

基于叠加原理和前推回代法求解少环辐射网潮流的新方法

董 惠^{1,2}, 赵 宁¹

(1 西安建筑科技大学 信息与工程学院, 陕西 西安 710055; 2 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 在已有的配电网前推回代法基础上, 提出了适用于少环辐射配电网的一种潮流计算方法. 首先, 利用叠加原理将少环辐射网分解为纯环状网和纯辐射网, 分别对其进行潮流计算, 并将两个网络的潮流进行叠加, 求解整个网络的潮流; 其次, 采用前推回代法进行少环辐射网潮流计算, 给出了算法流程, 并针对一 28 节点算例采用 C 语言编制程序进行计算. 结果表明该方法具有收敛速度快, 迭代次数少, 运算效率高的优点.

关键词: 少环辐射网; 叠加定理; 前推回代法; 潮流

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)10-0120-04

An Algorithm Based on Superposition Principle for Power Flow of the Weakly Meshed Distribution Network

DONG Hui^{1,2}, ZHAO Ning¹

(1 School of Information and Automation, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2 School of Automatization, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the structure feature of the weakly meshed distribution network, a power flow method based on the superposition principle is proposed in this paper. The network is firstly divided into two networks based on the superposition principle: one is the pure radial network and the other is the pure meshed network. Power flows are solved respectively in the two networks, then power flow calculation is obtained by superimposition the power flows of the two networks. The back/ forward sweep method are employed for power flow calculation and the algorithm process. The presented method is tested by 28 nodes system which programmed with C language. The results indicate that the proposed method can save memory and has good convergence performance and high efficiency.

Key words: weakly meshed distribution network; superposition principle; back/ forward sweep method; power flow

1 引言

配电网络具有不同于输电网络的显著特点: 辐射状或接近辐射状结构; 支路参数 r 和 x 相差不大; 支路数和节点数十分庞大等^[1-5]. 并且在配电网络的实际运行和配电网络优化(如: 网络重构, 供电恢复等)计算中, 经常需要计算所有分段开关和联络开关闭合情况下所形成的少环辐射网络的潮流.

许多学者为了解决配电网络的潮流问题, 进行

了大量的研究, 提出了很多相关算法. 文献[3, 6]介绍改进牛顿法和快速解耦法来求解配电网潮流, 文献[4]则根据配电网的辐射结构, 提出用分层的思路计算网络潮流.

文中提出了一种基于叠加原理的少环配电网潮流计算的方法, 具有良好的收敛性和较高的工作效率. 并通过 C 语言编制程序, 对一个 28 节点的少环辐射网进行了实例验证.

2 利用叠加定理分解少环辐射网络

该方法利用叠加原理首先将合环点处等效成两个大小相等、极性相反的电压源串联联接,电压源的大小由开环运行时环点两端的电位差求得.然后将整个网络分解为两个独立的子网络:纯辐射状网络(开环运行的网络)和纯环状网络(仅保留环状支路和合环点处电压源)^[3].两个子网络的潮流计算都很简单,将其计算结果叠加便可计算出整个网络的潮流.

图1所示为一简单的含有5个环的配电网示意图.应用上面提出的方法可将该网络分解为两个网络:(1)纯环状网络,如图2所示.该网络中所有电源和节点负荷被移走,所有的辐射状支路也被移走,只保留包含在环中的支路和合环点处附加的电压源;(2)纯辐射状网络,如图3所示.该网络中所有环都被解开,并保留原网络中所有的电源和节点负荷,形成一个不含环状结构的纯辐射状网络.对于分解形成的两个网络,分别进行潮流计算,将结果叠加即可求出整个网络的潮流.由于文中对节点负荷采用了恒功率模型,功率与电压、电流之间是非线性关系,所列方程系非线性方程,所以整个少环辐射网络的潮流是通过叠加求解的.

