

一种不对称配电网三相潮流快速算法

游广增, 徐政

(浙江大学电气学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了适应在线潮流计算对速度的要求, 阐述了一种配电网潮流快速算法, 并通过增加内电势点对其作了一些改进, 使其对实际运行中的各种三相网络不对称情况都能进行快速准确的计算。该方法只需要两个成熟的矩阵——母线注入到支路电流和支路电流到母线电压矩阵以及一个简单的矩阵乘法就能完成潮流的快速计算。用 Matlab 语言实现了该算法。并通过算例将其与牛顿法作了比较, 测试结果证明了该算法的高效性和准确性。

关键词: 潮流计算; 配电系统自动化; 辐射网络; DMS

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)19-0029-04

0 引言

随着配电系统的不断发展和扩大以及配电系统自动化水平的不断提高, 配电管理系统 (DMS) 的开发研究受到了重视。配电系统计算机潮流计算作为 DMS 的重要基础而日益被电力界所重视。目前常用的算法有前推回推法 (Backward/Forward Sweep Algorithm), ZBUS 高斯法 (ZBUS Gauss Approach), 回路阻抗法 (Direct Approach method)^[1~4], 带二阶项的快速潮流算法^[5]。前推回推算法优点是收敛速度快, 编程简单, 应用比较广泛, 但处理网孔能力较差。ZBUS 高斯法的收敛性能依赖于网络中存在的电压节点, 如果系统中只有松弛节点作为电压节点, 那么 ZBUS 高斯法的收敛速度可以与牛顿法相媲美, 但当网络中的电压节点增多时, 收敛速度减慢。回路阻抗法收敛性好, 处理网孔能力较强, 通过适当的编号, 可提高计算速度。在配电网结构较复杂、节点类型多的情况下, 上述方法在收敛性和速度上都不理想。文献 [6] Nagandra Rao 等人提出了带二阶项的快速潮流算法, 该方法的计算精度较高, 在节点较多的情况下具有良好的收敛性和较快的计算速度, 但随着网络规模的扩大, 其矩阵求逆计算量增大, 计算速度不能令人满意。以上方法都难以很好地适应日益发展的配电网运行方式, 以及 DMS 等系统在速度方面在线操作的要求。为此, 本文介绍一种配电网潮流快速计算方法, 通过在平衡节点处引入一个内电势点, 利用内电势点到平衡节点间的阻抗不对称来反映三相功率间的不平衡, 这样就使得所介绍算法能够对各种配电网三相不对称运行情

况都能进行快速准确计算。

1 配电网潮流直接计算方法介绍

1.1 三相不对称线路模型

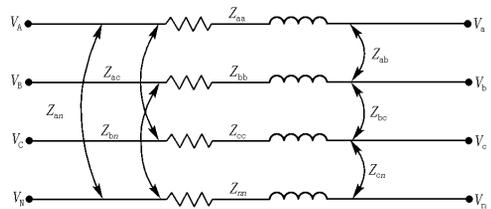


图 1 三相线路模型

Fig 1 Three-phase line section model

图 1 表示母线 i 和母线 j 之间的三相线段, 线路参数可通过卡尔逊和赖维斯^[7]开发的计算方法求得, 一个 4×4 矩阵, 它把三相线路自身和两两相互间的作用考虑进去, 可以表达为

$$[Z_{abcn}^g] = \begin{bmatrix} Z_{aa}^g & Z_{ab}^g & Z_{ac}^g & Z_{an}^g \\ Z_{ba}^g & Z_{bb}^g & Z_{bc}^g & Z_{bn}^g \\ Z_{ca}^g & Z_{cb}^g & Z_{cc}^g & Z_{cn}^g \\ Z_{na}^g & Z_{nb}^g & Z_{nc}^g & Z_{nn}^g \end{bmatrix} \quad (1)$$

