

一种实用的辐射网潮流算法

王 淳

(南昌大学信息工程学院,江西 南昌 330029)

摘要: 在分析现有配电网潮流计算方法的基础上,针对辐射型配电网潮流计算中广泛采用的前推回代法需要复杂的编号,提出了一个只要直接输入节点名称、无需节点和支路编号的以功率损耗和节点电压为参数的前推回代算法。根据提出的算法开发了相应的计算程序,并用算例验证了算法和程序的正确性。

关键词: 配电网; 潮流; 前推回代算法

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0013-04

0 引言

配电网潮流计算是配电网规划、运行分析、状态估计、网络重构等的基础。与输电网相比,配电网的网络结构有着明显的差异,其主要表现在:配电网一般采用闭环设计、开环运行,其结构呈辐射状。配电线的线径比输电线的小,导致配电网的 R/X 较大。配电网潮流计算的方法大致分为 2 类:一是利用输电网潮流计算方法:如牛顿-拉夫逊法、 $P-Q$ 分解法等。由于配电线路的 R/X 较大,使得在输电网中常用的这些算法在配电网的潮流计算中其收敛性难以保证^[1]。二是针对配电网的网络结构特殊性而开发的相应计算方法,其中以直接求解法^[2]、Dist Flow 法^[3]和前推回代法^[4-7]为典型代表。这些算法都具有编程简单、无需 JACOBIAN 矩阵、收敛可靠的特点。其存在的问题是:节点编号复杂(需要按一定规律对支路和节点编号),有些还需要增加一虚拟零阻抗支路^[4]。这些都增加了程序编制和使用的难度。本文针对辐射型网络潮流计算中较为普遍使用的前推回代法中存在的编号复杂的问题,提出了一个无需节点和支路编号、只要直接输入节点名称的以功率损耗和节点电压为参数的前推回代算法。根据提出的算法开发了相应的计算程序,并用算例验证了算法和程序的正确性。

1 数学描述

考虑如图 1 所示的一个三相平衡的辐射网络,其基本的支路潮流方程为:

$$P_{loss_{ij}} = r_{ij} (P_j^2 + Q_j^2) / V_j^2 \quad (1)$$

$$Q_{loss_{ij}} = x_{ij} (P_j^2 + Q_j^2) / V_j^2 \quad (2)$$

$$P_{ij} = P_j + P_{loss_{ij}} \quad (3)$$

$$Q_{ij} = Q_j + Q_{loss_{ij}} \quad (4)$$

$$P_i = PL_i + \sum_{m \in N_i} P_m \quad (5)$$

$$Q_i = QL_i + \sum_{m \in N_i} Q_m \quad (6)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(r_{ij}P_i + x_{ij}Q_i) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \quad (7)$$

式中: $P_{loss_{ij}}$ 、 $Q_{loss_{ij}}$ 为支路 ij 的有功和无功功率损耗; P_{ij} 、 Q_{ij} 为支路 ij 首端的有功和无功功率; P_i 、 Q_i 为节点 i 的注入有功和无功功率(节点 i 的负荷 + 节点 i 后续所有节点的功率之和 + 节点 i 后续所有支路功率损耗); PL_i 、 QL_i 为节点 i 的有功和无功负荷, V_i 为节点 i 的电压幅值, N_i 是以 i 为始节点的支路的终节点集,对图 1 所示的情况, $N_i = \{b, e, j\}$, 对于末端节点, N_i 为空集。

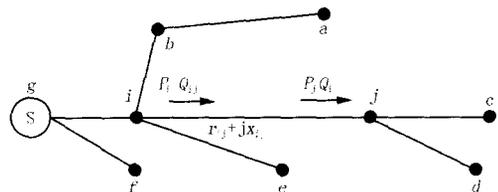


图 1 配电网示意图

Fig 1 A distribution system

2 计算流程

2.1 数据文件的形成及排序

对节点随意进行命名,并按任意顺序分别形成网络的支路文件和节点文件。其中支路文件中的每一个记录都包含有支路两端节点的名称、电阻、电抗。节点文件中的每一个记录都包含有节点的名称、有功负荷、无功负荷。现以图 1 所示的网络为例。节点以字母命名,按习惯以字母顺序排列形成的网络支路文件和节点文件见表 1 和表 2 所示。表

