

基于前推回推的重复接地配网潮流算法

张辉¹, 颜伟¹, 牟文鹏², 王圣江¹

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 江津供电局, 重庆 402200)

摘要: 配电网中与中性线和重复接地有关的物理量对于电能质量和系统安全至关重要。目前关于这方面的计算研究不多, 而且仅有的方法存在错误和不足。针对这种情况, 基于重复接地三相四线制配电网详细模型, 提出了一种改进的基于前推回推的重复接地配电网潮流算法。该方法将接地阻抗视为恒阻抗负荷, 且对不完全支路和未接中性线的中性点进行特殊处理。改进的方法准确地反映了配网的实际模型, 能准确的计算中性线和重复接地有关的物理量。该文以一个重复接地的低压 29 节点不平衡配电系统作为算例, 仿真结果验证了该文算法的有效性、准确性和通用性。

关键词: 三相四线制; 配电网; 重复接地; 前推回推; 潮流

Power flow in multigrounded distribution networks based on the backward-forward technique

ZHANG Hui¹, YAN Wei¹, MU Wen-peng², WANG Sheng-jiang¹

(1. The Key Lab of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Jiangjin Power Supply Bureau, Chongqing 402200, China)

Abstract: In distribution networks, physical quantities on the neutral wire and multigrounding are critical to the power quality and the security of system. At present, there is little research about these physical quantities, and the only methods have some mistakes and shortages. To solve these problems, on the basis of the detailed model of three-phase four-wire multigrounded distribution networks, this paper presents a power flow method for multigrounded distribution networks using backward-forward technique. This method treats grounding impedance as constant admittance load and deals with incomplete branches and neutral nodes without neutral wire specially. The proposed method can reflect actual model of distribution networks and calculate physical quantities on the neutral wire and multigrounding accurately. Results obtained from a case study using low-voltage 29-bus distribution system with unbalanced load and multi-grounded neutral nodals are presented and discussed. Simulation results show its efficiency, accuracy and generality.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 5057073).

Key words: three-phase four-wire; distribution networks; multigrounded; backward-forward technique; power flow

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)10-0023-05

0 引言

配电网和输电网存在网络结构、元件参数以及负荷特性等方面的差异^[1], 使得输电网潮流计算方法很难应用于配电网, 为此, 出现了一些专门用于配电网的潮流算法^[2~6]。但都没把中性线和大地导体显式的表示, 不能计算流过中性线和大地导体的电流以及中性点和接地点的电压。事实上, 在配电网中, 中性线和重复接地装置是大量存在的。配电网中的中性线在电能质量和安全方面起着重要作用

用^[7], 同时从提高保护灵敏度和安全的角度考虑, 配电网中已大量推广重复接地技术, 因此必须研究中性线和大地导体显式表示的配电网潮流算法, 在这方面研究比较深入的学者是 Ciric^[8, 9]。

文献[9]是 Ciric 在配电网潮流算法研究中比较完备的成果。它建立了重复接地三相四线制配电网电路模型, 推导了基于前推回推的重复接地配电网潮流算法。但该算法存在几个错误和不足: 其一, 节点注入电流公式考虑不全面且存在错误, 一方面不合电路理论, 同时也无法在程序中实现; 其二, 中性点电压修正时是多余的, 并产生错误结果。这样

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5057073)

修正隐含了所有大地节点电压均为零的假设，与模型中存在大地导体相矛盾；其三，在无中性线有重复接地的情形处理方式中，隐含了该中性点与后向节点的中性点电压相等；其四，对于两端无接地的支路，其支路矩阵中大地导体相对应的行列元素置零处理是错误的；最后，收敛判据考虑不全面，缺少一些项，根据该判据，算法根本不收敛。

针对文献[9]算法存在的错误和不足，本文作了如下改进：1)计算节点注入电流时将接地阻抗视为恒阻抗负荷；2)取消对中性点电压的修正；3)对不完全支路和未接中性线的中性点进行特殊处理；4)无论支路两端节点是否接地，支路矩阵中大地导体相对应的行列元素不变；5)以前后两次迭代的电压误差作收敛判据。

