

基于节点分层的配网潮流前推回代方法

李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 褚金胜

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 结合配电网特有的辐射状特点, 提出了一种新的基于节点分层的配网潮流前推回代方法。该方法利用配网支路及其节点参数所形成的节点-节点关联矩阵推导出节点分层矩阵及其对应的上层节点矩阵, 再根据所形成的分层矩阵及其对应的上层节点矩阵利用前推支路电流和回代电压进行计算。通过对算例的编程计算, 结果表明所提的算法有效、快速及实用。

关键词: 配电网; 潮流; 前推回代算法

Back / forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer

LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, CHU Jin-sheng

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Combined the unique characteristics of the radial of distribution network, this paper proposes a novel back / forward sweep distribution load flow algorithm based on the node-layer. By using the matrix of node-layer and the matrix of the up-node, according to the parameters of node and branch, the algorithm computes the current of the branches and the voltage of node of the network. An example of the distribution network is computed. The result indicates that the algorithm proposed is valid, fast and practical.

Key words: distribution network; power flow; backward / forward substitution method

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0063-04

0 引言

配电网通常是单电源全网连接、开环运行, 即呈树状。针对配电系统分析, 其根本就是进行潮流计算。潮流计算的重要性在配电网规划与设计、配电网重构、配电网故障分析等方面尤为突出。由于配电网的运行特点, 其馈线上的分段开关、联络开关会根据不同的情况打开或闭合, 使其网络结构发生变化, 其潮流的流向也随之改变。因此, 进行有效合理的拓扑分析, 就大大有利于潮流计算。

文献[1]通过构造邻接表保存配电网拓扑结构, 但其配网拓扑结构是不断变化的, 故此法不能及时得到其结构。文献[2]采用邻接矩阵来描述, 文献[3]则在其基础上改进, 虽然二者采用多个矩阵表达方式, 但对计算速度有影响。文献[4-5]将配电网支路按层次进行分类, 得到支路层次矩阵, 从而可以不必对节点和支路重新编号计算支路功率损耗和各节点电压, 但需形成过多的辅助矩阵, 影响计算速度。

本文针对以上问题, 提出了一种新的基于节点

分层的配网潮流前推回代方法。这种方法采用节点分层来描述配电网, 只需得到两个关键的辅助矩阵进行前推回代就能方便快速地进行潮流计算, 适合于拓扑结构变化的配网进行快速的潮流计算。

1 配电网节点分层拓扑分析

1.1 配电网原始数据描述

结合配电网呈辐射状的特点, 用节点分层方法来描述, 配电网的原始数据采用下面的格式:

支路参数矩阵 **BranchM**:

{支路所连节点1 支路所连节点2 支路阻抗参数}

节点参数矩阵 **NodeM**:

{节点号 有功负荷 无功负荷}

根据以上的参数矩阵容易求得配网此种结构运行时的节点-节点关联矩阵 **NodeN**, 再利用下述方法求得两个关键矩阵: 节点分层矩阵 **LayerM** 及其对应的上层节点矩阵 **NU**。其中 **LayerM** 矩阵大小根据具体分层来定, **NU** 为 $1 \times N$, N 为节点数, 其中每列的元素是以此列数为节点号对应的上层节

点号。

以图1所示8节点辐射状网络为例，图中1、2、3、4、5、6、7、8为母线节点编号，①②③④⑤⑥⑦为支路（分段开关）编号，⑧⑨为支路（联络开关）编号。

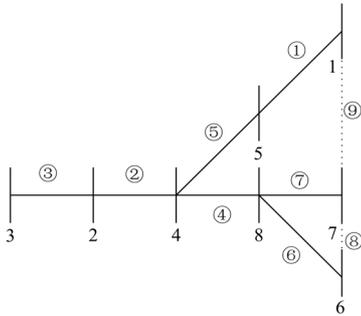


图1 8节点辐射状网络

Fig.1 Radial network of 8-buses

1.2 形成节点分层矩阵 $LayerM$ 及其对应的上层节点矩阵 NU

正常运行时联络开关是打开的，分段开关是闭合的，则此时图1所示网络的节点-节点关联矩阵为：

$$NodeN = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

这是个对称阵，这里取 $NodeN$ 的上三角矩阵 $NodeN'$ 进行节点分层拓扑分析。具体步骤如下：

$$NodeN' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤一：电源结点号为3，则记节点分层矩阵的第1列第1行为“3”，即 $LayerM = [3]$ ，相应的 $NU = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