1中 I, J 为支路两端的节点名称, R, X 为支路的电阻和电抗, 表 2 中 I 为节点的名称, P, Q 为节点的有功和无功负荷。

表 1 排序前的支路数据文件

Tab 1 Branch data file before arrangement

I	J	R	X
a	b	r_{ab}	x_{ab}
b	i	r_{bi}	x_{bi}
c	j	r_{cj}	x_{cj}
d	j	r_{dj}	x_{dj}
e	i	r_{ei}	x_{ei}
f	g	r_{fg}	x_{fg}
g	i	r_{gi}	x_{gi}
i	j	r_{ij}	x_{ij}

表 2 排序前的节点数据文件

Tab 2 Node data file before arrangement

I	P	Q
a	P_a	Q_a
b	P_b	Q_b
c	P_c	Q_c
d	P_d	Q_d
e	P_e	Q_e
f	P_f	Q_f
g	P_g	Q_g
i	P_i	Q_i
j	P_j	Q_j

在开始潮流计算前, 先对支路文件和节点文件进行一次排序。辐射型网络的一个显著特点是节点数等于其支路数加 1, 也就是除电源节点外, 每一条支路对应着一个节点。针对辐射状网络的这个特点, 支路数据记录编号从 1 开始, 节点数据记录编号从 0 开始, 这样使得按下述方法排序后的支路文件和节点文件的同一序号的记录具有一一对应的关系 (即节点和它的注入功率支路具有同一个序号)。具体排序方法如下: 首先根据电源节点的名称在节点文件中搜索出电源节点, 并将其移到文件中序号为 0 的位置; 接着进入支路文件, 搜索出第一条与电源节点相联的支路, 将该支路移到支路文件中序号为 1 的位置, 并使得支路首末端与功率流动方向一致 (即功率流动方向为始端 \rightarrow 终端); 返回节点文件, 搜索出这个支路的另一节点, 并将其移到序号为 1 的位置; 再进入支路文件, 搜索出第二条与电源点相联的支路, 将该支路移到支路文件中序号为 2 的位置, 并使得支路首末端与功率流动方向一致; 重回节点文件, 搜索出这个支路的另一节点, 并将其移到序号为 2 的位置, 如此继续下去, 直到与电源点相联

的支路搜索完毕。然后按同样的方法分别在支路文件和节点文件中搜索出与节点文件中序号为 1 的节点相联的所有支路及支路对应的另一端节点, 整个过程直到全部支路搜索完毕。图 1 对应的文件排序后的结果如表 3 和表 4 所示。表 3 中 IS, IR 分别为支路首端和末端的节点名称, 表 3、表 4 中的最后一列只是说明数据顺序, 不是数据文件中的内容。

表 3 排序后的支路数据文件

Tab 3 Branch data file after arrangement

IS	IR	R	X	
g	f	r_{fg}	x_{fg}	1
g	i	r_{gi}	x_{gi}	2
i	b	r_{bi}	x_{bi}	3
i	e	r_{ei}	x_{ei}	4
i	j	r_{ij}	x_{ij}	5
b	a	r_{ab}	x_{ab}	6
j	c	r_{cj}	x_{cj}	7
j	d	r_{dj}	x_{dj}	8

表 4 排序后的节点数据文件

Tab 4 Node data file after arrangement

I	P	Q	
g	P_g	Q_g	0
f	P_f	Q_f	1
i	P_i	Q_i	2
b	P_b	Q_b	3
e	P_e	Q_e	4
j	P_j	Q_j	5
a	P_a	Q_a	6
c	P_c	Q_c	7
d	P_d	Q_d	8

2.2 前推回代过程

第一步: 设定各节点电压的初始值为电源节点电压值, 并设迭代计数 $k=0$ 。

第二步: 按节点文件的顺序, 设各节点的注入功率的初值为对应节点的负荷值, 即按公式 (5) 和 (6) 但不包括第二项。

第三步: 按排序后的文件的逆序, 利用公式 (1) ~ (4) 算出各支路的功率损耗和首端功率。并将计算出的支路首端功率按公式 (5) 和 (6) 合并进支路首端节点的注入功率中 (即加上第二步中没有考虑的公式 (5) 和 (6) 中的第二项)。这个过程直到全部支路计算完毕。

