

配电系统的实用计算机潮流计算方法研究¹

孙秋野, 张化光, 孙羽

东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 (110004)

E-mail: sunqiuye@126.com

摘要: 由于配电网呈辐射状, 前推回代法及其各种变形是配电潮流计算的有效算法, 它具有编程简单、数值稳定性好、计算效率高等优点。本文给出了一种基于支路电流法配电网潮流计算, 在以广度优先搜索为原理的网络拓扑基础上, 采用前推回代的方法, 对典型的辐射状配电网进行潮流计算, 并能针对要求得到任意的支路电流或节点电压。仿真实例验证了其可靠性和实用性, 而利用广度遍历的网络拓扑得到配电网的网络结构, 能更好的适应配电系统可靠性的实时评估和优化。

关键词: 网络拓扑, 前推回代, 潮流计算

中图分类号: TM711, TM744

1. 引言

目前, 传统的电力系统潮流计算方法, 如牛顿-拉夫逊法^[1,2]、PQ 分解法^[3]等, 均以高压电网为对象; 而配电网的电压等级较低, 其线路特性和负荷特性都与高压电网有很大区别, 因此很难直接应用传统的电力系统潮流计算方法。

基于前推回代法^[4]的电力系统潮流计算, 是一种充分考虑配电系统的网络结构和负荷特点的潮流计算方法, 它提出了一种新的分层方式, 针对配电网呈辐射状的特点, 用广度优先搜索进行分层, 在进行前推回代的潮流计算前, 先对配电系统进行网络拓扑。而原来得潮流计算方法通常都是建立在网络结构已知的基础上, 即使进行了网络拓扑, 也是将其与潮流计算分离进行, 这大大增加了算法的计算复杂度。

本文以改进的广度优先搜索^[5]策略为理论基础, 介绍了一种基于支路电流^[6]的配电网潮流前推回代法, 用广度优先搜索形成层次结构, 再按层直接进行电流前推和电压回代, 层次比较分明, 可以处理多分支辐射网, 具有收敛可靠、速度快且程序实现简单等特点。最后经仿真证明了本算法是一种实用的潮流算法。

2. 系统介绍

配电网具有闭环设计、开环运行的特点^[7], 即在某些情况下, 比如为了平衡馈线间的负荷, 需要在馈线之间转移负荷时, 会出现暂时的双电源或闭环情况, 但是在正常运行时, 配电网采用单电源点, 开环运行。在正常运行时, 一条馈线只有一个电源点, 这个电源点在潮流计算中作为平衡点或根节点, 而且每个负荷节点只有一个父节点, 馈线整体呈辐射状拓扑结构, 所以大量的配电网潮流计算研究以辐射状网络为研究模型。

对于一个有 N 个节点的配电网, 其支路数为 $N-1$ 。将配电网中第 i 个节点表示为 v_i , 而将第 j 条支路表示为 b_j ; 对于一个由节点 v_i 和 v_j 确定的支路 b_j , 如果支路上潮流的方向是从 v_i 指向 v_j , 则称 v_i 为该支路的始点, 而称 v_j 为该支路的末点。显然入度为 0 的节点为电源点, 出度为 0 的节点为末梢点。我们用 I_j 和 $P_j + jQ_j$ 分别表示支路 b_j 上流过的电流和功率, 用 U_i 表示节点 v_i 上的电压的幅值; 用 $R_j + jX_j$ 表示支路 b_j 的阻抗, 以电源点为电压参考点。

配电网潮流计算的模型可以描述为: 对一有 N 个节点的配电网, 已知量为根节点 (或电源点) 的电压 U_0 、各节点的负荷值 $P_{L,i} + jQ_{L,i}$ (其中 $i=1, 2, 3, \dots, N-1$)、配电网

¹本课题得到国家自然科学基金项目 (60325311; 60504006; 60274017) 的资助。

拓扑结构和各支路的阻抗。待求量为各节点的节点电压 U_i (其中 $i=1, 2, 3, \dots, N-1$)、流经各支路的功率 P_j+jQ_j (其中 $j=1, 2, 3, \dots, N-1$)、各支路的电流和系统的有功损耗等。

2.1 基于支路电流的配电网潮流计算方法

配电网支路类算法是配电网潮流计算中最的一类算法,也是被广泛研究的一种配电网潮流算法。这类算法主要有是面向回路的回路法、前推回代方法和基于支路电流的潮流计算方法^[8,9]。本文中采用的是基于支路电流的前推回代法,下面将进行详细的介绍。

