

三相潮流计算在配电网自动化中的应用

李贵存¹,程利军¹,刘万顺¹,王 剑²

(1. 华北电力大学北京研究生部, 北京 100085; 2. 山东工业大学电力学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对配电网的实际情况和具体特点, 提出了一种适合于配电系统的三相潮流算法, 该算法是基于辐射状配电网结构的前推回代法的基本原理, 根据配电系统树形网络的特点, 采用图论中树的概念, 对网络节点采用分层、同层从左到右的顺序优化编号, 用前推回代法分别求解支路电流和节点电压, 并应用戴维南等值原理, 采用补偿法解环, 从而有效地解决了前推回代法在少环网或弱环网系统中收敛困难的矛盾。该算法最突出的优点是: 运算速度极快, 收敛性较强, 可以用于配电自动化系统中的故障优化隔离、网络优化重构以及无功补偿点的快速确定等方面。

关键词: 三相潮流; 配电网自动化; 补偿法

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)01-0008-04

1 引言

在新兴的配电网自动化技术中, 潮流分析是配电网分析和计算的最重要分析工具, 在配电系统实际运行中, 需要执行各种在线或离线操作, 这些操作需要有高级应用软件的支持和帮助, 而这些高级应用软件又需要具有运算速度较快、收敛性较强的潮流算法作为基础。由于配电系统都是辐射状并带有较高的大 R/X 值, 这使得配电网矩阵中对角元素不占优, 呈现某种病态现象, 基于高斯——塞德尔法或牛顿——拉夫逊法的常规输电网潮流算法在配电网潮流计算中不是很有效, 易于求解辐射状配电网的前推回推法对于实际的配电网具有少环网或弱环网的特点, 处理起来力不从心, 加之, 配电网中三相负荷的不平衡情况比较突出, 因此, 寻找一种能够处理弱环网或少环网的配电网三相潮流, 是配电网自动化发展的迫切需要。

本文基于上述要求, 提出一种新型的方程式和解题算法, 用于解决从一个节点出发, 能够处理多条馈线, 带有少环网或弱环网的配电系统三相潮流, 该算法充分考虑了支路三相模型的各种特征和详细的负荷模型, 具体实现方法是: 根据配电网的实际特点, 为加快算法的速度和节省内存, 采用图论中树的概念, 把实际配电网转化为二叉树的形式, 然后, 对节点采用分层、同层从左到右的顺序优化编号, 用前推回代法分别求解支路电流和节点电压, 但无需求解节点导纳矩阵及其因子表, 对于配电系统实际运行过程中, 存在少环网和弱环网的情况, 可应用戴维南等值原理, 采用补偿法解环, 把环网结构转化为简单的辐射网, 从而有效地解决了前推回代法在少

环网或弱环网系统中收敛困难的矛盾。由于该种算法具有类似于辐射网络潮流计算的前推回代法的运算形式, 因此, 运算速度极快, 收敛性较强, 进一步推广可以用于配电自动化系统中故障优化隔离、网络优化重构以及无功补偿点的快速确定等方面。这种算法的最突出的优点是: 能够很好地保证(甚至是在重负荷情况下, 如末梢电压低于 $0.5p.u.$ 情况下)算法的收敛性, 以及算法的快速性, 这种算法已经用于实际配电网自动化系统。

2 三相模型

2.1 馈线三相模型

以集中参数表示的三相馈线等值电路常用模型来表示, 对于配电线路, 我们可以建立一个三相的阻抗矩阵, 由于配电网电压较低, 并联电容可以忽略不计, 节点电压和支路电流可通过该矩阵建立联系, 其表达式如下所示:

$$\begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ \sqrt{V_{mc}} \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{la} \\ V_{lb} \\ \sqrt{V_{lc}} \\ V_l \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa, lm} & Z_{ab, lm} & Z_{ac, lm} \\ Z_{ba, lm} & Z_{bb, lm} & Z_{bc, lm} \\ \sqrt{Z_{ca, lm}} & \sqrt{Z_{cb, lm}} & \sqrt{Z_{cc, lm}} \\ Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{lma} \\ J_{lmb} \\ \sqrt{J_{lmc}} \\ J_{lm} \end{bmatrix}$$