经克朗简化后, 中线或地线的影响仍包含在模型中, 可表示为

$$[Z_{abc}^g] = \begin{bmatrix} Z_{aa-n}^g & Z_{ab-n}^g & Z_{ac-n}^g \\ Z_{ba-n}^g & Z_{bb-n}^g & Z_{bc-n}^g \\ Z_{ca-n}^g & Z_{cb-n}^g & Z_{cc-n}^g \end{bmatrix} \quad (2)$$

在图 1 中母线电压和支路电流可表示为

$$\begin{bmatrix} \overset{g}{V}_a \\ \overset{g}{V}_b \\ \overset{g}{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{g}{V}_A \\ \overset{g}{V}_B \\ \overset{g}{V}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overset{g}{Z}_{aa-n} & \overset{g}{Z}_{ab-n} & \overset{g}{Z}_{ac-n} \\ \overset{g}{Z}_{ba-n} & \overset{g}{Z}_{bb-n} & \overset{g}{Z}_{bc-n} \\ \overset{g}{Z}_{ca-n} & \overset{g}{Z}_{cb-n} & \overset{g}{Z}_{cc-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{g}{I}_{Aa} \\ \overset{g}{I}_{Bb} \\ \overset{g}{I}_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于没有出现的相,在矩阵中相应的行和列用零表示。

1.2 算法的形成

以下只考虑 a 相来推导计算公式,将推得的公式中各元素用相应的三相参数矩阵替换,就可以得到三相配电网的计算公式。

对于配电网来说,基于等价电流注入的模型更加实用^[8,9],如母线 i 其复功率 S_i 可表达为

$$\overset{g}{S}_i = (P_i + jQ_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

母线 i 相应的等价注入电流第 k 次迭代解法是

$$\overset{g}{I}_i^k = \text{Re } \overset{g}{I}_i^k(\overset{g}{V}_i^k) + j \text{Im } \overset{g}{I}_i^k(\overset{g}{V}_i^k) = \left[\frac{P_i + jQ_i}{\overset{g}{V}_i^k} \right]^* \quad (5)$$

其中: $\overset{g}{V}_i^k$ 和 $\overset{g}{I}_i^k$ 分别是在第 k 次迭代中母线电压和母线等效电流注入, $\text{Re } \overset{g}{I}_i^k$ 和 $\text{Im } \overset{g}{I}_i^k$ 分别是在第 k 次迭代中母线等效注入电流 $\overset{g}{I}_i^k$ 的实部和虚部。

1.3 关系矩阵的推导

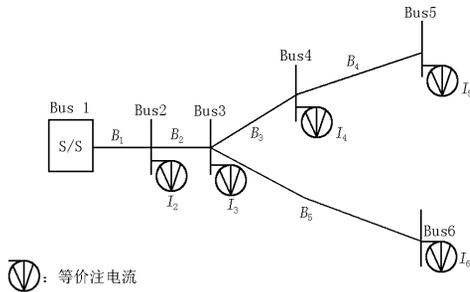


图 2 简单配电系统

Fig 2 Simple distribution system

如图 2 以一个简单配电系统为例,根据式 (5) 可将功率输入转化为等效电流注入。母线注入电流和支路电流间的关系可通过对配电网路运用基尔霍夫电流定律获得。这样就将支路电流通过公式表示成等效电流的函数。例如,支路电流 $\overset{g}{B}_1, \overset{g}{B}_3, \overset{g}{B}_5$ 可用等效注入电流表示为:

$$\begin{aligned} \overset{g}{B}_1 &= \overset{g}{I}_2 + \overset{g}{I}_3 + \overset{g}{I}_4 + \overset{g}{I}_5 + \overset{g}{I}_6 \\ \overset{g}{B}_3 &= \overset{g}{I}_4 + \overset{g}{I}_5 \\ \overset{g}{B}_5 &= \overset{g}{I}_6 \end{aligned} \quad (6)$$

