

# 一种配电网的实用潮流算法

曹亮, 孔峰, 陈昆薇

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在分析配电网结构特点和现有配电网潮流计算方法优缺点的基础上, 提出一种有效的配电网潮流算法。该算法基于叠加原理, 把网络节点电压看作是配电网根节点和配电网负荷共同作用的结果; 把配电网作为一个整体形成节点导纳矩阵, 适用于弱环网运行的配电网, 算法简捷实用。算例证明了该文方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 配电网潮流; 潮流计算

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 1003-4837(2002)05-0017-03

## 1 引言

近几年来国家对城网和农村配电网进行了改造, 并在一些地方成功地实施了配电网自动化(DAS)。从长远来看, 随着人们对电能质量要求的提高以及供电企业从自身效益出发, 实施配电网自动化是必然的。而配电网潮流计算是配电网分析的基础。

低压配电网同输电网相比, 有其自身的特点: 网络拓扑呈辐射状, 线路的  $R/X$  很高。一般而言, 配电系统正常运行时呈树状结构, 以辐射形网络连接若干台配电变, 当配电网由于实际运行的需要可能出现短时的环网运行, 并由双电源供电。图1为一简单配电网模型,  $S/S$  代表配电网中的变电站。

这些特点导致网络的雅克比矩阵的条件数变大, 出现不同程度的病态特征, 因而传统的潮流算法—牛顿法(Newton-Raphson)及快速解耦法(FDLF)在计算配电网时收敛效果都不好。

很多研究者根据配电网结构特点提出了一些面向线路支路的前推回代算法<sup>[4]</sup>。虽然这些算法直接利用支路参数, 无需矩阵运算, 编程简单, 算法收敛性好, 但不适用于弱环网运行的配电网; 针对配电网存在少量环网运行的情况, 文献[5]在文献[4]的基础上, 应用戴维南原理用补偿法解环, 把环网结构化为简单的辐射网, 然后采用迭代环网联络线潮流来修正环网分拆处的电压值, 在迭代过程中还是用到矩阵运算, 且戴维南阻抗求解较难, 这样增加了潮流计算迭代次数和编程的复杂度。

为避免上述缺点, 本文在文献[2]、[3]基础上给出了一种有效的配网潮流算法。算法基于叠加原理, 把网络节点电压看作是配电网根节点和配电网负荷共同作用的结果; 把配电网作为一个整体形成节点导纳矩阵, 适用于弱环网运行的配电网。

## 2 本文配电网潮流算法

### 2.1 数学模型

在典型的配电网中, 一般仅有根节点的节点电压固定不变, 假设为  $\dot{V}_s$ , 而其他节点都可视为  $PQ$  节点。由于配电网可以视为线性网络, 根据叠加原理, 网络中节点  $i$  的电压值可以视为由根节点(看作电压源)和配电网负荷(转化成注入电流, 看作电流源)共同作用的结果。即当只有根节点作用时, 各节点负荷为0, 得节点电压值  $\dot{V}_{i1} = \dot{V}_s$ ; 当考虑负荷作用时, 根节点接地, 同样求得节点电压为  $\dot{V}_{i2}$ ; 则节点  $i$  的实际节点电压为  $\dot{V}_i = \dot{V}_{i1} + \dot{V}_{i2} = \dot{V}_s + \dot{V}_{i2}$ 。

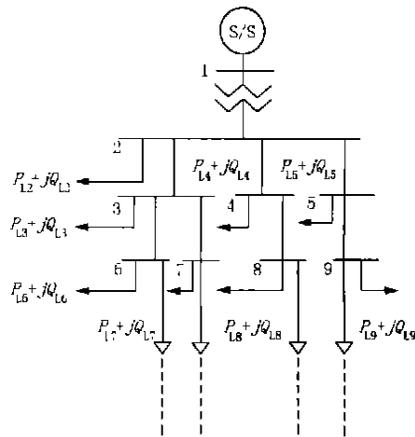


图1 配电网简单示意图

根据基尔霍夫(Kchhoff)电流定理有如下公式:

$$YU = I \quad (1)$$

假设配电网中有  $n$  个节点, 且平衡节点的节点号为  $n$ , 则上式中:

$Y$  是节点导纳矩阵,  $n \times n$  维;

$U$  是各节点电压,  $n \times 1$  维;

$I$  是各节点电流,  $n \times 1$  维;