步骤二：找下一层节点。取 $LayerM$ 中的第一列元素，这里为“3”，所以从 $NodeN'$ 的第3行找“1”

元素所在列。这里第3行中没有“1”，再从 $NodeN'$ 的第3列中找出“1”元素所在的行为“2”，查找 $LayerM$ 中是否有“2”，有则不记，没有则把“2”记入节点分层矩阵 $LayerM$ 的第2列第1行。节点分层矩阵就变为 $LayerM = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ，相应地， NU 中的第二列就为3，即 $NU = [0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

步骤三：继续找下一层节点。取 $LayerM$ 中的第二列元素，这里仅有“2”，找 $NodeN'$ 中第2行为“1”所在列为“3”和“4”，查找 $LayerM$ 中是否有“3”和“4”，没有则把“4”记入节点分层矩阵 $LayerM$ 第3列第1行，再从 $NodeN'$ 的第2列中找出“1”元素所在的行。这里没有，所以经过分析后节

$$点分层矩阵就变为 $LayerM = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ，相应地，$$

NU 中的第四列就为2，即 $NU = [0 \ 3 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

步骤四：再找下一层节点，取 $LayerM$ 中的第三列元素，这里仅有“4”，找 $NodeN'$ 中第4行为“1”所在列为“5”和“8”，查找 $LayerM$ 中是否有“5”和“8”，没有则把“5”和“8”分别记入节点分层矩阵 $LayerM$ 第4列第1、2行，再从 $NodeN'$ 的第4列中找出“1”元素所在的行，这里没有，所以经过分析后节点分层矩阵就变为

$$LayerM = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
，相应地， NU 中的第五列

和第八列都为4，即 $NU = [0 \ 3 \ 0 \ 2 \ 4 \ 0 \ 0 \ 4]$ 。

步骤五：还要再找下一层节点。取 $LayerM$ 中的第4列元素，这里为“5”和“8”，首先找 $NodeN'$ 中第5行和第5列中“1”。其中第5行没有“1”，第5列中“1”在第1、4行，查找 $LayerM$ 中是否有“1”和“4”，没有则把“1”记入节点分层矩阵 $LayerM$ 第5列第1行，相应地， NU 中的第1列为5，即 $NU = [5 \ 3 \ 0 \ 2 \ 4 \ 0 \ 0 \ 4]$ 。再找 $NodeN'$ 中第8行和第8列中“1”，其中第8行没有“1”，第8列中“1”在第4、6、7行，查找 $LayerM$ 中是否有“4”、“6”、“7”，没有则把“6”、“7”分别记入节点分层矩阵 $LayerM$ 第5列第2、3行，相应地， NU 中的第6列和第7列都为8，即 $NU = [5 \ 3 \ 0 \ 2 \ 4 \ 8 \ 8 \ 4]$ ，节点分层矩阵已经变为

$$LayerM = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 4 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

此时所有节点都查找

过, 结束查找, 以上就为最后的拓扑分析结果。从 $LayerM$ 中节点分层一目了然, 并且从 NU 中也能很快地得到末梢节点 1, 6, 7 以及每个节点对应的上层节点, 这非常有利于后面的求解。分层拓扑分析的同时, 其潮流的方向也得以确定(如图 2 所示)。