因此可将母线注入电流和支路电流之间的关系表示为:

$$\begin{bmatrix} \overset{g}{B}_1 \\ \overset{g}{B}_2 \\ \overset{g}{B}_3 \\ \overset{g}{B}_4 \\ \overset{g}{B}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{g}{I}_2 \\ \overset{g}{I}_3 \\ \overset{g}{I}_4 \\ \overset{g}{I}_5 \\ \overset{g}{I}_6 \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$\text{等式 (7a) 可用通用形式写为: } [B] = [A][I] \quad (7b)$$

其中: A 就是母线注入电流到支路电流的矩阵常数矩阵, A 是上三角矩阵,只有 0 和 1 组成,图 2 中支路电流和母线电压之间的关系可通过式 (3) 得到,例如,母线 2, 3, 4 的电压为:

$$\overset{g}{V}_2 = \overset{g}{V}_1 - \overset{g}{B}_1 \overset{g}{Z}_{12} \quad (8a)$$

$$\overset{g}{V}_3 = \overset{g}{V}_2 - \overset{g}{B}_2 \overset{g}{Z}_{23} \quad (8b)$$

$$\overset{g}{V}_4 = \overset{g}{V}_3 - \overset{g}{B}_3 \overset{g}{Z}_{34} \quad (8c)$$

其中: $\overset{g}{V}_i$ 是母线 i 的电压, $\overset{g}{Z}_{ij}$ 是母线 i 和 j 之间的阻抗,将式 (8a)、(8b) 代入 (8c) 可得到:

$$\overset{g}{V}_4 = \overset{g}{V}_1 - \overset{g}{B}_1 \overset{g}{Z}_{12} - \overset{g}{B}_2 \overset{g}{Z}_{23} - \overset{g}{B}_3 \overset{g}{Z}_{34} \quad (9)$$

从式 (9) 中可以看出,母线电压可表示为支路电流,线路参数和变电所电压的函数,其他母线可以运用类似的过程。因此,支路电流和母线电压之间的关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \overset{g}{V}_1 \\ \overset{g}{V}_2 \\ \overset{g}{V}_3 \\ \overset{g}{V}_4 \\ \overset{g}{V}_5 \\ \overset{g}{V}_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overset{g}{V}_2 \\ \overset{g}{V}_3 \\ \overset{g}{V}_4 \\ \overset{g}{V}_5 \\ \overset{g}{V}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{g}{Z}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \overset{g}{Z}_{12} & \overset{g}{Z}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \overset{g}{Z}_{12} & \overset{g}{Z}_{23} & \overset{g}{Z}_{34} & 0 & 0 \\ \overset{g}{Z}_{12} & \overset{g}{Z}_{23} & \overset{g}{Z}_{34} & \overset{g}{Z}_{45} & 0 \\ \overset{g}{Z}_{12} & \overset{g}{Z}_{23} & 0 & \overset{g}{Z}_{45} & \overset{g}{Z}_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{g}{B}_1 \\ \overset{g}{B}_2 \\ \overset{g}{B}_3 \\ \overset{g}{B}_4 \\ \overset{g}{B}_5 \end{bmatrix} \quad (10a)$$

等式 (10a) 可以写成通用形式为

$$\overset{g}{V} = [C][B] \quad (10b)$$

其中: C 是支路电流到母线电压之间的矩阵。

1.4 解法总体过程

A 和 C 矩阵是根据配电系统拓扑结构形成的。A 矩阵代表了母线注入电流和支路电流间的关系。由母线注入电流所产生的相应支路电流变量通过 A 矩阵直接计算, C 矩阵代表了分支电流和母线电压

之间的关系。由支路电流变量所产生的相应母线电压变量可通过 C 矩阵计算。结合式 (7b) 和 (10b), 注入电流和母线电压之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^g \\ \mathbf{V}^g \end{bmatrix} = [C][B] = [C][A] \begin{bmatrix} \mathbf{I}^g \\ \mathbf{V}^g \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \mathbf{I}^g \\ \mathbf{V}^g \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过反复求解式 (12) 可得到配电潮流的解

$$\mathbf{I}_i^g = \operatorname{Re} I_i(V_i^g) + j \operatorname{Im} I_i(V_i^g) = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i^g} \right]^* \quad (12a)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}^{g,k+1} \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \mathbf{I}^g \end{bmatrix} \quad (12b)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}^{g,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{g,k+1} \end{bmatrix} \quad (12c)$$

