

# 基于支路电流的配网潮流前推后代法

戴雯霞, 吴捷

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 在简单的支路始末节点数据输入的基础上确定配网拓扑结构表, 经过遍历深度优先搜索形成层次结构和节点队列以决定潮流计算的节点顺序, 以基于支路电流的前推后代法为理论基础, 形成一种实用的配电网潮流计算方法, 算例表明该方法无需复杂的网络编号、不用形成导纳矩阵、迭代次数少、结果精确。

**关键词:** 潮流计算; 配电网; 前推后代法

**中图分类号:** TM744

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2002)05-0006-03

## 1 引言

配电网潮流计算是配电网分析的基础, 配电网的规划改造、经济运行、网络重构、无功优化和故障处理等都需要用到配网潮流计算的数据。近年来, 开发配电管理系统(DMS), 成为人们研究的热点。而配电网潮流计算作为DMS的高级应用软件之一, 更是整个问题研究和分析的基础。

配电网有许多不同于输电网的特点, 主要体现在下面几个方面: 配电网具有闭环结构、开环运行的特性, 稳态运行时网络结构多呈现辐射状, 只有在发生故障或倒换负荷时才有可能出现短时环网运行情况; 配电网的线路总长度比输电线路长且分支线多、线径小, 导致配电网的 $R/X$ 值较高, 多数情况大于1, 且线路的充电电容可以忽略; 网络的PQ节点多, PV节点较少等等。

以上这些特点造成雅可比矩阵元素对角优势遭到破坏, 条件数增大, 并容易造成病态的网络, 使得在输电网中广泛运用的牛顿-拉夫逊和其派生的PQ分解法不易收敛<sup>[1]</sup>。为此已研究出一些适合配电网的有效的方法, 如回路阻抗法、改进牛顿法、改进快速解耦法、前推后代法等<sup>[2]</sup>, 但有的方法需要复杂的节点和支路编号。例如文献[3]构造了一种标准节点结构, 即网络中所有的节点都有一个父节点和最多两个子节点, 通过搜索形成网络拓扑表, 利用前推后代法计算潮流分布, 该方法比较直观, 但当子节点超过两个时, 需要人为特殊处理; 文献[4]建立了特殊的数据结构, 即在原始数据输入时需要输入每一个节点的连接节点数、连接节点和节点连接关系, 这样虽然可以使计算过程简单, 但是原始数据输入过于烦琐, 而且在连接节点比较多时, 很容易出错。因此实际线损计算大多数仍是沿用传统的均方

根电流法、等值电阻法等比较粗略的简化方法。

本文提出一种基于支路电流的改进前推后代法, 只需要简单输入支路始末节点, 就可以自动搜索寻找节点关系, 遍历搜索形成层次结构和节点队列, 在前推后代法的理论上, 形成一种实用的配电网潮流计算方法。最后经算例计算证明了本算法的优点。

## 2 确定拓扑结构表, 形成层次关系

### 2.1 搜索节点关系, 确定拓扑结构表

为了配合算法和避免复杂的网络编号, 我们建立了以下原始数据输入结构。使用这一套数据结构, 不用形成节点导纳矩阵, 就可以自动搜索节点关系, 确定网络的拓扑结构。

节点结构体:

{节点号 节点有功 节点无功}

支路结构体:

{支路首端节点号 支路末端节点号 支路电阻 支路电抗}

根据线路首末节点就可以确定每个节点连接的节点及其关系, 从而可以形成整体呈树状的关系结构。下面以图1中的配电网模型说明。

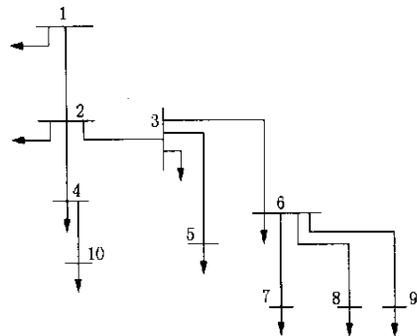


图1 潮流计算的10节点算例

对于图 1 中的 6 节点来说,搜索所有线路的末节点,发现线路(36)的末节点为 6,则线路(36)的首节点 3 为节点 6 的连接节点,节点 3 与节点 6 的关系为父节点;再搜索所有线路的首节点,找到首节点为 6 的线路为(67)、(68)和(69),它们的末节点为 7、8 和 9,与节点 6 的关系为子节点。由此可以找到所有节点的连接节点及其连接关系,如表 1 所示。