第四步: 利用第三步求得的功率分布, 从序号 1 开始, 顺着排序后文件的顺序, 按公式 (7) 依次求出各节点电压。

第五步: 检查计算精度是否满足要求, 一般以

$\max\{|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}|\} <$ 作为计算收敛的判据。若满足,则输出计算结果;否则,返回第二步循环计算。

3 算例

采用 VB6.0 对上述算法进行了程序编制,并对图 2 所示的一个 30 节点的配电网进行了计算,原始数据参见 [8],计算结果如表 5 中的第二列所示,为比较起见,表 5 中第三和第四列给出了参考文献 [8] 和 [9] 对同一网络的计算结果,本文和这两个文献的计算结果非常吻合。

表 5 算例计算结果

Tab 5 Results of a 30-node distribution system

节点号	本文	文献 [8]	文献 [9]
1	1.050 000 0	1.05	1.050 000
2	0.926 456 0	0.926 4	0.926 458
3	0.925 062 7	0.925 0	0.925 064
4	0.924 136 4	0.924 1	0.924 138
5	0.923 937 0	0.923 9	0.923 939
6	0.918 512 0	0.918 5	0.918 514
7	0.917 963 0	0.917 9	0.917 965
8	0.917 963 0	0.917 9	0.917 965
9	0.917 063 8	0.917 0	0.917 065
10	0.916 431 9	0.916 4	0.916 434
11	0.915 829 1	0.915 8	0.915 831
12	0.915 514 3	0.915 5	0.915 516
13	0.915 934 0	0.915 9	0.915 936
14	0.915 697 5	0.915 7	0.915 699
15	0.915 234 1	0.915 2	0.915 236
16	0.915 216 7	0.915 2	0.915 218
17	0.914 498 9	0.914 5	0.914 501
18	0.914 945 4	0.914 9	0.914 947
19	0.922 907 5	0.922 9	0.922 909
20	0.922 708 1	0.922 7	0.922 710
21	0.921 796 6	0.921 8	0.921 798
22	0.921 238 0	0.921 2	0.921 240
23	0.921 029 6	0.921 0	0.921 075
24	0.920 621 0	0.920 6	0.920 623
25	0.920 437 6	0.920 4	0.920 439
26	0.919 889 7	0.919 8	0.919 891
27	0.919 854 9	0.919 8	0.919 857
28	0.920 019 9	0.920 0	0.920 022
29	0.918 914 2	0.918 9	0.918 916
30	0.919 724 2	0.919 7	0.919 726

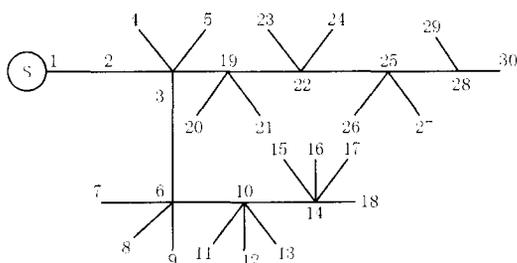


图 2 算例网络结构图

Fig 2 Network for a 30-node distribution system

4 讨论

为了与深度优先搜索法进行比较,表 6 给出了对图 1 采用深度优先搜索法从根节点开始的支路搜索结果,其最后一列为支路所在层号。将表 3 和表 6 进行对比可以看出:虽然深度优先搜索法也能解决编号和支路左右端子确定的问题,可以按照从根节点开始的搜索结果的逆序和顺序进行前推回代计算,但其排序后的支路在层次上是杂乱无章的;而采用本文提出的方法可以使得排序后的支路层次分明,依次为第 1 层、第 2 层、...、最后一层,这有利于并行计算各层次的支路功率损耗和电压损耗。