1 重复接地三相四线制配电网详细模型

根据 carson 理论，大地两点之间存在一个大地导体，可以抽象为一般导体^[8]。因而重复接地三相四线制配电网模型中的支路除了相线和中性线外，还包括大地导体。将大地导体等效为一根导线，则一条支路包括 5 根导线。和普通导线一样，导线间具有互阻抗，相线和中性线具有对地并联元件，这样，就得出典型的两个节点都接地的两节点模型，如图 1。

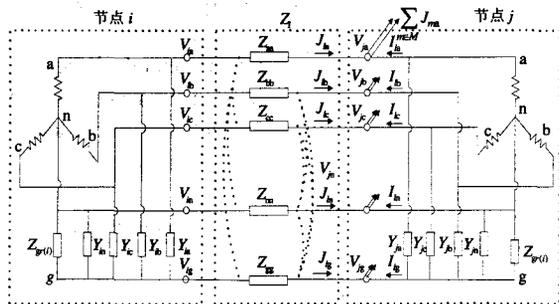


图 1 重复接地三相四线制配电网详细模型

Fig. 1 Detailed model of three-phase four-wire multigrounded distribution networks

该模型只有一个参考点，即根节点。根据 carson 理论，计及大地导体作用，电流流过大地导体产生电压差，使每个节点的大地电压不相等，因此中性点电压由网络状态决定，而不能简单的由自身大地节点为参考。但在文献[8, 9]的算法中，每个节点的中性点是以本节点大地为参考，进行电压校正而得到中性点电压，这隐含了每个节点的大地节点电压相等，大地导体被短接，没起作用。而计算大地点电压时，却又把每个节点的大地节点电压视为不

等，必须通过计算而得。因此，文献[8, 9]存在模型和算法、算法和算法本身前后不一致的问题。

2 支路阻抗参数

根据图 1，重复接地三相四线制配电网支路阻抗参数为 5×5 阶矩阵：

$$Z_{line} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} & Z_{bg} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} & Z_{cg} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} & Z_{ng} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gn} & Z_{gg} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z_{line} 中三相线路与中性线的支路自阻抗 $Z_{xx} (x \in \{a, b, c, n, g\})$ 、三相与中性线之间的支路互阻抗 Z_{xy} 、 $Z_{yx} (x, y \in \{a, b, c, n, g\} \ \& \ x \neq y)$ 、三相与中性线对地的互阻抗 Z_{x_1g} 、 $Z_{g_1x_1} (x_1 \in \{a, b, c, n\})$ 以及大地导线的自阻抗 Z_{gg} 计算公式如下^[8]：

$$\begin{cases} Z_{xx} = (r_x + j4\pi f \ln \left(\frac{2h_x}{R_x} \right) \times 10^{-4}) \times L \\ Z_{xy} = Z_{yx} = j4\pi f \ln \left(\frac{\sqrt{d_{xy}^2 + (h_x + h_y)^2}}{\sqrt{d_{xy}^2 + (h_x - h_y)^2}} \right) \times 10^{-4} \times L \\ Z_{x_1g} = Z_{g_1x_1} = j2\pi f \ln \frac{h_x}{\sqrt{\rho}} \times 10^{-4} \times L \\ Z_{gg} = 4\pi f \times [0.25\pi + j5.7974] \times 10^{-4} \times L \end{cases} \quad (2)$$

式中： r_x 为支路 xx 的导线电阻 (Ω)； h_x 、 h_y 为 x 、 y 导线的对地高度 (m)； d_{xy} 为 x 、 y 导线之间的水平距离 (m)； R_x 为导线 x 的半径 (m)； ρ 为土壤电阻率 (Ωm)； L 为支路长度 (m)。