表 1 10 节点算例的拓扑结构表

节点号	连接节点数	连接节点	连接关系
			(1 为子节点,2 为父节点)
1	1	2	1
2	3	1,3,4	2,1,1
3	3	2,5,6	2,1,1
4	2	2,10	2,1
5	1	3	2
6	4	3,7,8,9	2,1,1,1
7	1	6	2
8	1	6	2
9	1	6	2
10	1	4	2

2.2 形成层次关系,确定节点计算顺序

有了表 1 的拓扑结构,还需经过一次按层遍历的广度优先搜索,形成层次关系,确定前推后代潮流算法的节点计算顺序。结合图 1 系统,介绍具体搜索步骤如下:

(1) 搜索末梢节点作为第一层次节点,研究拓扑结构表 1,找到节点 5、7、8、9、10 都只有一个连接节点,而且连接节点是父节点,则这五个节点是末梢节点,放在第一层;

(2) 搜索末梢节点的父节点作为第二层节点,可知 5、7、8、9、10 的父节点分别为 3、6、6、6、4,那么节点 3、6、4 为第二层节点;

(3) 继续搜索第二层节点的父节点作为第三层节点,这样反的搜索下去,直到搜索到某层节点的父节点全部是根节点 1 时停止搜索。形成以下的层次结构:

- 第一层节点:5,7,8,9,10
- 第二层节点:3,6,6,6,4
- 第三层节点:2,3,3,3,2
- 第四层节点:1,2,2,2,1
- 第五层节点:1,1,1

(4) 上面的层次中有重复节点,需要删除在后面层次中有重复的前面层次中的节点,形成真正的层次关系,确定潮流计算的节点顺序。如第三层中

的节点 2 在第四层中存在,则应该删除第三层中的节点 2,同样应该删除第二层中的节点 3,和第四层中的节点 1。真正层次如下:

- 第一层节点:5,7,8,9,10
- 第二层节点:6,4
- 第三层节点:3
- 第四层节点:2
- 第五层节点:1

3 基于支路电流的配网潮流前推后代法原理

配电网呈辐射状,前推后代法是配电网潮流计算方法中被广泛研究的一种方法。其具体的算法原理如下:

(1) 节点电压赋初值,  $\dot{U}_i(0) = 1, i = 1, 2, \dots, n, n$  为节点数;

(2) 从第一层的末梢一级负荷节点开始,根据节点功率  $P_j + jQ_j$ ,计算流入该节点的支路电流  $\dot{I}_{ij}(0)$

$$\dot{I}_{ij}(0) = \frac{\dot{S}_j}{\dot{U}_j(0)} = \frac{P_j - jQ_j}{\dot{U}_j(0)} \quad (1)$$

其中,  $j$  为最末一级负荷节点号,在图 1 中,  $j$  为第一层节点 5,7,8,9,10;  $i$  为上述节点所在支路的首端节点号,分别为 3,6,6,6,4;

(3) 从第二层开始逐层计算非末梢节点 6,4,3,2,1 的注入电流,根据基尔霍夫电流定律应等于(1)式与流出电流之和

$$\dot{I}_{ij}(0) = \frac{\dot{S}_j}{\dot{U}_j(0)} + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{jk}(0) \quad (2)$$

其中,  $j$  为非末梢节点号,  $i$  为该节点的父节点,  $m$  为节点  $j$  的子节点个数,如对于节点 6 来说,父节点  $i = 3$ ,子节点数  $m = 3$ ,子节点  $k$  为 7,8,9;

(4) 由步骤(2)和(3)可求出所有支路的支电流,再利用已知的根节点电压,从根节点向后顺次求得各个负荷节点的电压

$$\dot{U}_j(1) = \dot{U}_i(1) - \dot{I}_{ij}(0) Z_{ij} \quad (3)$$

其中  $i$  为父节点,  $j$  为子节点,  $Z_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  间支路的阻抗;

