基于潮流路径追踪的无功负荷分摊方法

提出了一种基于潮流路径追踪的电力系统无功负荷分摊方法，该方法以按比例分配原则为基础，通过对无功传输路径的搜索以及无损网络的等效，得到负荷节点无功功率来源的直观分布情况。该方法物理意义明确，计算简单，易于实现，可以直观分析电力系统无功功率的传输及无功负荷分摊情况，最后以IEEE5节点及IEEE39节点系统对算法进行了验证。

杨克难　高　旺　侯靖岩／北京市电力公司检修分公司

杨克难／工程师

关键词／Keywords

电力系统·
潮流路径追踪·
无功功率·
负荷分摊·
传输路径·

随着电网建设规模的不断发展，电网之间的功率交换越来越大，大量的功率流动及其产生的网损需要分摊至用户。目前，针对功率分配及网损分摊这一课题所提出的方法有很多种，其中潮流追踪由于其思路清晰，形象直观，十分符合常规思维，一经提出就受到了广泛的关注[1-4]。

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组成分析得到。

英国的J.Bialek在文献[5,6]中提出了一种基于比例分配原则的潮流追踪方法。比例分配原则实质上是一个机会均等的原则，是潮流追踪方法的基础，已经得到了研究人员的普遍接受。文献[7]提出了一种基于电网络理论的追踪交流潮流的理论和方法，该方法中，作者将各支路的注入功率用等效的电流源代替，流出功率用等效的阻抗代替，然后根据叠加原理来确定电流在负荷上的分配情况，最后把电流的分配情况转换为复功率的分配情况。文献[8]提出了一种根据电流的实部和虚部进行潮流追踪的方法，首先求出所有功率源和负荷中流过的以复数方式表示的电流，然后以关于电流的比例分配原则为基础分别对电流的实部和虚部进行追踪。

鉴于现有方法中未有针对无功潮流、详细分析其无功路径的方法，本文提出了一种基于功率传输路径的无功潮流追踪方法。

无功潮流路径追踪

1. 按比例分配原则

比例分配原则是指节点的任一支路注入功率在流出支路中的分配与流出支路的实际功率成正比。比例分配原则实质上是一个机会均等的原则，是潮流追踪方法的基础，已经得到了研究人员的普遍接受。

根据文献[5]，在潮流追踪时满足功率分解的假设条件，功率追踪的按比例分配原则：不同支路流入节点功率对流出节点的何条支路上功率的贡献与其流入节点的功率值成正比。

以图1情况为例。

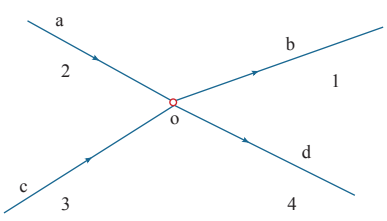

图 1　按比例分配原则示意图

图1中，箭头方向就是潮流流向，支

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

路上的标注数字为功率值。节点o由支路a、c注入功率，向支路b、d输出功率，流入节点o与流出节点o的功率是守恒的。用Q_{ab}表示从a经过节点o流向b的无功功率，根据按比例分配原则，即

$$Q_{ab}=Q_b\frac{Q_a}{Q_a+Q_c}=1\times\frac{2}{2+3}=0.4 \quad (1)$$

同理有

$$Q_{cb}=Q_b\frac{Q_c}{Q_a+Q_c}=1\times\frac{3}{2+3}=0.6 \quad (2)$$

$$Q_{ad}=Q_d\frac{Q_a}{Q_a+Q_c}=4\times\frac{2}{2+3}=1.6 \quad (3)$$

$$Q_{cd}=Q_d\frac{Q_c}{Q_a+Q_c}=4\times\frac{3}{2+3}=2.4 \quad (4)$$

2. 无损网络等效

潮流组成分析假定节点上各流出功率由流入功率按一定的比例分配，即按比例分配的原则。另外，还需要以下条件：①网络中没有环流；②网络无损耗（相应的损耗已等效到线路两端或线路一端，从而等效后的网络中线路两端的流入和流出功率相等且方向相同）。对于第1个假设，可以认为线路环流在合理的运行控制下是不存在的，如果网络中有环流，可以通过适当的调节予以消除。