3 潮流算法

前推回推法具有速度快，处理辐射型网络能力强，编程容易的特点，因此本文和文献[9]一样，采用配电网中应用最广泛的前推回推法计算潮流。

3.1 节点注入电流

由图 1 可得节点 j 的注入电流 I_{ja} 、 I_{jb} 、 I_{jc} 、 I_{jn} 、 I_{jg} ，写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \\ I_{jn} \\ I_{jg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{S_{ja}}{V_{ja}-V_{jn}}\right)^* \\ \left(\frac{S_{jb}}{V_{jb}-V_{jn}}\right)^* \\ \left(\frac{S_{jc}}{V_{jc}-V_{jn}}\right)^* \\ -\left[\left(\frac{S_{ja}}{V_{ja}-V_{jn}}\right)^* + \left(\frac{S_{jb}}{V_{jb}-V_{jn}}\right)^* + \left(\frac{S_{jc}}{V_{jc}-V_{jn}}\right)^*\right] \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_{ja} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{jb} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{jc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{jn} - \frac{1}{Z_{grj}} \\ Y_{ja} & Y_{jb} & Y_{jc} & Y_{jn} + \frac{1}{Z_{grj}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ja} - V_{jg} \\ V_{jb} - V_{jg} \\ V_{jc} - V_{jg} \\ V_{jn} - V_{jg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_{ja} 、 S_{jb} 、 S_{jc} 为节点 j 的注入功率; V_{ja} 、 V_{jb} 、 V_{jc} 、 V_{jn} 、 V_{jg} 为节点 j 的电压; Y_{ja} 、 Y_{jb} 、 Y_{jc} 、 Y_{jn} 为节点 j 的并联元件导纳; I_{ja} 、 I_{jb} 、 I_{jc} 、 I_{jn} 、 I_{jg} 为节点 j 的注入电流; Z_{grj} 为节点 j 的接地阻抗。

与文献[9]比较, 该节点注入电流公式有如下不同:

1) 接地阻抗的处理方式不同。式(3)中, 节点的中性点 n 、接地点 g 注入电流公式是将接地阻抗视为恒阻抗负载而得到, 而文献[9]是将接地阻抗和支路阻抗参数 Z_{nn} 、 Z_{gg} 一起, 根据电路分流理论而得。文献[9]这样处理存在以下错误: 其一, 设计及对侧接地阻抗; 其二, 设计及支路互阻抗; 最后, 设计及对侧不平衡负荷电流。并且接地节点有两个以上的相邻节点均接地, 用分流理论将无法表示出中性点、接地点注入电流。

2) 式(3)中, 使用的电压都是负载(这里负载包括一般性负荷、对地导纳、接地阻抗)两端的电压差, 而文献[9]使用的电压为该点电压。图1配网模型和对称系统潮流模型不同, 只有根节点即参

考点的大地点电压才为 0, 而其他节点的中性点电压一般不为 0, 并且即使是根节点中性点电压一般也不为 0, 因此每个负载两端的电压必须用两端电压差表示才正确, 而只有在对称系统潮流模型中, 每个负载两端的电压才可用该负载节点电压表示。

3.2 回推过程——计算支路电流

支路 $i-j$ 流过的电流, 从最后一层节点回推到根节点, 其中流过支路 l 即支路 $i-j$ 的电流

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \\ J_{ln} \\ J_{lg} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \\ I_{jn} \\ I_{jg} \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \\ J_{mn} \\ J_{mg} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: J_{la} 、 J_{lb} 、 J_{lc} 、 J_{ln} 、 J_{lg} 为支路 l 流过的电流; M 为连接到节点 j 除支路 l 外的所有支路。

3.3 前推过程——计算节点电压

从第一层开始, 前推到最后一层, 节点 j 电压

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \\ V_{jn} \\ V_{jg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \\ V_{in} \\ V_{ig} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{2n} & Z_{2g} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{2n} & Z_{2g} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{2n} & Z_{2g} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{2n} & Z_{2g} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{2n} & Z_{2g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \\ J_{ln} \\ J_{lg} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.4 收敛判据

如果

$$\max(\|V_{ix}^{(k)} - V_{ix}^{(k-1)}\|) < \epsilon \quad (6)$$

式中: $x \in \{a, b, c, n, g\}$ 。则收敛。

文献[9]的节点功率误差收敛判据复杂但不完善, 用它作收敛判据, 算法不收敛。

3.5 初值

一般将根节点作为平衡节点, 其余节点设为 PQ 节点, 其初始电压设为与平衡节点电压相等, 如下式:

$$\begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \\ V_{in} \\ V_{ig} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} \\ a^2 \cdot V_{ref} \\ a \cdot V_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (7)$$

