率跟踪的方法: (1) 基于有功无功潮流解耦的功率跟踪; (2) 基于复数电流的功率跟踪。

2 比例共享原则

由功率跟踪的定义知功率跟踪就是明确线路潮流是由哪些负荷引起的, 或者由哪些发电机提供的。但实际上对于某一个特定的负荷, 我们无法用实际的计量设备测出各个电源向这个负荷提供的功率, 因此在进行功率跟踪时, 一般均采用比例共享原则, 然后在此基础上, 计算各个电源向该负荷提供的功率。下面通过一个简单的例子说明比例共享原则。

设有四条线路与节点 i 相连, 两条流进, 两条流出。如图 1 所示。

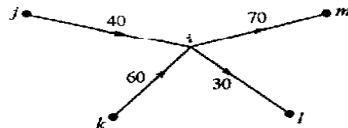


图 1 比例共享原则

其中, j, k, l, m 为节点。

由图 1, 我们可以看出节点 i 的输入功率为 $P_i = 40 + 60 = 100\text{MW}$ 。在这 100MW 中有 40% 的有功功率是由线路 $j-i$ 提供的, 有 60% 的有功功率是由线路 $k-i$ 提供的。由于功率是不可以区分的, 而且与节点 i 相连的各条线路上的输出功率是由线路两端

的电压差和线路的阻抗决定的,因此,假设节点的任一支路输入功率在流出功率支路中的分配与其实际功率成正比,于是可以计算出线路 $i-m$ 的输出功率 70MW 中,有 $70 \times 40/100 = 28\text{MW}$ 是由线路 $j-i$ 提供的,有 $70 \times 60/100 = 42\text{MW}$ 是由 $k-i$ 提供的;而线路 $i-l$ 的输出功率 30MW 中有 $30 \times 40/100 = 12\text{MW}$ 是由线路 $j-i$ 提供的,有 $30 \times 60/100 = 18\text{MW}$ 是由线路 $k-i$ 提供的。以上是比例共享原则的基本原则。比例共享原则虽然没有严格的理论依据,但简单直观、公平合理,且分配值恒为正值,易于被用户接受。

3 基于有功无功解耦的功率跟踪

这种方法的基本思想是:首先,在标准潮流计算的基础上,形成复功率流图,对有功无功进行解耦,将复功率流图分解为有功功率流图和无功功率流图,并将有损有功功率流图和有损无功功率流图处理为无损有功功率流图和无损无功功率流图,然后按比例共享原则进行功率跟踪。

由于电力系统通过输电网络将电能送至用户,因此可以把电力网想象为水利网。如果搞清等位线,就可以从每个电源顺流而下至所有负荷或从负荷逆流而上至电源。这样,就能知道某个负荷的电能来自哪些电源或某个电源的电能经哪些输电元件流向哪些负荷。

根据功率跟踪的方向,可将基于有功无功解耦的功率跟踪分为两种,一种是顺着潮流方向跟踪,即顺流跟踪;另一种是逆着潮流方向跟踪,即逆流跟踪。所谓的顺流跟踪是从发电机节点开始,沿着系统实际潮流的流动方向进行跟踪;而逆流跟踪则正好与此相反,它从负荷节点开始,逆着系统实际潮流的流动方向进行跟踪。通过顺流跟踪,可确定电源出力在各负荷中的发配情况;通过逆流跟踪可确定各负荷所需功率在电源中的分配情况。

由于线路传输功率时,总会产生损耗,因此逆流跟踪和顺流跟踪的前提是:首先,对系统进行标准的潮流计算,并求出各个母线电压以及各个线路的潮流,进而形成有损功率流图,然后将有损功率流图变为无损功率流图。