其中, V_m 、 V_l 为节点 m 和节点 l 的三相电压, $[Z]$ 为配电线路 lm 的阻抗矩阵, J_{lm} 为支路 lm 的支路电流。

2.2 负荷模型

三相平衡或不平衡负荷模型可以看作是由恒功率模型、恒电流模型、恒阻抗模型或由它们组成的混合模型, 上述算法对于用户负荷模型没有任何特殊限制, 三相负荷模型如图 1 所示。

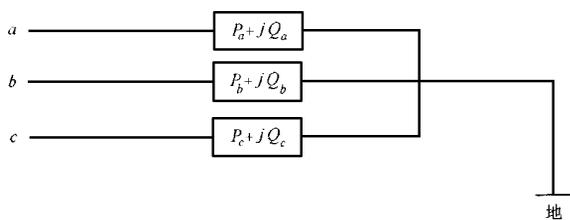


图1 三相负荷模型

用数学表达式可以写为：

$$P_{load} = P_{load}^0 (A_0 + A_1 V + A_2 V^2 + A_3 V^{lp})$$

$$Q_{load} = Q_{load}^0 (R_0 + R_1 V + R_2 V^2 + R_3 V^{lq})$$

其中, P_{load}^0 为某节点给定相的总负荷的有功功率, Q_{load}^0 为某节点给定相的总负荷的无功功率, V 为某节点给定相的电压幅值, A_0 、 R_0 为有功、无功负荷的恒功率分量, A_1 、 R_1 为有功、无功负荷的恒电流分量, A_2 、 R_2 为有功、无功负荷的恒阻抗分量, A_3 、 R_3 为有功、无功负荷中与 V^{lp} 、 V^{lq} 分量, V 的 lp 、 lq 次项满足下列实际负荷特征：

$$A_0 + A_1 + A_2 + A_3 = 1.0$$

$$R_0 + R_1 + R_2 + R_3 = 1.0$$

3 节点优化编号

放射状配电网的网络结构是一种树形网络结构,因此放射状配电网拓扑结构需要一种树形网络的拓扑描述方法来描述。对于任意一种树形结构,编号方法有多种。本文采用的节点优化编号方法是,先把实际的配电网通过在适当位置插入虚设节点和零阻抗支路等效化成二叉树的标准形式,即除根节点外,其它节点都只连接一个父节点和最多

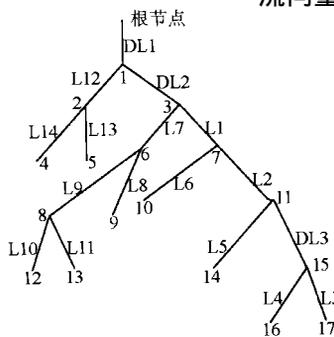
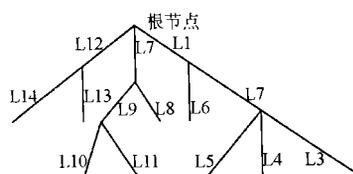


图2 实际网络转化为二叉树形式示意图

两个子节点,利用二叉树编号原则,按层编号、同层从左到右的面向支路原则,对网络进行编号。所谓按层编号、同层从左到右的面向支路编号方案是指按照层次遍历二叉树时访问到的各节点顺序,由小到大给各个节点编号。二叉树的层次遍历是指从二

叉树的第一层(根节点)开始,从上至下逐层遍历,在同一层中,则按从左到右的顺序对节点逐个访问。这样做,可以把一个随意编号的配电网系统,先以二叉树的形式链式存储,然后可用前序遍历算法对遍历到的每一个节点重新按顺序编号,这些都很容易编程实现,通过分析可以发现,这种编号方法对节省内存和提高计算速度很有利。这个过程我们用图2来加以说明。其中, $DL_n (n = 1, 2, \dots)$ 表示转化为二叉树时,需要添加的零阻抗支路。