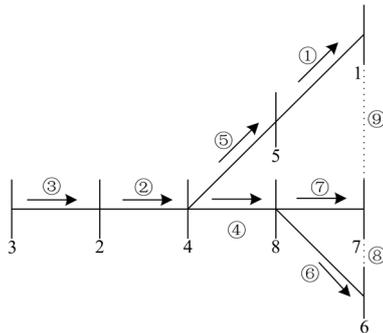


图2 8节点辐射状网络潮流方向
Fig.2 Power flow of the radial network of 8-buses

1.3 配网结构变化后拓扑分析

当配电线路上的开关由于重构、消除故障打开或闭合时, 配网的结构也发生了相应的变化。这里假设①支路上的分段开关打开, ⑨联络线上开关闭合, 同样按上述方法, 先形成对应的节点-节点关联矩阵 $NodeN$, 然后经过拓扑分析就能很快得到分层

$$LayerM' = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 4 & 5 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以及上层节点

矩阵 $NU' = [7 \ 3 \ 0 \ 2 \ 4 \ 8 \ 8 \ 4]$ 。其潮流的方向也得以确定(如图 3 所示)。

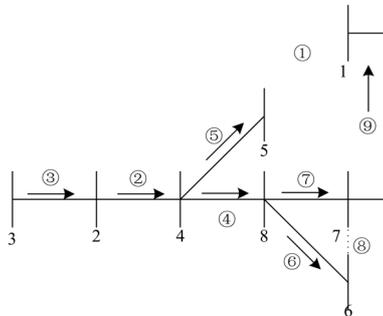


图3 8节点辐射状网络结构改变后潮流方向
Fig.3 Power flow of the network of 8-buses as its structure changed

2 节点分层前推回代潮流计算

因配电网呈辐射状的特点, 使其网络上任一节点到源点具有唯一路径, 所以可采用结合本文的节点分层前推回代法进行潮流计算。它的基本原理是已知末端负荷和根节点的电压, 一般给定配电网的初始电压, 以馈线为计算基本单位, 设全网电压为额定电压, 根据负荷功率由最后一层向上一层逐层推导, 经过一个回代过程可求得各支路电流。再根据给定的始端电压和求得的支路电流, 由第一层向下一层逐段计算各段的电压降, 求得各点电压, 如此反复, 直至各个节点的电压率偏差满足容许条件为止。下面以图 1 所得结果 $LayerM$ 和 NU 其具体的算法流程如下。

第一步: 各节点电压初始值为 1, $\dot{U}_i(0)=1.0$, $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为配网总节点数。

第二步: 利用式 (1) 和 NU 矩阵, 从节点分层矩阵 $LayerM$ 的最后一列向前一列前推计算各支路电流。

$$\dot{I}_j(0) = \frac{\dot{S}_j^*}{\dot{U}_j(0)} + \sum \dot{I}_j(0) \quad (1)$$

式中: \dot{I}_j 为支路 j 的电流; $\sum \dot{I}_j$ 为所有 j 节点的下一层支路的电流总和, 如果是末梢节点则没有这项;

\dot{S}_j 为节点 j 的负荷功率的共轭; $\dot{U}_j(0)$ 为 j 点的电压共轭。在本文图例 1 中, 从 $LayerM$ 的最后一列元素 (1, 6, 7) 开始, 查找 NU 矩阵 (没有出现), 可知其没有下层节点, 则对应的支路电流

$$\dot{I}_j(0) = \frac{\dot{S}_j^*}{\dot{U}_j(0)}$$

其中 $j=1, 6, 7$ 。再计算前一列,

此时的列元素为 5 和 8, 分别求解, 从 NU 矩阵中“5”所在列为 1 可知其下层支路为 1, 所以式 (1) 右边第二项就为中 $\dot{I}_1(0)$; 从 NU 矩阵中“8”所在列为 6 和 7, 可知其下层支路为 6 和 7, 则式 (1) 右边第二项就为中 $\dot{I}_6(0) + \dot{I}_7(0)$ 。以此往前推就能得到各支路电流。