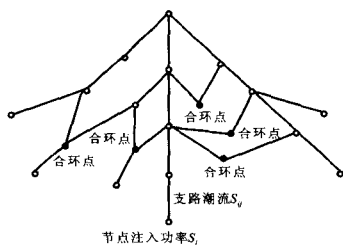


图1 少环辐射网

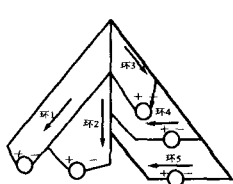


图2 纯环状网

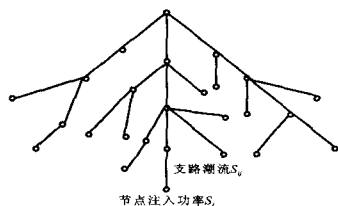


图3 纯辐射网

3 纯环状网络的潮流计算

辐射型多环网配电系统的解环与叠加可以按前面介绍的方法把原系统分解为两个网络.所有的环解开,新增解环点节点,形成纯辐射型网络,如图3,用前代后代法直接求解;另一个是纯环状网络,如图2,移去了电源(根节点)、所有负荷和所有不在环中

的支路,只保留包含在环中的支路和合环点处附加的电压源,求解各个回路电流,即解方程 $V = Z * I$, Z 为方阵,维数与环网的个数相同,在得到各个回路电流后再利用 $S = VI$ 求解回路功率.

对于一个具有 M 个回路(环)的电路来说,它具有相应的 M 个回路电流 I_m ,对这 M 个回路利用 KVL 列写回路电流方程,即可得:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, I_m 为回路 m 的回路电流, V_m 为回路 m 的开环电压差, Z_{kn} 为回路 m 的阻抗,当 $k = n$ 时, Z_{kn} 为各回路的自阻抗,其值为各回路中所有支路的阻抗之和,都为正值;当 $k \neq n$ 时, Z_{kn} 为回路间的互阻抗,其值为两回路间公共支路的阻抗之和,若两个回路的回路电流方向相反,则矩阵中的每个元素取负值,否则取正值;若两个回路间无公共支路,则该矩阵的所有元素为零,则上式可化简为 $V = Z * I$.

4 纯辐射网络层次分析及潮流计算

在计算纯环状网时,各个节点的元素是相互关联的,很难进行多层次的并行计算,而在计算纯辐射网潮流时,文中采用分层前推回代法.前推时,每条支路的功率都由该支路的下层支路功率决定,回代时,节点电压都由上一层节点决定.这种特点一方面限制了不同层次间的功率前推和电压回代不能同时进行,另一方面表明同一层次的支路功率之间没有前后关联,因此同一层次内完全可以实现功率和电压的并行计算.尤其对于大规模辐射型网络,因分层数显著小于支路总数,所以分层后能够充分发挥并行计算的优势,提高计算速度^[7].

4.1 纯辐射网节点与支路编号

为了更好的描述辐射状电网的前推回代法,需要找一种合适的树形网络拓扑描述方法来描述配电网络的拓扑结构.这里简要叙述一下 LZ 节点编号法^[6].LZ 节点编号法充分利用了树形网络结构的特点,使节点的编号与支路的编号得到了统一.

“树”的 LZ 描述条件定义如下:若用 $N + 1$ 个整数 $(0, 1, 2, \dots, N)$ 给一棵具有 $N + 1$ 个节点的“树”的所有节点进行编号后,对于任一条支路,它的送端节点的编号(设为 i)一定小于该支路受端节点的编号(设为 j),即 $i < j$.从 LZ 描述法的定义来看,对于任何一个树形网络,满足 LZ 描述法的拓扑不是唯一

的.文中采用一种按层编号的直观、快捷的符合 LZ 描述条件的拓扑描述方法,具体步骤如下:

- (1) 将电源点(根节点)的编号置为 0;
- (2) 按照其它节点到达根节点的最短路径所要经过的支路数给节点分层,离根节点只有一条支路的节点其层数为 1,其余的节点以此类推;
- (3) 按照层数由小到大依次为节点编号,当上一层节点编号确定后,则开始为下一层节点编号.

4.2 纯辐射网层次结构分析

由“树”的性质可知,“树”中的每一条支路都只有唯一的后续节点.所以在对支路编号时,从根节点开始按照广度优先搜索先对配电网进行分层,即在搜索过程中总是首先搜索下一步的所有可能状态,然后再考虑后面的各种情况.实现广度优先搜索,采用栈作为辅助结构,由于栈的操作顺序遵循先进后出的原则,先从头节点开始,逐层搜索把所有的节点都列举出来,以数组的形式存放在栈中;搜索到最后,从栈顶取出来分别进行功率前推计算,处理过后再把它的状态放到另一栈中,以便进行潮流计算.