文^[1,2]在处理有损功率流图时,通过把线路电阻、电抗中的损耗和线路充电功率移至线路两端作为等效负荷,将网络等效为无损网。

由于无功功率可产生有功功率损耗,而有功功率可产生无功功率损耗,因此如果潮流跟踪中不考虑有功功率和无功功率之间的交叉影响,就会导致

其计算精度较差。文^[1,2]未考虑此影响。文^[3]对此进行了改进,通过在线路中间增加一虚拟节点来处理有损功率流图。在处理有损有功功率流图时,线路的有功损耗 P_{ij} 被等效为一有功负荷功率接在线路中点,并且 $P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R = P_{ijP} + P_{ijQ}$, 其中 P_{ij} 、 Q_{ij} 为线路 ij 传输的有功功率和无功功率, R 为线路的电阻。从此式可看出,线路的有功损耗考虑了无功功率的影响。同理,在处理有损无功功率流图时,将发电机、静止无功补偿器(容性)作为无功电源,电抗器作为无功负荷,线路充电无功作为无功电源,传送功率所引起的无功损耗作为无功负荷,分别接在线路中点。

将有损流图变为无损流图后,便可进行逆流跟踪或顺流跟踪。下面首先介绍逆流跟踪的基本原理。

设系统由 n 个节点和 m 条支路组成,则节点 i 的净输入功率 P_i 可表示为:

$$P_i = \sum_j^{(u)} |P_{ij}| + P_{Gi} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中 $^{(u)}$ 为所有与节点 i 相连,并向其输入功率的节点集合; P_{ij} 为支路 ji 上输入节点 i 的功率; P_{Gi} 为节点 i 的发电功率。由于该系统为无损系统,因此 $|P_{ij}| = |P_{ji}|$ 。设 $C_{ij} = |P_{ji}|/P_j$, 其中, P_j 为节点 j 的净输入功率。将上式代入(1)式并整理得到:

$$P_i - \sum_j^{(u)} C_{ji} P_j = P_{Gi}$$

或者写为 $A_u P = P_G$ (2)

其中, P_G 为发电机功率列向量, P 为各节点净输入功率向量, A_u 是 $n \times n$ 阶系数矩阵,它反映了线路与各节点净输入功率的关系。其相应的元素为

$$[A_u]_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -C_{ji} = -|P_{ji}|/P_j & j \in ^{(u)}_i \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases}$$

由上式可以看出, A_u 为稀疏不对称矩阵。如果 A_u^{-1} 存在,那么, $P = A_u^{-1} P_G$, P 的第 i 个元素为:

$$P_i = \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式(3)表明第 k 台发电机向节点 i 提供的有功功率。同时由于节点 i 的净输入功率等于节点 i 的输出潮流,即等于节点 i 的负荷需求与所有流出节点 i 的支路功率的总和,所以,节点 i 的负荷需求 P_{Li} 或线路功率 P_{ij} 都可通过 P_i 运用比例共享原则来得其与各发电机功率的关系。求解公式为:

$$|P_{ij}| = \frac{|P_{ij}|}{P_i} P_i = \frac{|P_{ij}|}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad (4)$$

$$P_{Li} = \frac{P_{Li}}{P_i} P_i = \frac{P_{Li}}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式(4)表明对于某一条确定的线路,其上的有功功率是由哪些发电机提供的。式(5)表明对于某一个给定的负荷,它的有功功率都是由哪些发电机提供的。

顺流跟踪的基本原理与逆流跟踪相似,只是顺流跟踪反映了支路功率与负荷功率的关系和发电机功率与负荷功率的关系。

文^[1]详细介绍了逆流跟踪和顺流跟踪的原理,并以这两种方法为基础,给出了网损分摊的公式。

从上面的分析可知,无论是逆流跟踪还是顺流跟踪,都需要在有向功率流图中确定负荷节点和发电机节点,同时探测跟踪的可行路径。文^[2]提出利用节点支路关联矩阵来确定负荷节点、发电机节点和可行路径。确定负荷节点和发电机节点的步骤为:(a)根据系统的有向潮流图形成节点支路关联矩阵,并将该矩阵直接分解为节点输出功率支路关联矩阵和节点输入功率支路关联矩阵,其中节点输出功率支路关联矩阵由节点支路关联矩阵中等于1的元素组成,而节点输入功率支路关联矩阵则由支路关联矩阵中等于-1的元素组成,并将-1改为1;(b)若某节点为负荷节点,则该节点没有任何相关的输出功率支路,并且在输出功率支路关联矩阵中,该节点所在行的元素全部为0;同理,若某节点为发电机节点,则该节点没有任何相关的输入支路,并且在输入功率支路关联矩阵中,该节点所在行的全部元素为0。顺流跟踪中可行路径的探测方法为:从发电机节点开始,消去发电机节点及其关联支路,即在节点输出功率支路关联矩阵和节点输入功率支路关联矩阵中划去与发电机节点对应的行,并在节点输出功率支路关联矩阵中划去与发电机节点对应的行中其值为1的元素所对应的列;然后不断重复这一过程,直到划去所有支路,剩下的节点将是负荷节点。逆流跟踪中可行路径的探测与顺流跟踪相似,只是从负荷节点开始,而且,一般情况下,逆流跟踪的可行路径正好与顺流跟踪的路径相反。

