

# 一种改进的辐射状配电网潮流计算方法

刘蔚, 宁文辉, 黄东山

(广西电力试验研究院有限公司, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 配电网潮流计算是配电网分析的基础。对比分析了前推回代法和牛顿法在求解辐射状配电网潮流时的特点和区别, 并提出了一种改进的前推回代算法。该算法在原有前推回代算法基础上修改了回代求解的节点电压修正方程。提出的算法简单实用, 且具有前推回代法简单快速和牛顿法收敛性好的特点。文中仿真算例给出了前推回代法和该文方法的计算结果, 表明提出的方法具有更快的计算速度和更好的收敛特性。

**关键词:** 配电网, 潮流, 前推回代法

## A modified power flow calculation method for radial distribution system

LIU Wei, NING Wen-hui, HUANG Dong-shan

(Guangxi Electric Power Test and Research Institute Co., Ltd, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Distribution power flow calculation is the base of distribution system analysis. The characteristics and differences of back/forward sweep method and Newton method are compared and analyzed, and a modified back/forward sweep method is proposed based on the conventional back/forward sweep method, in which the correction equation of node voltage in the back sweep process is just simply replaced by a new equation. The proposed method is not only simple and fast like back/forward sweep method, but also has better convergence characteristic like Newton method. The results of simulation tests presented show the proposed method has faster power flow solution of radial distribution system and better convergence characteristic when compared with the conventional back/forward sweep method.

**Key words:** distribution system; power flow; back/forward sweep method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0001-04

## 0 引言

配电网潮流计算是配电网分析的基础。配电网闭环设计开环运行使配电网的潮流计算具有辐射状的特点。国内外学者根据配电网的特点提出了各种配电网潮流算法, 如前推回代法<sup>[1-4]</sup>、Zbus法<sup>[5]</sup>、回路阻抗法<sup>[6,7]</sup>、改进牛顿法<sup>[8,9]</sup>及快速解耦法<sup>[10,11]</sup>等。前推回代法具有物理概念明晰、简单且易实现、收敛性较好等特点, 适合于求解辐射状配电网潮流。牛顿法比前推回代法收敛性好, 但由于每次迭代要修改雅可比矩阵, 计算量大, 影响了计算速度。

本文首先对比分析了前推回代法和牛顿法在求解辐射状配电网潮流时的特点, 发现在牛顿法的修正方程中, 支路功率损耗的修正量由两项构成:

$\dot{U}\Delta I + I\Delta\dot{U}$ , 即由支路电流修正量产生的功率损耗修正量和由节点电压修正量产生的功率损耗修正量。而前推回代法在求解过程中只计及了其中的前一项而忽略了后一项, 因此是牛顿法的一种简化形式。在此基础上, 本文提出了一种改进的前推回代

算法, 该算法通过改进前推回代法的回代求解中的节点电压修正方程近似计及了后一修正项, 求解过程简单方便。

## 1 前推回代法

前推回代法是一种常用的求解配电网潮流的支路类算法。对于辐射状配电网, 根据潮流的方向, 每个节点都只有一个父节点, 一个或几个子节点。例如, 图1所示的配电网(节点6是根节点), 节点4只有节点5一个父节点, 有节点1、2两个子节点。根据配电网辐射状的特点, 前推回代法由前推和回代两个过程组成, 其中前推过程用于求解各支路电流, 回代过程用于求解各节点电压。

前推回代法的算法如下:

### (1) 前推过程

前推过程利用配电网辐射状特性, 从馈线末端开始, 将节点注入电流加入到上游支路电流中, 从而得到各支路的电流, 即先计算节点注入电流:

$I_i^{(k+1)} = S_i^* / U_i^{(k)}$ 。其中*i*是节点号, *k*是迭代次数。

然后计算支路电流:  $\dot{I}_{ij}^{(k+1)} = \dot{I}_i^{(k+1)} + \sum_{m \in D} \dot{I}_{im}^{(k+1)}$ , 其