辐射状配电网的分层是将根节点作为第一层,从根节点开始搜索,将搜索到的所有子节点作为第二层放入栈中;再以第二层各节点作为父节点并开始搜索,将其所有子节点作为第三层放入栈中;依次顺序搜索直至遍历全部节点.

4.3 纯辐射网的潮流计算

- (1) 假设节点电压 $\dot{U}_j$ 都为 1.

- (2) 计算各支路电流:

$$\dot{I}_j = (S_{kk} + S_k) / V_k \quad (2)$$

- (3) 回代计算各支路功率:

$$S_{jj} = S_{kk} + S_k + \dot{I}_j \dot{I}_j^* Z_j$$

$$\text{令 } S_j = P_j + jQ_j; S_{jj} = P_{jj} + jQ_{jj}$$

其中, S_j 为第 j 个节点的注入功率; S_{jj} 为各支路由首端到末端的支路潮流; $\dot{I}_j$ 为支路 j 上的电流; $\dot{I}_j^*$ 为支路 j 上的共轭电流, $k = j + 1$.

将式(2)代入(3)中,可得:

$$\begin{aligned} P_{jj} &= P'_{kk} + (P'_{kk}{}^2 + Q'_{kk}{}^2) R_j / V_k^2 \\ Q_{jj} &= Q'_{kk} + (P'_{kk}{}^2 + Q'_{kk}{}^2) X_j / V_k^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $P'_{kk} = P_k + P_{kk}$; $Q'_{kk} = Q_k + Q_{kk}$.

从最后层支路开始,利用上式向根节点推进,计算各支路功率.

- (4) 前推计算各节点电压:

$$U_k = U_j - I_j Z_j \quad (4)$$

其中,节点 j 是节点 k 的母节点, Z_j 为节点 j 到节点 k

的该段支路上的阻抗值.

令 $U_j = E_j + jF_j$ 并将代入式(4)可得

$$\begin{aligned} E_k &= E_j - \frac{(P_j R_j + Q_j X_j) E_j - (P_j X_j - Q_j R_j) F_j}{E_j^2 + F_j^2} \\ F_k &= F_j - \frac{(P_j R_j + Q_j X_j) F_j - (P_j X_j - Q_j R_j) E_j}{E_j^2 + F_j^2} \end{aligned} \quad (5)$$

- (5) 计算各个节点的电压值修正量,判断其是否满足收敛要求:

$$\Delta U = | \dot{U}'_j - \dot{U}_j | \quad (6)$$

其中, $\dot{U}'_j$ 为进行一次迭代后节点 j 的电压值, $\dot{U}_j$ 为本次迭代前节点 j 的电压值,并判断 ΔU 是否满足收敛要求,即判断 $\Delta U_{\max} < \epsilon$ 是否成立. ϵ 为事先规定的收敛判据,若最大修正量小于 ϵ ,则循环结束,得出电压计算结果;若最大修正量大于 ϵ ,则继续上述操作,直至其值小于 ϵ ,结束操作.

5 基于叠加原理的少环辐射网的算法流程

根据叠加原理将少环辐射网分解为纯环状网和纯辐射网进行计算,算法流程如下:

- (1) 读入网络参数,进行网络层次分析,初始化各节点电压和支路电流,并给各节点电压赋初值,使 U_i 为 1 ($i = 1 \cdots N$, 表示有 N 个节点).

- (2) 对配电网进行层次分析,形成回路(环)阻抗矩阵 Z .

- (3) 从第一层的末梢一级的负荷节点开始,利用式(2)计算支路电流.

- (4) 从第二层开始逐层计算非末梢节点的注入功率,利用式(3)回推计算各支路功率.

- (5) 对纯环状网利用式(1)进行回路功率计算.

- (6) 将回路功率叠加到对应回路(环)中的各个支路上.叠加原则为,当支路功率的参考方向和回路功率的环流参考方向一致时,叠加时将两电功率直接相加,否则将回路功率取负再与支路功率相加.

- (7) 利用式(5)前推求解各节点电压.

- (8) 计算开环点电压差变化量,即修正量 ΔU ,并找出各个电压幅值修正量最大值,即 $\Delta U_{\max}$.