文^[3]提出利用循环迭代法探测跟踪的可行路径。本文以图2(参考图3)为例,描述其探测过程的流程。

第一步,寻找初始可行路径1~2和1~3,并按

被寻找到的顺序排列,即支路1~2在前,支路1~3在后;第二步,检查每一个可行路径的最后一个节点是否接受节点与其关联,从图2可知,节点2有节点4和节点3与其相连,节点3仅有节点4与其相连,然后,将支路1~2延伸为1~2~4,同时在支路1~2的基础上新增另一条支路1~2~3,并将其排到可行路径1~2和1~3的后面,对于支路1~3仅将其延伸为1~3~4;第三步,判断所有可行路径中最后一个节点是否有接受节点与其相关联,如果没有则说明所有可行路径已经找到,否则返回第二步继续搜索。

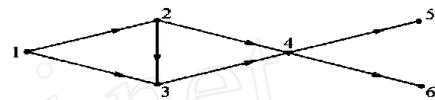


图2 简单网络

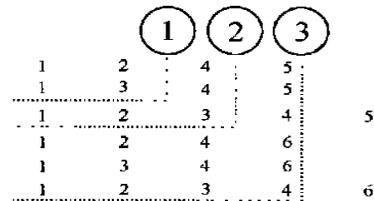


图3 可行路径的搜索过程

文^[4,5]通过消去过程探测跟踪的可行路径。首先,在每次节点消去过程前,都要对剩余节点进行探测以确定起始点(对电源功率进行跟踪)或终止点(对负荷功率进行跟踪);然后消去该起始点或终止点及相应的出线或进线。不断重复上述过程,便可探测出功率跟踪的可行路径。

文^[6]提出并证明了两个定理,明确了一般情况下,在输电网中,节点电压幅值的下降方向和无功功率的流动方向是一致的,节点电压角度的下降方向和有功功率的流动方向是一致的,因此,可以利用节点电压的幅值和角度来探测功率跟踪的可行路径。

尽管逆流跟踪和顺流跟踪原理清晰、简单,但进行功率跟踪时,系统内必须没有自环流。文^[5,6]指出1个没有环流、具有有限节点的系统至少有1个发电机节点和负荷节点,并且对此进行了证明,这保证了逆流跟踪和顺流跟踪的可行性。

4 基于复数电流的功率跟踪

从上面的分析可知,系统输送功率时,总会在线路上产生损耗,而逆流追踪和顺流追踪,又必须考虑这些损耗,因此损耗的处理是逆流追踪和顺流追踪

的难题之一。目前,处理损耗的方法很多,但是并不十分完善。由于电流无损耗,因此有人提出用电流进行功率跟踪。

利用复数电流进行功率跟踪的基本思想是:以标准的潮流计算为起点,然后把所有的功率转化为复数电流,通过追踪这些电流来确定每一个电源向每一个负荷提供了多少电流,最后再将这些电流转化为实际的功率。