表 6 深度优先搜索后的支路排序

Tab 6 Branch data file by DFS

K	R	R	X	
g	f	r_{fg}	x_{fg}	1
g	i	r_{gi}	x_{gi}	1
i	b	r_{bi}	x_{bi}	2
b	a	r_{ab}	x_{ab}	3
i	j	r_{ij}	x_{ij}	2
j	c	r_{cj}	x_{cj}	3
j	d	r_{dj}	x_{dj}	3
i	e	r_{ei}	x_{ei}	2

5 结论

本文提出了一种不需要节点和支路编号的辐射状配电网潮流计算方法。该方法以节点名称代替节点编号,首先按任意顺序分别形成节点文件和支路文件,然后按文中所提出的方法对这两个文件同时进行一次排序。在此基础上,以支路的功率损耗和节点电压为参数进行前推回代计算。所提算法简洁明了,编程方便易行。算例结果说明了所提算法的有效性。

参考文献:

- [1] Haley P H, Ayres M. Super Decoupled Load Flow with Distribution Slack Bus[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(1): 104-133.
- [2] Goswami S K, Basu S K. Direct Solution of Distribution Systems[J]. IEE Proceeding C, 1991, 138(1): 78-88
- [3] 黄纯华, 陆俊, 葛少云. 树状电力网络潮流问题的一个有效算法[J]. 天津大学学报, 1992, (4): 113-118
HUANG Chun-hua, LU Jun, GE Shao-yun. An Efficient Algorithm for the Study on Power Flow Problem of Tree Power Network[J]. Journal of Tianjin University, 1992, (4): 113-118.

- [4] 张尧,王琴,宋文南,等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-220
ZHANG Yao, WANG Qin, SONG Wen-nan, et al A Load Flow Algorithm for Radial Distribution Power Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220
- [5] Ghosh S, Das D. Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks[J]. IEE Proceeding—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(6): 641-648
- [6] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 116-120
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on Convergence of Back/Forward Sweep Distribution Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 116-120
- [7] Mekhamer S F, Soliman SA, Moustafa M A, et al Load Flow Solution of Radial Distribution Feeders: a New Contribution[J]. Electrical Power & Energy System, 2002, (24): 701-707
- [8] 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): 57-63
LI Hua-dong, HAN Xue-shan, LU Yi, et al Load Flow Practical Algorithm in Power Distribution System[J]. Journal Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1997, 17(1): 57-63
- [9] 曹亮,孔峰,陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60
CAO Liang, KONG Feng, CHEN Kun-wei A Practical Algorithm of Load Flow Calculation for Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 58-60

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2004-11-23

作者简介:

王淳(1963-),男,博士,副教授,从事电力系统规划,可靠性与电力市场方面的研究。E-mail: cwang_ncu_cn@163.com

A practical algorithm of power flow calculation for radial networks

WANG Chun

(Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: On the basis of analyzing the techniques for power flow calculations of distribution network, this paper presents a new backward/forward sweep power flow algorithm. This algorithm takes power loss and node voltage as parameters, only inputs node name directly without needing the codes of nodes and branches. The algorithm details are discussed. A program is developed according to the proposed algorithm, and the correctness of the proposed algorithm and program is verified by the case.

Key words: distribution system; load flow; backward/forward sweep algorithm

(上接第 12 页 continued from page 12)

孙辉(1964-),女,博士,教授,目前研究方向是电力系统分析与控制;

谈晓魏(1964-),男,本科,高级工程师,目前研究方向是电力系统继电保护应用。

An amended fault calculation method in unbalanced power system

TANG Hong-dan¹, SUN Hui¹, TAN Xiao-wei²

(1. Dalian University of Science & Technology, Dalian 116024, China; 2. Huaneng Dalian Power Plant, Dalian 116100, China)

Abstract: With the three-phase unbalanced lines largely appear in the ultra-voltage power system, it is difficult to use the conventional symmetrical method and its sequence network connection technique. This paper presents an improved way to calculate the fault. It separates the network into symmetrical parts and unsymmetrical parts, synthetically uses sequence components and phase components. In the sequence domain, it equals the symmetrical parts to its boundary nodes; in the phase domain, with the polymorphic calculation technique, it deals with all kinds of faults directly without huge calculating work as it is in the conventional phase components method. The example shows the advantages of this improved method.

Key words: fault calculation; unbalanced network; symmetrical components; phase components