- (9) 利用式(6)判定收敛条件,若满足收敛条件,则跳出循环,得到电压计算结果;否则重复步骤(3)~(9),直到满足公式(6)条件为止.

- (10) 在得到各个节点的电流和电压后,可进一步计算节点输出功率和线路损耗.

6 算例分析

文中以一 28 节点的少环辐射网为例,用 C 语言

编制程序,运行结果表明随着迭代次数的增加,计算的准确率是越来越高,以至于当把误差的精确度 ϵ 定为 0.0000001 时,只需要 6 次的迭代过程,即可使该系统达到要求,可见辐射网利用分层前推回代时的计算迭代过程是比较快的,同时如果使 ϵ 数值变大,则

迭代的次数也会相应的减少.并且误差最大点通常出现在该辐射网络的最后一个节点处.随着节点层次的提高,功率和电压值都在随之减小,这也证明了电路中功率前推(递增)电压回代(递减)的规律.28 节点电压和潮流的计算结果分别如表 1、表 2 所示.

表 1 28 节点电压计算结果

节点	电压幅值 U(kV)	电压相角 ω (rad)	节点输出有功 P(kW)	节点输出无功 Q(kvar)
1	9.216154	4.300898	35.280000	35.990000
2	9.865583	0.650037	35.280000	35.990000
3	9.676859	1.618074	14.000000	14.280000
...	...	...	...	...
26	9.180569	4.395417	35.280000	35.990000
27	9.217443	4.295642	35.280000	35.990000
28	10.000000	0.000000	0.000000	0.000000

表 2 28 节点潮流计算结果

支路 编号	送端 节点	受端 节点	送端节点输出 功率 P(kW)	送端节点输出 功率 Q(kvar)	受端节点输入 功率 P(kW)	受端节点输入 功率 Q(kvar)	线路损耗 P(kW)	线路损耗 Q(kvar)
1	14	15	35.305020	36.000402	35.280000	35.990000	0.025020	0.010402
2	13	14	49.345701	50.297300	49.305020	50.280402	0.040681	0.016898
3	12	13	84.889371	86.396768	84.625701	86.287300	0.263670	0.109468
...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	3	4	785.286866	774.288548	758.961517	756.247823	0.325348	0.040725
26	2	3	837.706291	814.901684	799.286866	788.568548	0.419425	0.333136
27	8	2	901.739522	870.588968	872.986291	850.891684	0.753231	0.697284

7 结束语

文中针对少环辐射网提出的潮流计算方法具有简单、实用、效率高等特点,能够适应大规模配电网络结构特点的要求.通过对少环辐射网采用叠加原理,使整个环状配电网络分解为一个纯辐射状网络和若干纯回路,并分别用前推回代和回路电流法求解,节省了计算时间和内存需求量.

测试和算例结果表明,所提出的算法正确合理,收敛性好且具有很高的运算效率.应用叠加原理也适用于多电源辐射网潮流计算,计算时将纯辐射网中每条馈线的根节点等效为不同的电源电压即可.

参考文献:

[1] 吴文传,张伯明. 配网潮流回路分析法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):54-58.
[2] 马瑾,徐建源,王胜辉,等. 辐射状配电网的潮流计算[J]. 沈阳工业大学学报,2004,2(1):37-41.

[3] 陈根军,王磊,唐国庆. 一种求解环状配电网潮流的有效算法—两阶段法[J]. 电力系统及其自动化学报,2001,13(5):5-9.
[4] Baran M E, Wu F F. Networks reconfiguration in distribution system for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transon Power Delivery,1989,4(2):1401-1407.
[5] Shirmohammadi D, Hong H W. A compensation - based powerflow method for weakly meshed distribution and transmission networks [J]. IEEE Transaction on Power Systems,1998,3(2):753-762.
[6] Ghosh S, Das D. Method for load flow solution of radial distribution networks [J]. IEE Proceeding G. T. D, 1999,146(6):641-648.
[7] 鲁慧民,冯博琴. 基于数据挖掘的电网故障关联性分析与研究[J]. 微电子学与计算机,2008,25(12):110-113.

作者简介:

董惠女,(1966-),博士研究生,副教授.研究方向为智能网络、信息处理.