2 算法的改进

以上所介绍的算法对于平衡点三相对称以及配电网三相对称运行时的潮流计算是快速和准确的。但是, 通常在实际配网运行中, 由于网络中各种不对称情况的影响, 系统的三相潮流也不对称, 在平衡点处尽管有电压调节器的调节作用, 仍然不能保证此处三相电压完全对称, 通常只能调节某一相电压或线电压保持不变。在这种情况下, 有必要将平衡点处三相电压区别对待, 三相电压不完全是已知量, 需要对平衡点列功率方程。本文对平衡点处理时认为其三相电压不对称, 需要进行相应的计算。将平衡节点的 a 相电压取为系统的基准电压, 另两相作为待求变量参加计算。在平衡节点处引入发电机内电势节点^[5], 内节点记入后的网络如图 3 所示。增加内电势节点后, 平衡节点变为一个中间节点, 其三相注入功率都为零。

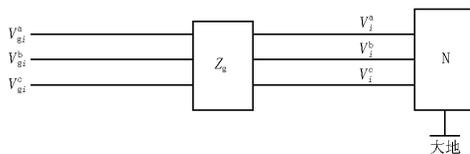


图 3 增加内电势点的系统图结构示意图

Fig 3 Schematic diagram of the system with electrical node

增加内节点 g 后, 对应平衡点的已知量有: a 相电压, 平衡点 i 处, $S_i^a = 0, S_i^b = 0, S_i^c = 0$, 同时由发电机内部结构对称, 因此内节点电势三相对称, 因此 g 点的 b, c 相电压可以由 a 相电压完全表示。这样我们可以将点 g 作为一负荷点, 先对 a 相进行运算, 求 g 处 a 相电压, 由下式求得 V_{gi}^b, V_{gi}^c , 进而以 g 点为平衡点, 进行三相潮流计算。

$$\begin{aligned} V_{gi}^a &= V_{gi}^b = V_{gi}^c \\ b &= \frac{a}{g_i} - 2 \sqrt{3} \\ c &= \frac{a}{g_i} + 2 \sqrt{3} \end{aligned} \quad (13)$$

上述方法进行简单修改, 就能用于弱环状配电网^[10]。

3 算法的实现

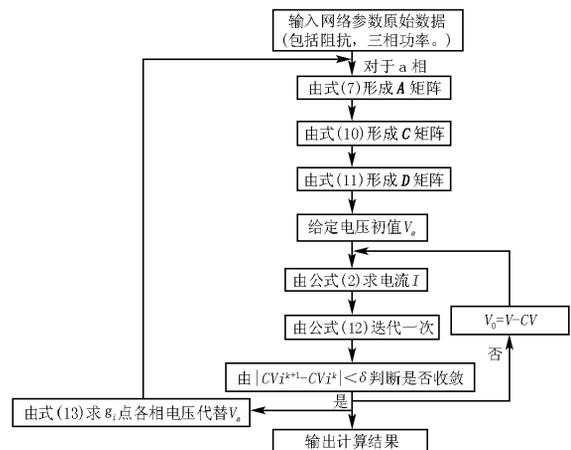


图 4 算法流程图

Fig 4 Flow chart of algorithm

3.1 算法的程序框图

3.2 算例及分析

本文选取了 11 节点^[11], 34 节点^[12]算例分别用牛顿法和所推荐算法进行计算, 这里只对辐射形网络进行测试, 所推荐三相潮流算法以 Matlab 为工具, 在以 Windows 98 为操作系统的奔腾 III PC 机上进行测试。收敛结果见表 1, 运算中设平衡节点 1 节点电压 (电压幅值, p.u.) 为 1.05 0°; 电压偏差收敛精度为 10^{-6} , 从表 1 可以看出, 本文所述方法和牛顿法相比, 其迭代次数稍多。但是, 对于常用的牛顿法, 尽管其迭代次数较少, 但由于在迭代过程中每次都要重新形成雅可比矩阵及进行因子表分解, 同时雅可比矩阵元素的计算相当复杂, 所以其计算量