3.6 前推回推法计算潮流步骤

- 1) 计算元件参数及整理数据;
- 2) 按照式 (7) 设置初值;
- 3) 按照式 (3)、(4)、(5) 计算网络节点注入电流、支路电流、节点电压;
- 4) 按照式 (6) 检验是否收敛, 否则重复第 3 步, 直到式 (6) 成立。

4 特殊接线方式的处理

如图 1, 重复接地三相四线制配电网包含重复接地阻抗、5 根导线的支路和三相负荷。但实际的配电网接线方式和负荷形式多样化, 支路有 2 到 5 根导线不等; 负荷有三相、两相、单相负荷; 负荷不平衡电流返回方式有经中性线和大地返回之分。因此上面推导出的前推回推法用于实际的配电网还必须针对不同的支路接线方式、负荷类别和电流返回方式进行处理。

对于不完全的支路 (导线根数小于 5 的支路), 则将支路阻抗矩阵中与所缺导线相对应的行列元素和所缺导线的对地导纳置零。需要指出的是, 无论节点是否接地, 大地导线始终是存在的, 因此与大地 g 有关的项不变, 文献[9]笼统的置零处理是错误的。

对于不同负荷和电流返回方式, 除无中性线返回电流的情形需要特殊处理外, 其他情形不需要特殊处理。对于无中性线返回电流的情形, 其处理方式稍显复杂。虽然中性线不存在, 但中性点是存在的, 其电压只与本节点有关, 可由本节点参数和物理量计算而得。文献[9]的处理方式中隐含了该中性点与后向节点的中性点电压相等。本文提出的处理思路是在节点内部求取中性点电压。图 1 中, 如果无中性线返回电流, 且负荷为恒阻抗负荷, 则式 (3) 中 $I_{jn} = 0$, 通过式 (3) 中的 I_{jn} 表达式解出 V_{jn} , 代入式 (3) 中的其余式子可求取其分节点的注入电流。而支路阻抗矩阵的修正方式与缺相节点的处理方式相同。对于无中性线返回电流且接地阻抗为零时, 不能通过解式 (3) 得 V_{jn} , 而是直接有 $V_{jn} = V_{jg}$ 。对于恒功率负荷, 式 (3) 中 I_{jn} 表达式一般是关于 V_{jn} 的高次方程, 这时须将负荷处理为恒阻抗负荷。

5 算例

本文引用文献[9]中的低压 29 节点系统做仿真对比分析。该系统从根节点引出两条辐射型支路, 共有 21 个负荷节点, 其中单相负荷节点 1 个, 两相负荷节点 9 个, 三相负荷不平衡。系统基准相电压

为 121.244 V。

采用同样的低压三相三线制 29 节点系统和数据, 不计大地导体影响, 本文方法得到与文献[5, 9]方法相同的结果, 这说明本文模型和方法是正确的。图 2 为低压三相三线制 29 节点系统相电压分布曲线。

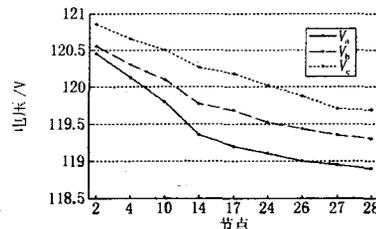


图 2 三相三线制系统相电压

Fig 2 Voltage of phase of three-phase three-wire system

为了将本文方法和文献[9]方法作对比, 本文讨论了中性点重复接地的三相四线制 29 节点系统的计算结果, 该系统重复接地节点为节点 3、4、11、16、17、18、25、28, 接地阻抗均为 0.1Ω 。

用本文方法和文献[9]方法计算的结果如图 3~图 8 所示。从图 3 和图 4 可看出, 文献[9]计算出的相电流较本文方法结果略高, 而相电压略低, 其中两种方法得出的相电压和相电流幅值相差最大百分比分别为 0.23% 和 0.41%。而从图 5 看出, 文献[9]计算出的中性点电压和本文方法结果相差甚远, 如图 6、图 7 和图 8 中所示, 文献[9]计算出的中性线电流和大地电流电压曲线和本文方法的结果大体相似, 但值差别较大。