将(1)式中导纳矩阵  $Y$  拆写成两部分: 一部分

不包括网络的接地支路,接地支路可以是配电网中的电容电抗器、无功补偿器等;另一部分只包含接地支路,平衡节点用  $s$  表示,则网络方程改写为:

$$\begin{pmatrix} Y_n & Y_s \\ Y_s^T & Y_{ss} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{n0} \\ \\ Y_{s0} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_n \\ \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式中:

$Y_n$  是由除去平衡节点外不含接地支路的节点导纳矩阵组成,维数为  $(n-1) \times (n-1)$ ;

$Y_{n0}$  是由接地支路的导纳矩阵组成的对角线矩阵,维数为  $(n-1) \times (n-1)$ ;

$\dot{U}_n, \dot{I}_n$  是配电网中除平衡节点外其他节点的节点电压、节点电流的列向量,维数都为  $(n-1) \times 1$ ;

$\dot{U}_s$  是平衡节点的节点电压。

现划去(2)式中的平衡节点,对应的方程有:

$$Y_n \dot{U}_n + Y_s \dot{U}_s = \dot{I}_n - Y_{n0} \dot{U}_n \quad (3)$$

另外由于不含接地支路的节点导纳矩阵每行元素和为零,有:

$$Y_n e + Y_s = 0 \quad (4)$$

式中:  $e$  是  $(n-1) \times 1$  维列向量,每个元素都是 1;

$0$  也是  $(n-1) \times 1$  维列向量,每个元素都为 0。

将式(4)带入式(3)中,得:

$$Y_n (\dot{U}_n - e \dot{U}_s) = \dot{I}_n - Y_{n0} \dot{U}_n \quad (5)$$

配电网中除平衡节点外各节点电压应为:

$$\dot{U}_n = Y_n^{-1} (\dot{I}_n - Y_{n0} \dot{U}_n) + e \dot{U}_s \quad (6)$$

迭代格式为:

$$\dot{U}_n^{(k+1)} = Y_n^{-1} (\dot{I}_n^{(k)} - Y_{n0} \dot{U}_n^{(k)}) + e \dot{U}_s \quad (7)$$

其中节点电流向量  $\dot{I}_n^{(k)}$  中的元素有:

$$\dot{I}_j^{(k)} = \frac{S_j^*}{U_j^{(k)}}, \quad j=1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

令

$$\dot{U}_{n1}^{(k+1)} = Y_n^{-1} (\dot{I}_n^{(k)} - Y_{n0} \dot{U}_n^{(k)}) \quad (9)$$

即

$$Y_n \dot{U}_{n1}^{(k+1)} = \dot{I}_n^{(k)} - Y_{n0} \dot{U}_n^{(k)} \quad (10)$$

(9)式是配电网中负荷(看作电流源)作用时在各节点上的电压值,其中节点电流  $\dot{I}_n^{(k)}$  可以通过(8)式由负荷功率求得,并且在每次迭代过程中用上次迭代计算所得节点电压值来加以计算; $Y_{n0} \dot{U}_n^{(k)}$  是接地支路上的电流,将它从节点电流  $\dot{I}_n^{(k)}$  中扣除,  $(\dot{I}_n^{(k)} - Y_{n0} \dot{U}_n^{(k)})$  整个看作是网络的等值注入电流;利用线性方程组的三角分解法将式(10)中的对称系数矩阵  $Y_n$  写成  $LDL^T$  的形式,进行前代运算、回代运算求得  $\dot{U}_{n1}$ ,然后由式(6)求得除平衡节点外各节点

的节点电压  $\dot{U}_n$ 。求解过程中,对矩阵运算用到矩阵的稀疏存储技术。

## 2.2 多电源的处理方法

在正常运行情况下,配电网是开环运行的辐射网,每条馈线上只有一个电源。但配电网在实际运行中,有时会出现环网运行的情况,例如:为了平衡每条馈线的功率,需要在馈线之间倒换负荷。此时可能合上某两条馈线之间的联络开关。这样对于这两条馈线中的任意一条来说,都存在两个电源点。这时可以将其中的一个电源作为 PV 节点,另一个作为松弛节点(根节点)来考虑。

实际上在配电网中,还存在一些无功电源和小发电系统,可以把它们都看作 PV 节点来考虑,从算法的稳定性上来说,增加了 PV 节点还有利于潮流的收敛。

## 2.3 算法的计算流程

1) 输入网络的原始数据,给定节点电压初值,形成配电网的导纳矩阵,得  $Y_n, Y_{n0}$ ;由式(8)求出相应的节点电流  $\dot{I}_n$ ;