第三步: 利用式 (2) 和 NU 矩阵, 从节点分层矩阵 $LayerM$ 的第一列向下一列回代计算各节点电压。

$$\dot{U}_j(1) = \dot{U}_i(0) - Z_j \dot{I}_j(0) \quad (2)$$

其中： $\dot{U}_j(1)$ 为节点 j 的电压； $\dot{U}_i(0)$ 为节点 j 对应的上一层节点 i 的电压； $\dot{I}_j(0)$ 为支路 j 的电流。 Z_j 为以 i, j 为端点支路的阻抗。在本文图 1 中，从 **LayerM** 的第二列元素“2”开始（第一列为电源点无须计算），查找出 **NU** 矩阵的第二列元素，这里为“3”，则式（2）中 $j=2, i=3, Z_j$ 就为 2, 3 节点之间的支路阻抗。以此往后回代就能得到各节点电压。

第四步：判断 $\max \left\{ \left| \Delta u = \dot{u}_j(0) - \dot{u}_j(1) \right| \right\} < \varepsilon$ ，

如果不满足条件则跳到第二步进行下一次迭代，直到满足。如果满足则输出最后一次迭代电压的结果。

第五步：根据所求电压求解支路潮流及网损。

3 算例分析

采用本文方法和文献[5]所提方法在同一台电脑上分别对文献[5-6] 12 节点配网和文献[7] 69 节点配网进行 Matlab7.0 编程，收敛条件精度都为 10^{-6} 。对于两个配电系统，两种方法计算结果一样，但运行时间有很大的不同，具体如表 1 所示。

表 1 两种方法对不同的配电网潮流计算时间

Tab.1 Calculation time of two methods for different distribution

配电系统	运行时间 / s	
	文献[5]方法	本文方法
12 节点系统	0.013 8	0.010 8
69 节点系统	0.145 6	0.038 6

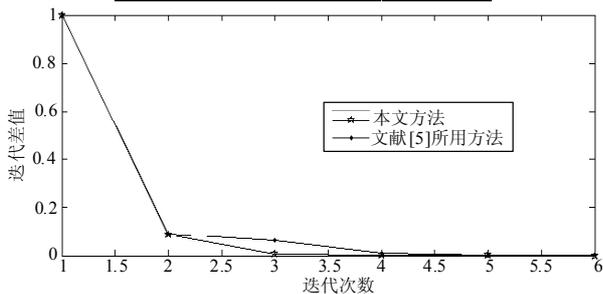


图4 两种方法对69节点系统的收敛特性

Fig.4 Convergence characteristics of two methods for 69-buses system

从表 1 中可以看出，本文不用形成文献[5]过多的辅助矩阵只采用两个关键矩阵就能完成计算，所以运算速度都比文献[5]快，而且随着规模变大，优势更明显。另外，图 4 列出了两种方法对 69 节点系统的计算收敛情况，可见本文算法迭代到第 3 次

就趋近收敛条件精度，第 4 次达到精度，而文献[5]的方法在第 6 次才能达到。

4 结论

本文利用配电网的辐射状特点，对其进行拓扑分析，得出两个关键的辅助矩阵，再采用 Matlab 语言编写相应的前推回代潮流计算程序。通过对算例的对比分析，可以看出本文所提方法除了无需对节点及支路进行复杂的编号、不形成导纳矩阵、不必采用稀疏或追赶技术等优点外，还具有占用计算机资源少、易编程、程序收敛速度快速等特点，因此具有较好的实际应用价值。

参考文献

[1] 邱生, 张焰. 用邻接表保存中压配电网拓扑结构[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 57-59.
 QIU Sheng, ZHANG Yan. Adjacency list saving topology structure of mid-voltage distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (3): 57-59.

[2] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 配电网理论及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
 LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Distribution network theory and application[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007.

[3] 顾秀芳, 关长余. 配电网潮流计算的拓扑分析研究[J]. 华北电力大学学报:自然科学版, 2008(2): 49-52.
 GU Xiu-fang, GUAN Chang-yu. Analysis and study on topology for power flow of distribution network[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2008(2): 49-52.