中节点  $j$  是节点  $i$  的父节点,  $D$  是节点  $i$  的子节点集合。

(2) 回代过程

回代过程由根节点开始, 根据前推过程得到的支路电流, 计算出支路的电压降, 从而得到各节点的电压:  $\dot{U}_i^{(k+1)} = \dot{U}_j^{(k+1)} - \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{ij}^{(k)}$ , 其中节点  $j$  是节点  $i$  的父节点,  $Z_{ij}$  是支路阻抗。

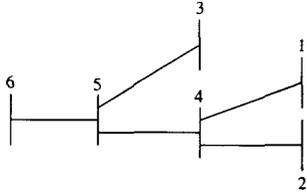


图 1 6 节点配电网

Fig.1 6 nodes distribution network

2 牛顿法和前推回代法的比较

牛顿法是求解电网潮流的常用方法。采用直角坐标的牛顿法潮流计算可由下列方程描述<sup>[12]</sup>:

$$J \Delta U = \Delta W \quad (1)$$

其中:  $\Delta U = [(\Delta f_1, \Delta e_1), \dots, (\Delta f_n, \Delta e_n)]^T$ ,  $\Delta W = [(\Delta P_1, \Delta Q_1), \dots, (\Delta P_n, \Delta Q_n)]^T$ ,  $J$  是雅可比矩阵,  $e_i + jf_i$  是节点  $i$  电压,  $P_i + jQ_i$  是节点  $i$  注入功率。

下面以图 1 所示辐射状配电网为例, 从牛顿法求解辐射状配电网潮流出发, 通过对牛顿法修正方程推导和简化, 来分析对比牛顿法和前推回代法的联系和区别。

根据公式 (1), 可以写出图 1 所示配电网的牛顿法修正方程。为便于分析, 将修正方程表示为复数形式:

$$-\dot{Y}_{14} \dot{U}_1 \Delta \dot{U}_1 + \dot{I}_{41} \Delta \dot{U}_1 + \dot{Y}_{14} \dot{U}_1 \Delta \dot{U}_4 = \dot{S}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_{41} \quad (2)$$

$$-\dot{Y}_{24} \dot{U}_2 \Delta \dot{U}_2 + \dot{I}_{42} \Delta \dot{U}_2 + \dot{Y}_{24} \dot{U}_2 \Delta \dot{U}_4 = \dot{S}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_{42} \quad (3)$$

$$-\dot{Y}_{35} \dot{U}_3 \Delta \dot{U}_3 + \dot{I}_{53} \Delta \dot{U}_3 + \dot{Y}_{35} \dot{U}_3 \Delta \dot{U}_5 = \dot{S}_3 - \dot{U}_3 \dot{I}_{53} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \dot{Y}_{14} \dot{U}_4 \Delta \dot{U}_1 + \dot{Y}_{24} \dot{U}_4 \Delta \dot{U}_2 + \dot{Y}_{45} \dot{U}_4 \Delta \dot{U}_5 - (\dot{Y}_{14} + \\ & \dot{Y}_{24} + \dot{Y}_{45}) \dot{U}_4 \Delta \dot{U}_4 + (\dot{I}_{14} + \dot{I}_{24} + \dot{I}_{54}) \Delta \dot{U}_4 = \\ & \dot{S}_4 - \dot{U}_4 \dot{I}_{14} - \dot{U}_4 \dot{I}_{24} - \dot{U}_4 \dot{I}_{54} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \dot{Y}_{35} \dot{U}_5 \Delta \dot{U}_3 + \dot{Y}_{45} \dot{U}_5 \Delta \dot{U}_4 - (\dot{Y}_{35} + \dot{Y}_{45} + \\ & \dot{Y}_{56}) \dot{U}_5 \Delta \dot{U}_5 + (\dot{I}_{35} + \dot{I}_{45}) \Delta \dot{U}_5 = \\ & \dot{S}_5 - \dot{U}_5 \dot{I}_{35} - \dot{U}_5 \dot{I}_{45} - \dot{U}_5 \dot{I}_{65} \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $Y_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  的支路导纳,