2) 利用线性方程组的三角分解法由式(10)求出  $\dot{U}_{n1}$ ,由式(6)、(7)求出配电网中除根节点外各节点电压  $\dot{U}_n$ ;对 PV 节点校正电压幅值,若无功越限,则将其转化为 PQ 节点来处理;

3) 判断该次计算电压值  $\dot{U}_i^{(n)}$  与上次计算电压值  $\dot{U}_i^{(n-1)}$  的差值的最大值  $|\dot{U}_i|$  是否满足:  $|\dot{U}_i|$ ,  $i=1, 2, \dots, n-1$ ,若不满足,由式(8)重新计算  $\dot{I}_n$ ,返回步骤(2)继续执行,直至满足收敛条件为止;

4) 最后输出潮流计算结果。

## 3 算例及结果分析

按本文的潮流算法和文献[5]所给方法分别对一 30 节点的配电网算例进行计算。该配网系统的原始数据、网络结构参见文献[6]。程序在 CPU 主频 600MHz,内存 128M 的计算机上,通过 VC++ 6.0 编译。计算的比较结果见表 1(取收敛精度为  $10^{-5}$ )。

表 1 潮流算法结果比较

方法	迭代次数	计算时间(s)
本文方法	6	0.03
文献[5]的方法	6	0.04

调节该 30 节点系统中  $R/X$  的大小,按本文方法计算后的收敛情况见表 2。30 节点系统单环网运行时计算结果比较见表 3。

表2 对不同  $R/X$  本文算法收敛情况

$R/X$ 比	收敛次数	$R/X$ 比	收敛次数
$R + jX$	6	$R + j0.8X$	6
$1.4R + jX$	6	$R + j0.6X$	6
$1.6R + jX$	6	$R + j0.4X$	6
$1.8R + jX$	6	$R + j0.2X$	6
$2.5R + jX$	6	$R + j0.08X$	6
$2.889R + jX$	6	$R + j0.01X$	6

表3 30节点系统单环网运行时测算结果比较

方法	迭代次数	计算时间(s)
本文方法	6	0.04
文献[5]的方法	8	0.06

由表2的计算结果可以看出本文算法不受配电网  $R/X$  高比率的影响,由表3结果看出对弱环网运行的配电网本文方法在迭代次数和计算时间上都优于文献[5]中改进的前推回代法;另外理论上认为算法收敛的阶数越高,算法的稳定性越差,本文算法是以线性方程式推导的,所以相应的收敛阶数为一阶,具有较高的算法稳定性。

#### 4 结论

本文提出的基于叠加原理的配电网潮流算法,把配电网作为一个整体形成导纳矩阵,对弱环网运行的配电网不需要特别考虑,比文[5]提出的补偿法优越。算法简捷有效,用到某一地市配电网分析软

件中,取得了较好的效果。

若配电网中每条支路均用  $3 \times 3$  阶矩阵描述,该方法还可以扩展至不平衡配电网的三相潮流计算。在此基础上可以进一步开展配电网的网络重构、故障处理、无功优化和状态估计等工作。

#### 参考文献:

- [1] 张学松,于尔铿,等.配电网追赶法潮流[J].中国电机工程学报,1997,17(6):382-385.
- [2] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].清华大学出版社,1996.
- [3] Tsai-Hsiang Chen, Mo-Shing Chen and et al, Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, July 1991, 6(3):1146 - 1152.
- [4] Baran M E and Wu F F. Optimal sizing of capacitors placed on radial distribution systems[J]. IEEE Trans, 1989, PWRD - 2:735 - 743.
- [5] Luo G X and Semlyen A. Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, November 1990, 5(4):1309-1315.
- [6] 李华东,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).

收稿日期: 2001-10-12; 改回日期: 2001-11-23

作者简介: 曹亮(1978-),男,硕士研究生,研究方向为配电网自动化,电力系统运行与控制;孔峰(1969-),男,硕士,讲师,从事电工理论教学工作,研究方向为电力系统规划及运行;陈昆薇(1941-),女,教授,从事电力系统及其自动化方面的研究和教学工作,研究方向为电力系统运行与控制。

#### Practical load flow algorithm for distribution networks

CAO Liang, KONG Feng, CHEN Kunwei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The paper proposes an efficient load flow algorithm for distribution system based on the characteristics of distribution networks and the analysis of the advantages and disadvantages of other load flow algorithms in distribution system. The algorithm thinks that the branch voltage results from the total influence of the slack node and the loads in distribution system. And it forms admittance matrix considering the whole system so that it can be applied to both meshed network too. At last a distribution system example is given and discussed.

**Keywords:** distribution networks; load flow; algorithm

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告