电源域:这个电源的电流所能到达的母线组成的区域。在大多数情况下,这个电源域只是网络的一部分,但必须指出,一条母线可能同时属于几个电源域。

电源公共域:由同一电源提供电流的相互连接的母线所组成的区域。每一条母线只能属于一个电源公共域。

连线:连接一个公共域与另一个公共域的输电线路。

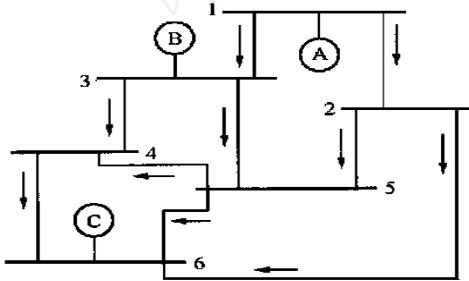


图4 6节点网络

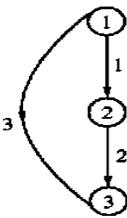


图5 6节点状态图

从图4可看出,电源A的电源域包括系统的所有母线,电源B的电源域包括母线3、4和5,电源C的电源域包括母线6,这说明同一母线可属于多个电源域。同理,电源A的电源公共域为母线1和2,电源B的电源公共域为母线3、4和5,电源C的电源公共域为母线6,并且每条母线只属于一个电源公共域。图5中,连线1是连接电源公共域1和电源公共域2的连线,其包括图4中的线路1~3和2~5,连线2是连接电源公共域2和电源公共域3的连线,其包括图4中的线路4~6和5~6,连线3是连接电源公共域1和电源公共域3的连线,其包括

图4中的线路2~6。

我们可以根据以上的几个概念,将网络图转化为由几个公共域组成的状态图。由于复数电流的实部与虚部互不相关,因而可以将状态图分为实部电流状态图和虚部电流状态图。由于潮流图中有功功率与无功功率的方向不同,从而使得复数电流的实部与虚部的方向也有所不同,因而实部电流状态图中公共域的划分与虚部电流状态图中公共域的划分是不同的。

4.1 负荷电流对电源电流的贡献

在得到状态图后,可根据比例共享原则来确定负荷电流和电源电流的关系。相应的公式为:

$$I_k^n = \sum_j F_{jk}^n + \sum_i S_i^n \quad (6)$$

其中, I_k^n 为流进公共域 k 的电流; S_i^n 为电源 i 的电流; n_k 为状态图中向公共域 k 注入电流的公共域的集合; n_k 为位于公共域 k 内的电源的集合。式(6)表明流进公共域 k 的电流等于公共域 k 内所有电源电流之和再加上其他公共域向公共域 k 注入的电流的和。

$$F_{ijk}^n = C_{ij}^n F_{jk}^n \quad (7)$$

其中, F_{jk}^n 为公共域 j 和公共域 k 之间的连线上的电流; F_{ijk}^n 为电源 i 在公共域 j 和公共域 k 的连线上流过的电流; C_{ij}^n 为电源 i 对公共域 j 的贡献因子。式(7)表明电源 i 在公共域 j 和公共域 k 的连线上流过的电流等于电源 i 对公共域 j 的贡献因子与公共域 j 和公共域 k 的连线上的电流的乘积。

由式(6)和式(7)可得出电源 i 对公共域 k 的贡献因子。如果电源 i 不在公共域 k 内,则 $C_{ik}^n = \frac{\sum_j F_{ijk}^n}{I_k^n}$; 如果电源 i 在公共域 k 内,则 $C_{ik}^n = \frac{S_{in}}{I_k^n}$; 其中,上标 n 的值为 x 或 y 。

4.2 负荷对有功和无功生产的贡献

由于电流没有损耗,电源的电流完全被电源域内的负荷所吸收,因而根据比例共享原则,电源的电流可以表示为电源域内的负荷电流之和。所以有: $I_u^x = \sum_k C_{uk}^x I_k^x$; $I_v^y = \sum_k C_{vk}^y I_k^y$; 下标 u, v 取 x 或 y , D 为电源域。于是发电机的有功功率和无功功率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_g &= \text{Re}(\bar{V}_g \dot{I}_g) = V_g^x I_g^x + V_g^y I_g^y = V_g^x I_{gu}^x + V_g^y I_{gv}^y \\ &= V_g^x I_{gu}^x + V_g^y I_{gv}^y = \sum_k C_{uk}^x I_k^x + \sum_k C_{vk}^y I_k^y \quad (8) \end{aligned}$$

$$Q_g = \text{Im}(\bar{V}_g I_g^*) = V_g^y I_g^x - V_g^x I_g^y = V_g^y \sum_k C_{uk}^x I_k^x - V_g^x \sum_k C_{vk}^y I_k^y \quad (9)$$