4. 利用补偿法解环

前推回代算法是基于辐射状配电网结构的,在处理弱环网或少环网的网络结构时,将会出现收敛困难,采用补偿法,通过网络等值补偿的方法,解开环网,将环网转化为辐射型配电网,在不影响网络运行的条件下,向断点两侧支路注入大小相等、方向相反的电流,再运用前推加代法进行计算,这样就可以即保证算法收敛性,又能保证算法的快速性。

为了将弱环状配电网转化为放射状配电网,必须首先选择断点,在弱环配电网中,断点的选择基本不影响潮流算法的收敛性,因此,我们选择断点仅仅是为了解开环网。在这种情况下,断点的辨识是非常容易的,并且成为支路编号的一部分。

为了求取等值注入电流,将等值补偿后的多端口网络看成从端口看进去的戴维南等效网,在这个等效网络中,戴维南等值电压 v 是解环点的电压差向量;戴维南等值阻抗 Z 是从端口看进去的网络等值阻抗矩阵;戴维南等值电流 J 是解环点的注入电流向量,等值网络方程为：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1p} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{j1} & \dots & Z_{jj} & \dots & Z_{jp} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{p1} & \dots & Z_{pj} & \dots & Z_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_j \\ \vdots \\ J_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $V_1, \dots, V_j, \dots, V_p$ 是三相断点电压不匹配量,均为 3×1 矩阵; $[Z]$ 是断点阻抗矩阵元素,均为 3×3 的恒定矩阵; $J_1, \dots, J_j, \dots, J_p$ 是三相断点注入电流,均为 3×1 的矩阵。

利用戴维南定理进行等值补偿,求取断点注入电流的迭代过程如下：

- (1) 计算戴维南等值阻抗矩阵 $[Z]$ (辐射网络

的断点阻抗矩阵),该等值阻抗矩阵 $[Z]$ 在整个补偿过程中保持不变,因而只需一次形成因子表即可反复求解。

(2) 计算戴维南等值电压(即断点电压的不匹配量)。计算时,采用前推回代法放射状潮流算法,断点注入电流采用前一次的迭代值,断点注入电流的初值设为零。

(3) 计算断点注入电流的增量。第 K 次迭代时:

$$J^k = [Z]^{-1} V^k$$

(4) 更新断点注入电流。第 K 次迭代时:

$$J^k = J^{k-1} + J^k$$

(5) 重复步骤2、3、4,直到2中的最大断点电压不匹配量在指定的收敛范围之内,结束迭代过程。

5 算法

图3是这种算法的程序框图,由于配电网是开环设计、闭环运行,因此配电网是树枝状辐射型结构,这种潮流算法是沿着树状分枝来前推和回代的。具体计算步骤为:

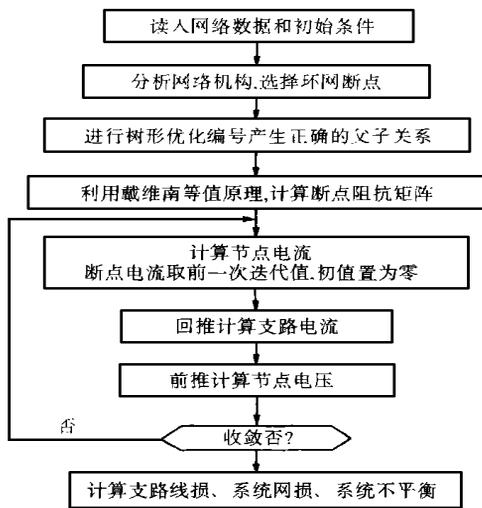


图3 潮流计算流程图

首先设电源点(根节点)为松弛节点,其电压大小已知,电压相角为零;其次设全网其余节点电压均为额定值。算法过程如下,当第 K 次迭代时:

(1) 计算节点注入电流

$$\begin{bmatrix} I_{ia}^k \\ I_{ib}^k \\ I_{ic}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{ia}/V_{ia}^{k-1})^* \\ (S_{ib}/V_{ib}^{k-1})^* \\ (S_{ic}/V_{ic}^{k-1})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ia}^k \\ I_{ib}^k \\ I_{ic}^k \end{bmatrix}$$

其中, I_{ia} 、 I_{ib} 、 I_{ic} 为节点 i 的各相注入电流, S_{ia} 、 S_{ib} 、 S_{ic} 为已知的节点 i 的各相注入功率, V_{ia} 、 V_{ib} 、 V_{ic}

为节点 i 的各相电压, Y_{ia} 、 Y_{ib} 、 Y_{ic} 为节点 i 的所有并联元的导纳值。

(2) 回代求取支路电流

回代时,从节点的最后一层开始,逐渐向根节点移动,支路 l 的电流为:

$$\begin{bmatrix} J_{la}^k \\ J_{lb}^k \\ J_{lc}^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} I_{la}^k \\ I_{lb}^k \\ I_{lc}^k \end{bmatrix} + \sum_m^M \begin{bmatrix} J_{ma}^k \\ J_{mb}^k \\ J_{mc}^k \end{bmatrix}$$

其中, J_{la} 、 J_{lb} 、 J_{lc} 为支路 l 的各相支路电流; I_{la} 、 I_{lb} 、 I_{lc} 为节点 l 各相注入电流; M 为与节点 l 相连的其它支路(除去支路 l)。

(3) 前推更新节点电压

前推时,从节点的第一层开始,逐渐向最后一层移动,节点 j 的电压为:

$$\begin{bmatrix} V_{ja}^k \\ V_{jb}^k \\ V_{jc}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ia}^k \\ V_{ib}^k \\ V_{ic}^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa,j} & Z_{ab,j} & Z_{ac,j} \\ Z_{ba,j} & Z_{bb,j} & Z_{bc,j} \\ Z_{ca,j} & Z_{cb,j} & Z_{cc,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{ja}^k \\ J_{jb}^k \\ J_{jc}^k \end{bmatrix}$$

其中, V_{ia} 、 V_{ib} 、 V_{ic} 为节点 j 前趋节点的节点电压, Z 为支路 j 的阻抗矩阵, J_{ja} 、 J_{jb} 、 J_{jc} 为支路 j 的支路电流。

(4) 计算功率不匹配量

节点处,功率不匹配量为:

$$S_{ia}^k = V_{ia}^k I_{ia}^k - |Y_{ia}| |V_{ia}|^2 - S_{ia}$$

$$S_{ib}^k = V_{ib}^k I_{ib}^k - |Y_{ib}| |V_{ib}|^2 - S_{ib}$$

$$S_{ic}^k = V_{ic}^k I_{ic}^k - |Y_{ic}| |V_{ic}|^2 - S_{ic}$$

如果除去电源节点(根节点)外,其它任一节点的功率不匹配量的实部或虚部大于指定的收敛门限值,则重复执行(1)~(4),否则结束迭代过程。

6 算例分析结果和具体应用

基于上述算法的程序已经调试通过,并在一个实际配电网中进行了测试。测试结果表明:基于前推回代的配电网三相潮流算法具有较好的收敛特性,其收敛特性是线性收敛,在取同样的收敛门限值的情况下,该算法迭代次数与网络规模基本无关,但与系统的三相不平衡度有关,特别是与环网的个数具有直接关系,虽然基于补偿法的三相潮流算法需要计算阻抗矩阵,但由于阻抗矩阵恒定,其生成和因子化只需一次,并且在前推回代的迭代过程中,不需要进行矩阵运算,因此,计算速度非常快。