本节将采用潮流路径追踪算法，将系统支路无功潮流向负荷节点进行追踪，以确定每个负荷节点对支路无功潮流的分担量。在文中假设网络中不存在无功环流，首先在每一条支路中增加一个虚拟节点，并将该支路无功损耗用虚拟节点的无功负荷来等效[9]；将支路的充电功率等效成该支路的注入功率（无功电源）。将传统支路模型简化为图2所示的用于潮流路径追踪的等效模型。

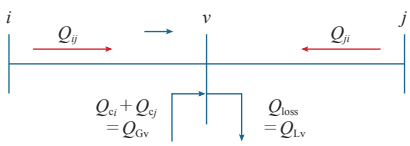

图2　无功潮流追踪等效电路

图中，Q_{ij}为由节点i流向支路ij的无功潮流；Q_{ji}为由节点j流向支路ij的无功潮流；Q_{Gv}为等效虚拟节点的注入无功，其值为支路的充电功率；Q_{Lv}为等效虚拟节点的无功负荷，其值为支路的无功损耗。

3. 无功负荷功率来源路径

潮流追踪在追踪方向上分为逆流追踪和顺流追踪。从无功功率的输出端开始，沿着输出功率流向负荷节点的追踪潮流的方式为顺流追踪；相反，逆着无功潮流的流向由负荷节点向无功功率的源节点追踪潮流的方式为逆流追踪。本文采用逆流追踪的方法来说明追踪无功负荷功率来源路径，以此来确定负荷节点的无功来源的构成情况。

所采用的路径搜索方法针对当前节点，寻找与之相连并且无功潮流流向该节点的支路，实现逆潮流方向节点的搜索，直到遇到再没有其他支路向其注入无功的电源节点作为终点，则完成了该条路径的搜索。

对路径的搜索过程如下。

1）首次循环时，将负荷节点作为追踪的起点；非首次循环时，将当前从堆栈顶弹出的节点作为追踪起点。

2）找出与该节点直接相连，并且功率方向为流入该节点的所有支路。

3）若搜寻到的支路的对端节点仍有其他支路向其注入功率，则将该节点压入堆栈，直至搜索到无其他支路注入功率的节点，并记录该结果。

4）弹出当前堆栈顶节点，并准备进行下一次循环，以该弹出的节点作为起点重复上述过程。若堆栈为空，结束循环。

按照以上步骤进行搜索，则可以得到任一负荷节点无功来源及其传输路径。以此类推，可以得到所有负荷节点的无功功率传输路径。图3为追踪路径计算流程图。

从图3中可以看出，可以从任一负荷节点开始，向无功电源端进行潮流路径追踪，得到无功电源节点对该负荷功率的供给传输路径。通过以上计算，不仅可以得到每个负荷节点的无功来源于哪些无功电源节点，而且可以明确这些无功是怎样从电源节点流向负荷节点的，途中经历了哪些支路。基于这些路径信息对系统的无功情况进