$\dot{I}_{ij} = -\dot{I}_{ji} = Y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j)$ , 是节点  $i$  和  $j$  的支路电流,  $i, j \in (1, 5)$ 。

上述方程左侧可以表示成  $\dot{U} \Delta \dot{I} + \dot{I} \Delta \dot{U}$  的形式, 例如公式 (2) 左侧可以表示为:

$$\Delta \dot{I}_{41} \dot{U}_1 + \dot{I}_{41} \Delta \dot{U}_1, \text{ 其中 } \Delta \dot{I}_{41} = \dot{Y}_{41}(\Delta \dot{U}_4 - \Delta \dot{U}_1)。$$

可以看出, 在牛顿法修正方程中, 支路功率损耗的修正量由两部分构成:  $\dot{U} \Delta \dot{I} + \dot{I} \Delta \dot{U}$ , 即由支路电流修正量产生的功率损耗修正量和由节点电压修正量产生的功率损耗修正量。其中  $I$  是支路电流, 可以用支路两侧的节点电压表示:

$$\dot{I}_{ij} = Y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j)。$$

下面参照前推回代法的前推过程对式 (2)~(6) 进行整理, 即先将各节点修正方程分别除以其各自的节点电压, 然后按逆流顺序将子节点修正方程加到其父节点的修正方程。可以得到

$$\frac{\dot{I}_{41} \Delta \dot{U}_1}{\dot{U}_1} - \dot{Y}_{14} \Delta \dot{U}_1 + \dot{Y}_{14} \Delta \dot{U}_4 = \dot{I}_1 - \dot{I}_{41} \quad (7)$$

$$\frac{\dot{I}_{42} \Delta \dot{U}_2}{\dot{U}_2} - \dot{Y}_{24} \Delta \dot{U}_2 + \dot{Y}_{24} \Delta \dot{U}_4 = \dot{I}_2 - \dot{I}_{42} \quad (8)$$

$$\frac{\dot{I}_{53} \Delta \dot{U}_3}{\dot{U}_3} - \dot{Y}_{35} \Delta \dot{U}_3 + \dot{Y}_{35} \Delta \dot{U}_5 = \dot{I}_3 - \dot{I}_{53} \quad (9)$$

$$\frac{\dot{I}_{41} \Delta \dot{U}_1}{\dot{U}_1} + \frac{\dot{I}_{42} \Delta \dot{U}_2}{\dot{U}_2} + \frac{(\dot{I}_{14} + \dot{I}_{24} + \dot{I}_{54}) \Delta \dot{U}_4}{\dot{U}_4} - \quad (10)$$

$$\dot{Y}_{45} \Delta \dot{U}_4 + \dot{Y}_{45} \Delta \dot{U}_5 = (\dot{I}_4 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) - \dot{I}_{54}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{I}_{41} \Delta \dot{U}_1}{\dot{U}_1} + \frac{\dot{I}_{42} \Delta \dot{U}_2}{\dot{U}_2} + \frac{\dot{I}_{53} \Delta \dot{U}_3}{\dot{U}_3} + \\ & \frac{(\dot{I}_{14} + \dot{I}_{24} + \dot{I}_{54}) \Delta \dot{U}_4}{\dot{U}_4} + \frac{(\dot{I}_{35} + \dot{I}_{45}) \Delta \dot{U}_5}{\dot{U}_5} - \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{Y}_{56} \Delta \dot{U}_5 = \sum_{j=1}^5 \dot{I}_j - \dot{I}_{65}$$