(5) 计算各个负荷节点的电压幅值修正量

$$U_j(1) = \dot{U}_j(1) - \dot{U}_j(0) \quad (4)$$

(6) 计算节点电压修正量的最大值  $\max(U_j(1))$ ;

(7) 判别收敛条件

$$\max(U_j(1)) < \quad (5)$$

其中 1 为迭代次数,若最大电压修正量小于阈值,则跳出循环,输出电压计算结果;否则重复步骤(2)~(7),直到满足(5)式的条件为止。

(8)在得到各个节点的电压电流后,就可以计算线路潮流  $S$  和网损  $LS$

$$S_j = \dot{U}_j \dot{I}_{ij}^* \quad (6)$$

$$LS_{ij} = \dot{I}_{ij}^2 Z_{ij} \quad (7)$$

总之,(1)~(3)式为一组递归方程,对树进行前向遍历,从树的末梢节点出发,利用已知的负荷功率,逐一计算(1)~(2)式,即可求得根节点处的电流,再从根节点出发,对树进行后向遍历,用(3)式可求各节点电压。这样就完成一次前推后代的计算,迭代重复进行,直至满足收敛标准为止。因为迭代计算过程中的基本变量是支路电流,所以称之为基于支路电流的前推后代法,其算法流程图如图2所示。

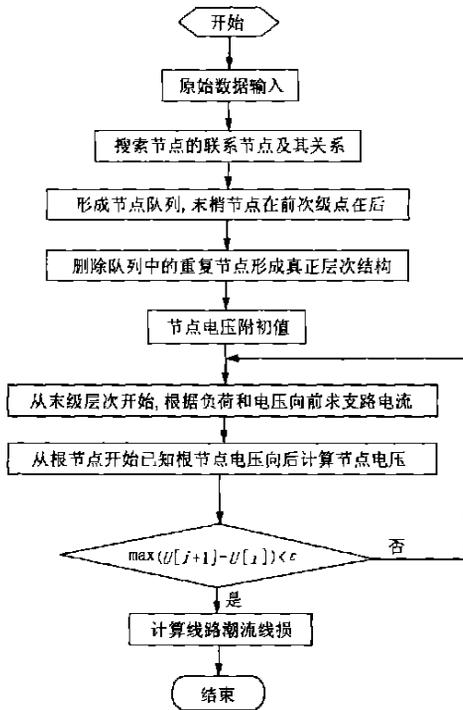


图2 基于支路电流前推后代潮流算法流程图

### 4 算例分析

基于文献[5]算例,网络结构及节点编号如图3所示,支路数据不再列出,经详细计算后得到和文献[6]完全相同的结果,证明了本文算法的正确性。

另外本文还对不同的收敛阈值下的收敛速度做

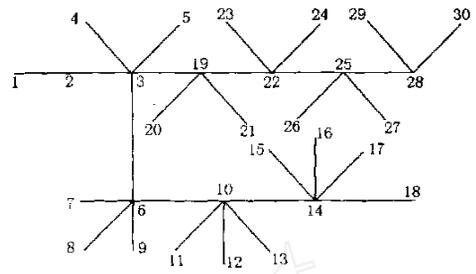


图3 潮流计算30节点算例

了测试,结果如图4所示,可见本算法收敛速度快,迭代次数少,一般最多迭代五次就可以收敛。

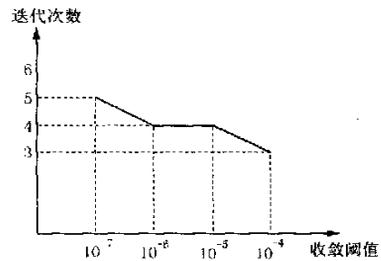


图4 30节点算例收敛速度测试结果

### 5 结论

本文针对 10kV 配电网的特点,根据基于支路电流的前推后代法基本原理,用 delphi 语言开发了实用潮流计算程序,作为计算机辅助软件用于某地区配电网规划中,取得了非常有效的成果。总之,本文提出的算法有以下特点:

不需要形成导纳矩阵,不采用稀疏或追赶技术,节省内存,易于编程;建立了树状的数据结构,使得程序结构紧凑,无需复杂的节点编号,方便用户,并提高了程序代码的效率;对电压初值要求不高,只要在额定附近即可;每次迭代过程中只进行  $2n$  次向量乘法,计算量较小;并在迭代过程中充分利用已知条件和配电网的拓扑结构,改善了收敛性;与均方根电流计算法相比,由于计及了电压降落,使计算结果更加精确。

### 参考文献:

[1] 王远宁,柳焯,强金龙. 配电网潮流问题研究[C]. 全国高校电力系统及其自动化专业第十一届学术年会论文集(上册),1995.  
 [2] Ray D Zimmerman, Hsiao - Dong Chiang. Fast decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution systems[J]. IEEE Transaction On Power Systems, 1995, 10(4) :2045 ~ 2051.

(下转第 13 页)

- Brussels.
- [4] Monticelli A. Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation[J]. IEEE Trans on Power System, 1993,8(3):1143 - 1149.
- [5] Abur A, Kim H, Celik M K. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks[C]. 1995 IEEE PES Winter Meeting, NY, p. no. 95 WM 212 - 1 PWRs.
- [6] Souza J C S, Leite da Silva A M, Alves da Silva A P. Data Debugging for Real - Time Power System Monitor Based on Pattern Analysis[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996,11(3):1592 - 1599.
- [7] Souza J C S, Leite da Silva A M, Alves da Silva A P. Online Topology Determination and Bad Data Suppression in Power System Operation Using Artificial Neural Networks[J]. IEEE Trans on PWRs. 1998. 13(3):796 - 803.
- [8] 周苏荃,柳焯. 新息图拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化,2000,24(4):23 - 27.
- [9] 周苏荃,柳焯. 新息图的智能特征[J]. 电力系统自动化,2000,24(13):15 - 19.
- [10] 周苏荃,柳焯. 新息图法识别多重网络结构动态变化[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):67 - 72.

收稿日期: 2001-11-16, 改回日期: 2002-01-09

作者简介: 杨威(1978 - ),男,硕士研究生,研究方向是电力系统状态估计; 周苏荃(1958 - ),女,博士,副教授,长期从事电力系统状态估计方面的研究和教学。

### Identification of the substation bus topology errors by the innovation graph approach

YANG Wei, ZHOU Su-quan

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper proposes an innovation graph method for the location and identification of the substation bus topology errors. Firstly bus/ branch network model is used, and the suspect buses at which split may occur are find out in terms of the branch innovation vector. Then the suspect buses are modeled in detail using a bus section/ circuit breaker network model. The circuit breakers are modeled in zero impedance branches. Lastly the method identifies the status of the circuit breakers and makes sure of the location where the buses split using the innovation graph approach. Results on the IEEE - 5 bus system are used to illustrate the method. The simulation on the IEEE - 30 bus system testifies validity of the approach.

**Keywords:** state estimation; substation bus topology errors identification; zero impedance branches; innovation vector; innovation graph

(上接第8页)

- [3] Goswami S K,Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for loss Reduction[J]. IEEE Transaction On Power Systems,1992,7(3):1484~1491.
- [4] 杨靖,赵登福,张东风. 利用特殊的数据结构和支路电流迭代法计算配电网潮流[J]. 西北电力技术,2000,28(2).
- [5] 李华东,韩学山,卢艺,等. 配电网潮流计算的实用算法[J]. 东北电力学院学报,1997,17(1).

收稿日期: 2001-09-26

作者简介: 戴雯霞(1972 - ),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与控制; 吴捷(1937 - ),男,教授,博导,从事自组织和自适应控制、电力系统运行与控制等领域的研究工作。

### Back/forward sweep algorithm for distribution network power flow calculation based on branch current

DAI Wen-xia, WU jie

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The topology structure table of distribution network is defined based on the simple input data, and the depth - first strategy is employed to identify hierarchy and nodes queue so deciding the nodes' sequence for power flow calculation. Based on branch current, this back/forward sweep algorithm is very efficient for distribution network power flow calculation. The 30 - bus system numerical results show the advantages of the algorithm.

**Keywords:** power flow calculation; distribution network; back/forward sweep algorithm