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

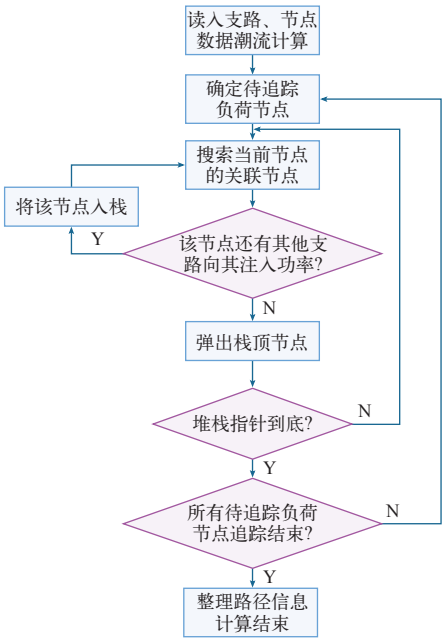

图3 追踪路径计算流程图

行分析，从而有助于为无功功率的优化控制提供依据。

假设由无功电源节点i至负荷节点j的一条无功传输路径经过节点$i+1$，…，$j-1$（为该路径上的节点），则相关节点流入的总无功功率为Q_i，…，Q_j；相关支路传输的无功功率为$Q_{(i,\ i+1)}$，…，$Q_{(j-1,\ j)}$。设节点i无功电源注入的总无功功率为Q_i^{G}，节点j负荷吸收的总无功功率为Q_j^{L}，则根据按比例分配的原则可知，节点$j-1$经支路（$j-1$，j）向节点j传输的无功功率为$Q_{(j-1,\ j)}/Q_j\,Q_j^{\mathrm{L}}$。以此向前推导，$Q_i^{\mathrm{G}}$通过这条路径向$Q_j^{\mathrm{L}}$传输的无功功率为

$$Q_{(i,j,p)}=\frac{Q_i^{\mathrm{G}}}{Q_i}\cdot\frac{Q_{(i,i+1)}}{Q_{i+1}}\cdot\cdots\cdot\frac{Q_{(j-1,j)}}{Q_j}\cdot Q_j^{\mathrm{L}}$$
$$=\frac{Q_i^{\mathrm{G}}}{Q_i}\cdot\left[\prod_{k=i}^{j-1}\frac{Q_{(k,k+1)}}{Q_{k+1}}\right]\cdot Q_j^{\mathrm{L}}\qquad(5)$$

以此类推，可以得到任一无功电源节点对任一负荷节点的无功贡献程度。

算例分析

本文以IEEE5节点系统及IEEE39节点系统为例，对基于路径的无功潮流路径追踪方法进行说明。

1. IEEE5节点系统

图4显示了基态系统的无功流动方向。其中，无功潮流已按照潮流路径追踪算法进行等效。

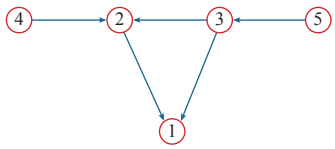

图4 IEEE39节点系统的无功流向

2. 潮流路径追踪结果分析

下表为IEEE5节点系统无功潮流路径追踪结果。

表 IEEE5节点系统无功潮流路径追踪结果

无功源 负荷	节点4	节点5	支路1－2	支路2－3	负荷
节点1	0.204 5	0.400 2	0.169 6	0.025 7	0.8
节点2	0.853 9	0.038 9	0	0.107 1	1
节点3	0	1.3	0	0	1.3
支路1－2	0.369 8	0.016 9	0.306 7	0.046 4	0.739 8
支路1－3	0	0.080 4	0	0	0.080 4
支路2－3	0	0.138 0	0	0.379 8	0.517 8
支路3－5	0	0.324 9	0	0	0.324 9
支路2－4	0.384 9	0	0	0	0.384 9
电源	1.813 1	2.299 4	0.476 3	0.559 0	5.147 8

由上表可知，发电机节点4、节点5向系统提供无功，节点1、节点2和节点3从系统中吸收无功，支路1－2、支路2－3的等效并联导纳的无功功率除提供给本支路用于平衡支路的无功损耗外，还能够向系统中其他支路及节点传输无功功率。

3. IEEE 39节点系统

图5为节点4无功负荷来源的传输路径，路径上的发电机节点及线路的充电功率均对分担节点4的无功负荷做出贡献，对照IEEE39节点系统拓扑结构可以看出，这些节点均在节点4附近。