其中:  $\dot{I}_i = \dot{S}_i / \dot{U}_i$ ,  $i \in (1, 5)$  是节点注入电流。

忽略式(7)~(11)中反映修正量 $I\Delta\dot{U}$ 的项, 重新整理后, 可以得到

$$\Delta\dot{U}_1 = (\dot{U}_4 + \Delta\dot{U}_4) - \dot{U}_1 - Z_{14} \dot{I}_1 \quad (12)$$

$$\Delta\dot{U}_2 = (\dot{U}_4 + \Delta\dot{U}_4) - \dot{U}_2 - Z_{24} \dot{I}_2 \quad (13)$$

$$\Delta\dot{U}_3 = (\dot{U}_5 + \Delta\dot{U}_5) - \dot{U}_3 - Z_{35} \dot{I}_3 \quad (14)$$

$$\Delta\dot{U}_4 = (\dot{U}_5 + \Delta\dot{U}_5) - \dot{U}_4 - Z_{45} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_4) \quad (15)$$

$$\Delta\dot{U}_5 = \dot{U}_6 - \dot{U}_5 - Z_{56} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) \quad (16)$$

可以看出, 以上就是前推回代法的回代公式。

上述过程实际实现了前推回代法的前推和回代过程。其中按逆流顺序将子节点修正方程加到其父节点修正方程得到式(7)~(11)的过程, 实现了前推过程。通过忽略 $I\Delta\dot{U}$ 项得到了前推回代法的回代公式, 可以实现回代过程。

通过以上分析, 前推回代法在求解过程中只涉及了牛顿法修正方程中支路功率损耗的修正量 $\dot{U}\Delta\dot{I} + I\Delta\dot{U}$ 中的前一项而忽略了后一项, 因此是牛顿法的一种简化形式。牛顿法计及了该项因而具有更好的收敛特性, 但由于 $\Delta\dot{U}$ 会对所有支路电流产生影响, 所以在求解中需要不断修改雅可比矩阵元素, 计算量较大。

### 3 改进的前推回代法

下面通过修改回代求解中的节点电压修正方程近似计及 $I\Delta\dot{U}$ 修正项, 并在此基础上提出一种改进的前推回代算法。

以节点4的修正方程为例, 将式(10)重新整理后得到

$$\dot{I}_{41} \left( \frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1} - \frac{\Delta\dot{U}_4}{\dot{U}_4} \right) + \dot{I}_{42} \left( \frac{\Delta\dot{U}_2}{\dot{U}_2} - \frac{\Delta\dot{U}_4}{\dot{U}_4} \right) + \dot{I}_{54} \frac{\Delta\dot{U}_4}{\dot{U}_4} - \quad (17)$$

$$\dot{Y}_{45} \Delta\dot{U}_4 + \dot{Y}_{45} \Delta\dot{U}_5 = (\dot{I}_4 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) - \dot{I}_{54}$$

近似认为 $\frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \frac{\Delta\dot{U}_2}{\dot{U}_2} = \frac{\Delta\dot{U}_4}{\dot{U}_4}$ , 可以忽略前两项,

简化并整理后可以得到

$$\Delta\dot{U}_4 - \frac{\dot{U}_5 - \dot{U}_4}{\dot{U}_4} \Delta\dot{U}_4 = (\dot{U}_5 + \Delta\dot{U}_5) - \dot{U}_4 - Z_{45} (\dot{I}_4 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) \quad (18)$$

同理, 可以得到其它节点的回代公式。将以上公式一般化后, 可以表示为

$$\Delta\dot{U}_i - \frac{\dot{U}_o - \dot{U}_i}{\dot{U}_i} \Delta\dot{U}_i = \dot{U}_o + \Delta\dot{U}_o - \dot{U}_i - Z_{oi} \dot{I}_{oi} \quad (19)$$

式(19)即为改进的回代公式。其中节点 $o$ 是节点 $i$ 的父节点,  $Z_{oi}$ 是支路阻抗,  $\dot{I}_{oi}$ 是前推计算得到的支路电流。

同前推回代法的回代公式相比, 改进的回代公式通过 $\left( \frac{\dot{U}_o - \dot{U}_i}{\dot{U}_i} \right) \Delta\dot{U}_i$ 近似计及了支路功率损耗修正量中的 $I\Delta\dot{U}$ 修正项。

根据以上分析, 提出一种改进的前推回代算法。该算法只需要用式(19)来替换原前推回代算法的回代公式即可。

改进的前推回代法如下:

(1) 前推过程

同前推回代法的前推过程。

(2) 回代过程

由根节点开始, 根据前推过程得到的支路电流, 根据以下方程计算出节点电压:

$$\Delta\dot{U}_i^{(k+1)} - \left( \frac{\dot{U}_o^{(k)} - \dot{U}_i^{(k)}}{\dot{U}_j^{(k)}} \right) \Delta\dot{U}_i^{(k+1)} = \dot{U}_o^{(k+1)} - \dot{U}_i^{(k)} - Z_{oi} \dot{I}_{oi}^{(k)} \quad (20)$$

### 4 仿真算例

为了对比分析改进前推回代算法的收敛性和计算速度, 本文利用69节点配电网<sup>[13]</sup>, 以及37节点和123节点配电网<sup>[14]</sup>, 对提出的算法和传统的前推回代法进行了对比计算。计算结果见表1, 其中收敛判据为 $\|\Delta U\| \leq 10^{-6}$  p.u., 所用计算机CPU为Pentium4 3.06GHz, 计算时间为多次计算的平均值。

表1 前推回代法和提出方法的比较

Tab.1 Comparison of conventional back/forward sweep method and proposed method

测试网络	前推回代法		本文方法	
	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
69节点配电网	5	5.4	4	5.1
37节点配电网	4	1.6	3	1.4
123节点配电网	5	14.1	3	13.6

从表 1 可以看出, 提出的方法比传统的前推回代法有更快的计算速度和更好的收敛特性。

提出的改进算法在计算中近似计及了支路功率损耗的修正量中的  $I \Delta U$  修正项, 是一种变雅可比矩阵的牛顿类方法, 因而同前推回代法比具有更好的收敛特性。同时提出的方法直接利用了前推回代方法的求解过程, 仅修改了回代求解的节点电压修正方程, 避免了对雅可比矩阵的求解, 因此提出的方法同时具有前推回代法的简单快速和牛顿法收敛性好的特点。

### 5 结语

本文比较了牛顿法和前推回代法在求解辐射装配电网时的特点和区别, 并在此基础上提出了一种改进的前推回代算法。提出的算法只对前推回代算法的回代公式进行了改进, 方便实用。给出的仿真算例表明提出的方法具有更快的计算速度和更好的收敛特性。

### 参考文献

[1] Shirmoharmnadi D, Hong H W, Semlyen A, et al. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.

[2] Das D, Nagi H S, Kothari D P. Novel Method for Solving Radial Distribution Networks[J]. IEE Proc-Gener Transs, and Distrib, 1994, 141(1): 291-298.

[3] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 76-80. YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie, et al. Layer by Layer Back/forward Sweep Method for Radial Distribution Load Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 76-80.

[4] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电潮流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.

[5] 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(3): 1146-1152.

[6] Goswami S K, Basu S K. Direct Solution of Distribution Systems[J]. Proceedings of IEE, Part C, 1991, 138(1):

78-88.

[7] 吴文传, 张伯明. 配电潮流回路分析法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 67-71. WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Study on Loop Analysis Theorem of Distribution System Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 67-71.

[8] Zhang F, Cheng C S. A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.

[9] 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, 2002, 20(6): 13-16. CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong. Newton Load Flow for Radial Distribution Network Based on Upstream Labeling Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 20(6): 13-16.

[10] Ray D, Zimmerman, Hsiao-Dong Chiang. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2045-2051.

[11] Van Amerongen R A M. A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 760-770.

[12] 陈珩. 电力系统稳态分析(第2版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995. CHEN Hang. Electric Power System Steady Analysis (Version 2)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[13] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

[14] 秦长鹏. 配电网潮流计算和状态估计的方法研究(硕士论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. QIN Chang-peng. Study on Distribution Power Flow and State Estimation, Thesis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-11-05

#### 作者简介:

刘蔚(1974-), 男, 博士, 主要从事输配电网分析和计算工作; E-mail:lw\_1974@hotmail.com

宁文辉(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事电网自动化和继电保护工作;

黄东山(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护工作。