[4] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 77-81.
 YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie, et al. Layer-by-layer back / forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 77-81.

[5] 王峥, 丛培杰. 基于改进前推回代法的辐射状配电网潮流计算[J]. 东北电力技术, 2008(2): 9-12.
 WANG Zheng, CONG Pei-jie. Power flow calculation for radial distribution network based on forward/backward substitution method[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(2): 9-12.

[6] 王丹, 常宝立. 一种用于配网潮流计算的节点编号新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (2): 22-26.
 WANG Dan, CHANG Bao-li. A new method of node numbering scheme on distribution system power flow calculation[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15 (2): 22-26.

(下转第 139 页 continued on page 139)

- CAI De-li. A novel computer algorithm for power transmission line fault location[J]. J Chongqing Univ, 1982(2): 1-14.
- [3] 毕潇映, 李学农, 陈延枫, 等. 一种双端故障测距算法的仿真及现场实例分析[J]. 高电压技术, 2006, 32 (3): 105-107.
- BI Xiao-yi, LI Xue-nong, CHEN Yan-feng, et al. Simulation of two-terminal based fault location algorithm and the analysis of the practical data[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (3): 105-107.
- [4] 袁宇春, 刘晓川. 工频量双端测距综述[J]. 继电器, 2006, 34 (23): 74-77.
- YUAN Yu-chun, LIU Xiao-chuan. Survey of fault location algorithm based on two-terminal data of transmission line[J]. Relay, 2006, 34 (23): 74-77.
- [5] 滕林, 刘万顺, 李营, 等. 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 24-27.
- TENG Lin, LIU Wan-shun, LI Ying, et al. A novel practical accurate fault location algorithm for HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 24-27.
- [6] 陈铮, 苏进喜, 吴欣荣. 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法[J]. 电网技术, 2000, 24 (11): 31-33.
- CHEN Zheng, SU Jin-xi, WU Xin-rong. Fault location algorithm for high voltage transmission line based on distributed parameter[J]. Power System Technology, 2000, 24 (11): 31-33.
- [7] 全玉生, 杨敏中, 王晓蓉. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和新算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (5): 28-32.
- QUAN Yu-sheng, YANG Min-zhong, WANG Xiao-rong. A new algorithms and their robustness for two-terminal fault location on HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (5): 28-32.
- [8] Novosel D, Hart D G, Udren E, et al. Unsynchronized two-terminal fault location estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (1): 130-138.
- [9] 宋国兵, 索南加乐, 康小宁. 不受线路参数影响的双回线双端故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 24 (2): 28-31.
- SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, KANG Xiao-ning. Two-terminal fault location algorithm uninfluenced by parameters of parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 24 (2): 28-31.
- [10] 梁远升, 王钢, 李海锋. 双端不同步线路参数自适应时频域故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (18): 17-21.
- LIANG Yuan-sheng, WANG Gang, LI Hai-feng. Fault location algorithm based on time-frequency-domain with two terminals asynchronous[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (18): 17-21.
- [11] Zamora I, Minzmbres J F, Mazon A J, et al. Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, 1996, 143 (1): 1-6.

收稿日期: 2009-08-30; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

李永坚 (1971-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事电力系统稳定性研究; E-mail: liyjxt@126.com

黄绍平 (1964-), 男, 教授, 硕士, 主要从事无功补偿、智能化开关设备研究;

唐剑东 (1974-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护研究。

(上接第 66 页 continued from page 66)

- [7] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (1): 725-732.

收稿日期: 2009-09-01; 修回日期: 2009-10-05

作者简介:

李如琦 (1959-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向

为电力系统规划、负荷预测、电力系统分析与计算; E-mail: liruqi59@gxu.edu.cn

谢林峰 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地方电力系统、电网规划; E-mail: linfengxie@163.com

王宗耀 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测的理论与电力系统规划。