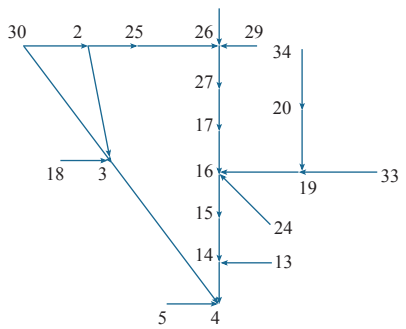

图5 节点4无功路径

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图6为节点4无功负荷来源的分布情况，大体上符合这样一个规律，即：虽然向节点4传输无功的支路、节点数目较大，但是其中较少一部分支路及节点承担了绝大部分负荷，且这些支路及节点在其无功来源路径中均距离节点4更近。

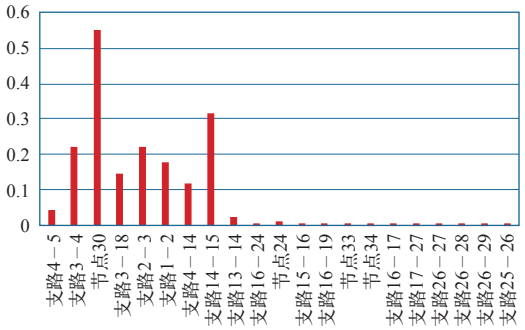

图6　节点4无功负荷来源分布

4. 潮流追踪结果分析

从无功潮流路径追踪的结果可以看出，在电网中，发电机节点及线路的充电功率的传输局限在一个较小的范围内，并非所有的发电机节点均向某一负荷节点传输无功，只有那些和指定的负荷节点相连或距离很近的节点或支路才会向负荷节点输送无功功率。但是，这并不是说系统中的其他发电机节点对所指定的负荷的无功传输没有影响，通过这些发电机无功输出功率的调整，系统中无功功率的传输会发生变化，从而影响到指定负荷节点无功来源的分布情况，从而使系统的无功传输更加区域化，避免远距离输送无功的情况，达到对系统无功电压的优化。

结束语

在交流潮流的基础上，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，应用潮流路径追踪的方法获得负荷无功功率的传输路径，然后按比例分配原则进行功率跟踪，得到每个负荷节点无功功率在各个无功电源中的分配情况，并用实际算例验证了在输电网络中，负荷节点的无功功率大部分来源于其附近的无功电源，无功功率一般不会进行远距离的传输。

本文提出的基于无功潮流路径追踪方法可以清晰地得到负荷节点的无功来源路径及在路径上各个无功电源的分配情况，对于研究无功传输的优化及深入分析无功潮流有一定的参考价值。

参考文献

[1] Yann-Chang Huang，Hong-Tzer Yang．Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1996，11 (4)：1868-1873．

[2] 杨右红，杨宗全，潘永贺，等．联营－双边混合交易模式下的阻塞费用分摊 [J]．电力系统保护与控制，2009，37 (11)：50-53．

[3] 艾东平，鲍海，杨以涵．基于电路理论的发电权交易网损增量补偿解析 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (22)：135-139．

[4] 魏平，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 [J]．中国电机工程学报，2000，20 (6)：21-25．

[5] J.Bialek．Tracing the flow of electricity [J]．IEE Proc-Gener Transmisslon Distrib，1996，143 (4)：313-320．

[6] J.Bialek．Topological generation and load distribution factor for supplement charge allocation in transmission open access [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1997，12 (3)：1185-1190．

[7] 吴晓蓉，谢开贵，周家启．基于电流分解的输电损耗分摊双向追踪方法 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (21)：24-29．

[8] 王秀丽，王锡凡．利用电流的实部与虚部分量进行复功率追踪 [J]．电力系统自动化，2004，28 (3)：10-13．

[9] D. Kischen，R. Allan，G. Strbac．Contribution of individual generators to loads and flows [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1997，12 (1)：52-60．

（收稿日期：2014－03－27）EA

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net