6.1 在寻找无功补偿最优点的应用

上述潮流计算方法可以应用于配电系统寻找最优无功补偿点和系统的网络重构,系统的无功补偿点即为在该点安装无功源能使系统的网损最小,在潮流计算过程中,每个节点都可以作为可能的无功源补偿点,算出支路线损,把支路线损按由大到小的顺序排列,该列的最高点即为补偿源最优点(也就是无功补偿最优点。由于一些地理原因或其他原因,该列的最高点不适合,可选择该列的下一点。

6.2 在网络重构中的应用

上述算法可用于系统的故障快速隔离和网络优化重构,首先我们可以确定某一条支路发生故障,可以用来转移负荷所用的开关,系统发生故障后,潮流计算可以在第一次迭代过程中算出与故障节点相关支路的线损,从而能够快速算出每种方案对应的系统网损,从中选择一种最优的重构方案;由于该种潮流算法,能够在第一次迭代过程中,快速计算出每条支路的线损,对于一个较大的配电系统,迭代一次的时间不到 1ms,因此,可以应用于故障快速隔离和网络优化重构。

7 结论

该种潮流算法的快速性和强收敛性,已经通过实际的配电网得到验证,该方法能够保证算法的收敛性,并能够满足配电网的实时操作。

参考文献:

[1] Chiang H D. A fast decoupled load flow method for distribu-

tion power network: Algorithms analysis and convergence study. Int J Electr Power Syst, 1991, 13(3): 130 ~ 138.

[2] Renatoo C G. New method for the analysis of distribution networks. IEEE Trans, 1990, PWRD 5(1): 391 ~ 396.

[3] Das D, Kothari P, Kalam A, Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. Electr Power Energy Syst, 1995, 17(5): 335 ~ 346.

[4] Zimmerman D, Chiang H D. A fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10(4): 2045 ~ 2052.

[5] Cheng C S, Shirmohammadi D. A three phase power flow method for real time distribution analysis. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10(2): 671 ~ 676.

[6] Thukaram D, Parthasarathy K, Ramakrishna Iyengar B S. Simple algorithms for reactive power planning in transmission and distribution systems. 52nd Research and Development Session, Aurangabad, February 1985: 29 ~ 39.

[7] Udupa N, Thukaram D, Parthasarathy K, Raju G S. Computer aided algorithms for distribution system planning and improvements. Proceedings of the National Power Systems Conference, NPSC 94, December, 1994: 779 ~ 784.

收稿日期: 2000-05-12

作者简介: 李贵存(1972 -),在读博士生,IEEE 会员,毕业于山东工业大学电力学院,现就读于华北电力大学四方研究所;程利军(1966 -),在读博士生,IEEE 会员,毕业于华中理工大学,主要从事电力系统微机保护、电磁兼容等方面的研究;刘万顺(1943 -),博士生导师,主要研究方向为电力系统故障分析、电力系统微机保护。

The application of three phase power flow calculation to distribution automation system

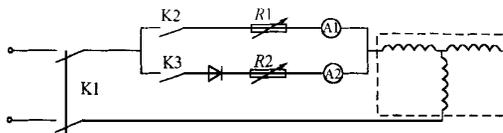
LI Gui-cun¹, CHENGLi-jun¹, LIU Wan-shun¹, WANGJian²

(1. North China Electric Power University, Beijing 100085; 2. Shandong University of Technology, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper introduces an approach to three phase distribution power flow for practical distribution system. This method is based on forward and backward method. This paper presents a new simple node and branch numbering scheme in term of the characteristic of radial distribution power system. The forward and backward method can not be directly applied to a weakly meshed distribution system, we use compensation method to break the loop in term of the Thevenin equivalent. This method has better robust and fast speed and can be used in realtime operations of distribution automation system.

Keywords: three phase power flow; distribution automation system; compensation method

更正启事: 《继电器》杂志 2000 年第 11 期第 58 页图 1 有误,应为:



特此更正,并向广大读者致谦!