表 1 牛顿法和所推荐算法收敛性比较

Tab 1 Convergence comparison of Newton method and the proposed method

网络	牛顿算法	所推荐算法
11 节点	3	4
34 节点	4	6

相当大。而本文提出算法只是简单常数矩阵相乘迭代, 所以其计算量远远小于牛顿法, 耗时也十分少的。而且, 网络规模越大, 其时间的优越性越明显。

4 结语

本文提出的不对称配电网三相潮流计算方法的原理简单、收敛稳定、计算速度快,能够满足实时计算的要求。并且加入了内电势点对其改进之后,使其对各种实际运行中的不对称情况都能进行快速准确的运算,另外,该法不需要复杂的节点编号方法,并对弱环网运行的配电网无需特殊考虑。其在配电自动化方面将有很大的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈 . 电力系统稳态分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng Steady-state Analysis for Power Systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [2] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
WANG Xi-fan Modern Electric Power Systems Analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [3] 王祖佑. 电力系统稳态运行计算机分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1987.
WANG Zu-you Computer Solution for Steady-State Operation of Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [4] 褚骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
ZHE Jun-wei Electric Power System Analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [5] 索南加乐, 等. 配网三相潮流的常雅可比牛顿算法 [J]. 电力系统及其自动化学报.
SUO NAN Jia-le, et al A Novel Three Phase Load Flow Algorithm with Constant Jacobian Matrix for Distribution System [J]. Proceedings of the EPSA.
- [6] Nagandra Rao P S, Prakasa Rao K S, Nanda J. An Exact fast Load Flow Method Including Second Order Term in Rectangular coordinates [J]. IEEE Trans on PAS, 1982, (9).
- [7] IEEE Tutorial Course on Power Distribution Planning [Z].
- [8] Teng J H, Lin W M. Current-based Power Flow Solutions for Distribution Systems in Proc [A]. IEEE Int Conf Power Syst Technol Beijing (China): 1994. 414-418
- [9] Chen T H, Chen M S, Hwang K J, et al Distribution System Power Flow Analysis a Rigid Approach [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, (6): 1146 - 1152
- [10] Teng J H. Member IEEE A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions [J]. IEEE Trans on Power Delivery.
- [11] 刘雅静. 配网三相潮流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (1): 59-63
LU Ya-jing Three Phase Power Flow for Distribution System [J]. Proceeds of EPSA, 2002, 14 (1): 59-63
- [12] Aravindhbabu P, Ganapathy S, Nayar K R. A Novel Technique for the Analysis of Radial Distribution Systems [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23: 167-171.

收稿日期: 2006-03-13; 修回日期: 2006-04-24

作者简介:

游广增 (1982 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网算法和电力谐波; E-mail: youguangzeng@sohu.com

徐政 (1962 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事直流输电与交流输电, 电力谐波与电能质量, 电力市场及其技术支持系统等方面的研究工作。

A fast solution of three-phase asymmetric distribution system load

YOU Guang-zeng, XU Zheng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To meet the speed requirement of on-line distribution power flow calculation, this paper addresses a fast solution for distribution system load, and improves it through adding an internal electrical node, so that it can make a quick and exact calculation under kinds of unbalanced network in practical operations. Two developed matrices—the bus-injection to branch-current matrix and the branch-current to bus-voltage matrix—and a simple matrix multiplication are used to obtain fast load flow solution. The algorithm is realized by the MATLAB language and a comparison is made between the Newton method and the proposed method through some cases. The final voltage solution verifies the accuracy and rapidity of the proposed method.

Key words: distribution power flow; distribution automation system; radial network; DMS