其中, g_u, g_v 反映了几种不同设备(如发电机、电容器)偶尔也可以等效为复数电流源,但在进行计算时,则须将每一个电流源按 g_u, g_v 来划分。由上面的两个方程,可以得出负荷 k 向发电机 g 所做的贡献:

$$P_{gk} = \frac{V_g^x \sum_k C_{uk}^x I_k^x + V_g^y \sum_k C_{vk}^y I_k^y}{P_g} \quad (10)$$

$$q_{gk} = \frac{V_g^y \sum_k C_{uk}^x I_k^x - V_g^x \sum_k C_{vk}^y I_k^y}{Q_g} \quad (11)$$

这里必须指出,如果这个负荷不在与此发电机相对应的电源内,则电流贡献因子 C_{uk}^x, C_{vk}^y 为零。

根据上面的分析可看出,利用电流进行功率追踪,简单、实用,并且无需考虑线路的损耗及有功、无功的解耦等问题。文^[7]将此方法应用到一个30节点的系统中进行验证,所得的结果表明这种方法的实用性。

5 结束语

本文详细介绍了功率跟踪的概念、用途及计算功率跟踪的两种典型方法。通过上面的分析,可以看出,功率跟踪是潮流计算的进一步细化,它不仅要求出各个母线电压和各个线路的潮流,还要具体地求出线路潮流是由哪些发电机提供的或线路潮流向哪些负荷供电的。但是,由于无法用计量设备精确地测量出某一条线路上各个发电机所提供的功率,因而在进行功率跟踪时,人们普遍采用了比例共享原则。虽然功率跟踪使用比例共享原则还没有严格的理论依据,但它却向人们提供了线路潮流的分配方法,这有助于解决电价和网损分摊等问题。尽管

功率跟踪的研究取得了一定的进展,但是,仍有许多问题需要进一步地研究,如有损网络的处理、比例共享原则理论依据的证明等。

参考文献:

- [1] Janusz Bialek. Tracing the flow of electricity. IEE Proceeding Gener Transm Distrib, 1996, 143(4): 313 ~ 320.
- [2] 魏萍,倪以信,吴复立,等.基于图论的输电线路功率组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分析.中国电机工程学报, 2000, 20(6): 21 ~ 25.
- [3] 吴政球.基于潮流分析的有功、无功联合功率贡献因子理论的研究(一).全国高校电力系统自动化专业第十五届学术年会论文集, 1999, 166 ~ 172.
- [4] 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.中国电力, 1998, 31(6): 6 ~ 9.
- [5] 王锡凡,王秀丽,郑斌.电力市场过网费的潮流分析基础—输电设备利用份额问题.中国电力, 1998, 31(7): 31 ~ 34.
- [6] 李卫东,孙辉,武亚光.利用节点电压搜索定位的潮流追踪迭代算法.全国高校电力系统自动化专业第十六届学术年会论文集, 2000: 266 ~ 277.
- [7] Kirschen D S, Gran Srbac. Tracing active and reactive power generators and loads using real and imaginary currents. IEEE Transaction on Power System, 1999, 14(4): 1312 ~ 1318.
- [8] Kirschen D S, Allan R N, G Srbac. Contributions of individual generators to loads and flows. IEEE Transaction on Power System, 1997, 12(1): 52 ~ 60.

收稿日期: 2000-12-25

作者简介: 李健(1976-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场下电力系统最优潮流及无功优化计算; 刘明波(1964-),男,副教授,博士,系主任,主要研究方向为电网无功优化调度及最优潮流计算、电力系统电压稳定性分析、地理信息系统及配网自动化技术; 刘斌(1975-),男,助理工程师,主要从事继电保护等。

Power tracing methods of power system

LI Jian¹, LIU Ming-bo², LIU Bin³

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Daya Bay Nuclear Power Station, Shenzhen 518124, China)

Abstract: The importance of power tracing is analyzed in power market, and two typical methods such as decoupled active and reactive power and plural current based on proportional sharing principle, are discussed and compared in detail. The deficiencies of the existing power tracing methods and further development are presented.

Key words: power market; power tracing; decoupled active and reactive; power plural current