在辐射状的配电子网中,对于支路 b_j 有

$$\mathring{U}_j = \mathring{U}_i - \mathring{I}_j(R_j + jX_j) \quad (1)$$

如果支路 b_j 的末节点 v_j 为末梢点,则该支路的电流 \mathring{I}_j 等于流过末梢点的电流,也即等于该末梢点的负荷电流 $\mathring{I}_{L,j}$, 即

$$\mathring{I}_j = \mathring{I}_{L,j} \quad (2)$$

节点 v_j 的负荷电流 $\mathring{I}_{L,j}$ 可表示为

$$\mathring{I}_{L,j} = \frac{P_{L,j} - jQ_{L,j}}{U_j^*} \quad (3)$$

式中, $P_{L,j} - jQ_{L,j}$ ——节点 v_j 负荷功率的共轭;

U_j^* ——节点 v_j 电压的共轭。

如果支路 b_j 的末点 v_j 不是末梢点,则支路电流 \mathring{I}_j 应为该支路末点 v_j 电流和其所有子支路的电流之和, 即

$$\mathring{I}_j = \mathring{I}_{L,j} - \sum_{k \in d} \mathring{I}_k \quad (4)$$

式中 d ——以节点 v_j 为父节点的支路的集合。

显然,根据式(2)~式(4),由末梢点向电源点递推就可以得到各支路的电流,然后根据式(1)从电源点向末梢点回推就可以求得各节点电压。

2.2 网络拓扑

通常情况下在配电网的潮流计算之前,并不知道辐射状的网络结构,即只有节点的个数和各节点的连接情况已知,这就需要在推回代计算前对配电网进行网络拓扑。通常的做法是首先进行网络拓扑,然后再根据网络结构设计潮流计算方法,这显然不是高效的办法。本文采用了一类改进的图搜索方法,将网络拓扑与潮流计算相结合,能够有效提升算法效率。

在假设初始状态是图中所有顶点都未被访问的条件下,这种方法从图中某一起点 V_i (配电网的潮流计算的根节点) 出发,访问 V_i , 然后依次访问 V_i 的邻接点 V_j 。在所有的 V_j 都被访问之后,再访问 V_j 的邻接点 V_k, \dots 直到图中所有和初始出发点 V_i 的有路径相通的点都被

访问为止。

在这种方法的遍历过程中,先被访问的点,其邻接点也先被访问,具有先进先出的特性,所以可以使用一个队列来保存已访问过的顶点,以确定对访问过的点的邻接点的访问次序。为了避免重复访问一个点,还要使用一个辅助数组来标记点的访问情况。下面给出以邻接表为存储结构时的广度优先搜索遍历算法 BFSL:

```

BFSL(k)          /*从 Vk 出发遍历图 ga, ga 采用邻接表表示*/
int k;
{ int I;
  edgenode *p;
  SETNULL(Q);          /*置空队*/
  printf(“%c\n”,ga[k].vertex) ; /*访问出发点 Vk*/
  visited[k]=1;        /*标记 Vk 已被访问*/
  ENQUEUE(Q,k);       /*访问过的点序号入队*/
  while (!EMPTY(Q))
  { i=DEQUEUE(Q);     /*队头元素序号出队*/
    p=ga[i].link;     /*取 Vi 的边表头指针*/
    while (p!=NULL)   /*依次搜索 Vi 的邻接点*/
    { if(visited[p→adjvex]!=1) /*Vi 的邻接点未曾访问*/
      { printf(“%c\n”,ga[p→adjvex].vertex);
        visited[padjvex]=1;
        ENQUEUE(Q,p→adjvex); /*访问过的点入队*/
      }
      p=p→next;
    }
  }
} /*BFSL*/
    
```

2.3 在网络拓扑基础上的前推回代潮流计算

本文以美国 PG&E 的 69 节点系统典型配电网为例,在已知条件只有各节点的负荷值 $P+jQ$, 线路阻抗 $R+jX$ 和各节点的连接情况下^[10]。首先,我们要按照邻接表的概念,将节点连接情况转移到数据库中,然后,根据广度优先搜索的原则,用队列的出、入及其扩展,进行网络拓扑,并用另外的两个队列存放各节点的前继和后续。为了简便,我们在这里举 12 点的配电系统说明,其邻接表表示如下:

表 1 12 节点配电系统邻接表

节点	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

如表 1 所示，在以 0—11 为序号标记的 12 点配电网中，相连的节点用 1 表示，不相连的节点用 0 表示。利用广度优先搜索遍历的方法，从 0 节点（根节点）开始，首先 0 节点入队，在数据库中接着搜索与队首（节点 0）相连的节点（节点 1），相邻点入队，这个过程称为队列的扩展，然后 0 节点出队，此时队首为 1 节点，继续搜索队首的邻接点，扩展、入队……。如此循环往复，直到队列为空，其过程如图 2 所示，其中 (a) 表示队列的变化，(b) 是其框图表示，（箭头标记所指为队首）：

在进行由末端节点的前推过程中，首先将各个末节点压栈，判断其是否有唯一后继，若唯一，则对该节点进行计算并将其前驱节点压栈；若不唯一，则将下一末节点出栈，进行以上计算，直至所有后继节点都被计算完毕。在进行由电源节点开始的回代过程中，采用队列方法对各个节点进行扩展，根据图搜索建立的分层，逐层修正各个节点点压。

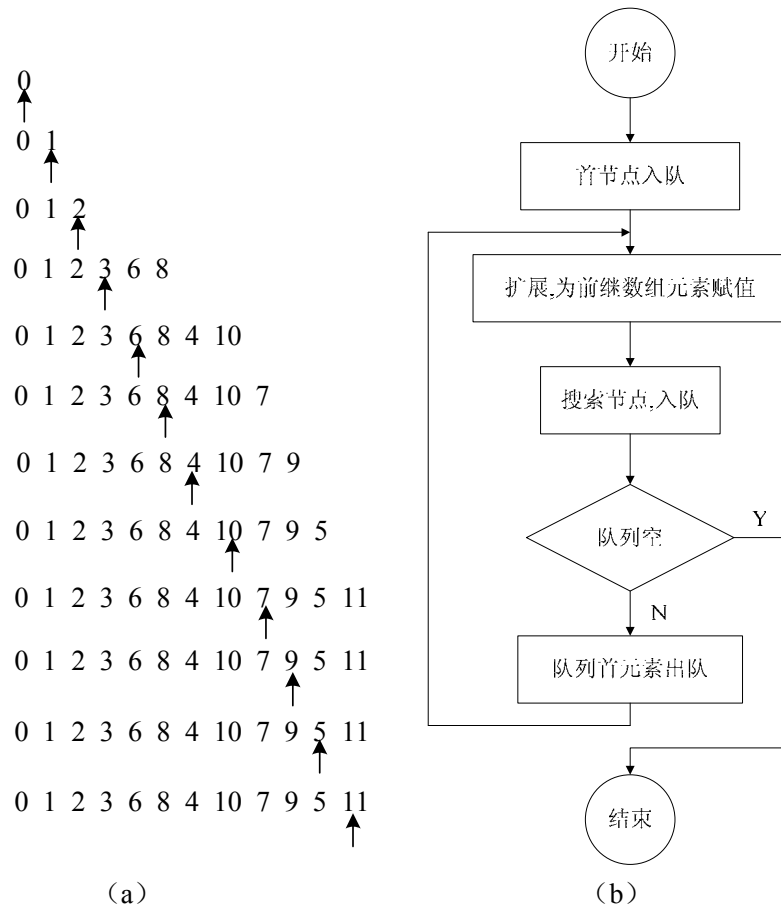


图 2 广度遍历

除此之外，在数据库中进行广度遍历的同时，用另外两个队列存放对于 N 点系统的每个节点的前继和后续的情况，程序代码如下，其中 a 存放对于序号为 0—68 的 69 点系统的每一点的后继情况，b 存放它们的前继情况。

完整的在网络拓扑的基础上的前推回代潮流算法框图如下：



图3 系统流程图

3. 配电系统仿真实验

用 Visual Basic6.0 可以实现对辐射状配电网的网络拓扑和前推回代计算, 以典型的 69 节点网络结构为例, 其仿真结果如下:

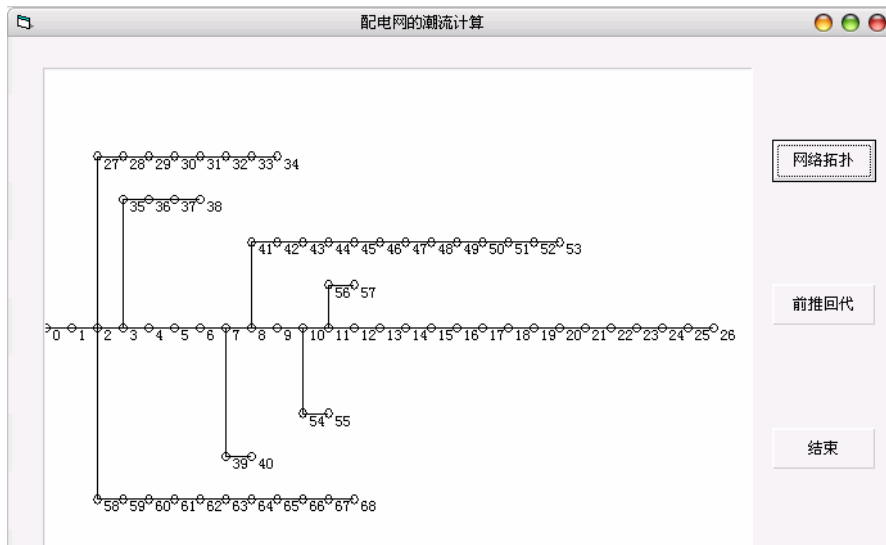


图4 仿真结果

在程序运行中,还可以解决对于任意支路电流和节点电压的求取,并能在满足收敛的前提下计算线路潮流和网损等量。

4. 结论

本文针对配电网闭环结构、开环运行,稳态运行时网络结构呈现辐射状,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的情况等特点,给出了在网络拓扑的基础上采用前推回代法的配电网潮流算法,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,在前推回代法的理论基础上,形成一种实用的配电网潮流计算方法。最后经仿真证明了这种基于支路电流的配电网潮流计算方法具有线性收敛的特点和计算简洁方便的优点。

参考文献

- [1] 孙宏斌,张伯明,相年德.配电网前推回推法的收敛性研究[J].中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.
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):26-29.
- [2] 蔡中勤,郭志忠.基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J].中国电机工程学报,2000,20(6):13-16.
CAI Zong-qin,GUO Zhi-zhong Newton Load Flow for Radial Distribution Network Based on Upstream Labeling Techinque [J].Proceedings of the CSEE,2000,20(6):13-16.
- [3] 于继来,王江,柳焯.电力系统潮流算法的几点改进[J].中国电机工程学报,2001,21(9):88-93.
YU Ji-lai,Wang Jiang,LIU Zhuo.Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(9):88-93.
- [4] Ray D Zimmerman,Hsiao-Dong Chiang.Fast decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distributin systems[J].IEEE Transaction On Power Systems,1995,10(4):2045-2051.
- [5] 刘彦明,荣政.计算机软件技术基础—高级程序设计[M].北京:人民邮电出版社,2005.
- [6] 戴雯霞,吴捷.基于支路电流的配网潮流前推后代法[J].继电器,2002,30(5):6-8.
- [7] 刘健,毕鹏翔,董海鹏.复杂配电网简化分析与优化[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [8] 张学松,柳焯,于尔铿,陈竟成.配电网潮流算法比较研究[J].电网技术,1998,22(4):45-49.
- [9] D.Shirmohammadi,H.W.Hong,A.Semlyen,G.X.Luo.A compensationbased power flow method for wealy meshed distribution and transmission network.IEEE Trans.On Power Systems.1988,3(2):753-762
- [10]P.Aravindhbabu,S.Gannapathy,K.R.Nayar.A novel technique for the analysis of radial distribution systems. Electric Power Systems Research 2001(57):167-171.

The Research on Practical Flow Calculation with Computer for Distribution System

Sun Qiuye, Zhang Huaguang, Sun Yu

School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang (110004)

Abstract

The forward-backward sweep method is efficient algorithm for distribution system for the radial network with the advantages of easy programming, good stability and high efficiency. An improved branch current flow calculation method is put forward aiming at network structure. The algorithm can deal with the radial distribution system with forward-backward sweep method based on network topology. The branch current and node voltage can be obtained easily. And the result shows the effectiveness and usefulness of the approach.

Keywords: Network topology, Forward-backward sweep, Flow Calculation