造成文献[9]方法和本文方法结果差别的主要原因是因为本文准确地计算了中性点和大地点的注入电流, 从文献[9]和本文中中性点和大地点的注入电流公式可看出, 本文方法得出的从大地分流的不平衡电流增加, 而从中性线分流的不平衡电流减小, 如图 6 和图 8 所示。大地电流增加的结果是导致大地电压升高。文献[9]在迭代过程中以大地作参考进行了中性点电压校正, 这是与图 1 模型相驳的, 因此文献[9]计算的中性点电压和本文结果没有可比性。改进的方法得出的中性点电压较文献[9]高, 因此本文计算出的相电流较文献[9]结果略高, 而相电压略低。

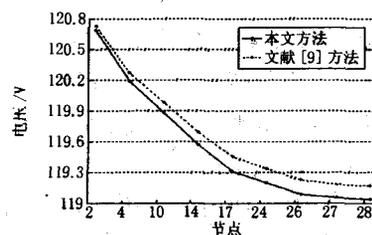


图 3 A 相电压

Fig.3 Voltage of phase A

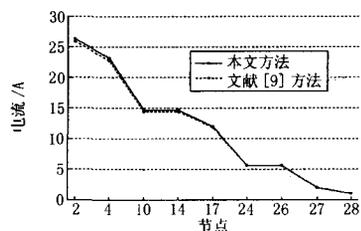


图4 A相电流

Fig.4 Current of phase A

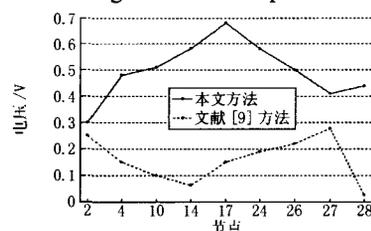


图5 中性点电压

Fig.5 Neutral voltage

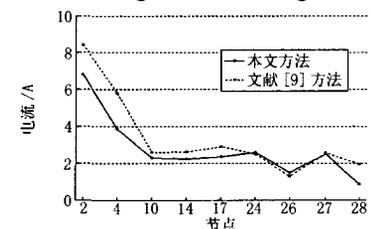


图6 中性线电流

Fig.6 Neutral current

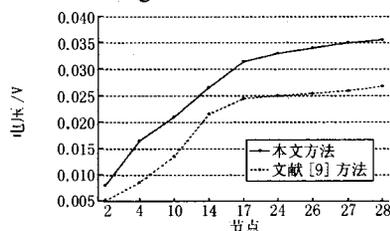


图7 大地电压

Fig.7 Grount voltage

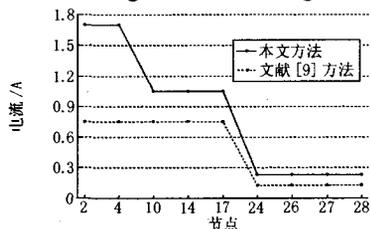


图8 大地电流

Fig.8 Grount current

6 结论

本文对文献[9]存在的错误和不足给予了纠正和补充,提出了改进的基于前推回推的配电网潮流算法。该算法能计算各种支路接线方式、负荷类别和电流返回方式的配网潮流。其最本质的特点是它

准确地反映了重复接地配电网的详细模型,显式地表示了中性线和大地导体,使得算法具有从潮流结果中直接提取反映配电网性能的物理量的特点。同时,该算法还具有通用性,编程容易的特点。通过低压29节点配电网的仿真计算验证了本文算法的上述特点。

参考文献

- [1] Cheng C S, Shlrmoammadi D. A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 671-679.
- [2] FANG Zhang, Carol S, Cheng A. Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [3] Jen-HaoTeng J H, Whei-MinLin W M. Current-Based Power Flow Solutions for Distribution Systems[A]. In: ICPST [C]. Beijing (China): 1994: 414-418.
- [4] 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.
- [5] 颜伟, 刘方, 王官洁. 三相辐射型配电网的相分量潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 24-27. YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie. Three-Phase Power Flow Using Phase Component for Radial Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 24-27.
- [6] Zimmerman R D, Hsiao Dong Chiang H D. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2045-2051.
- [7] Chen T H, Yang W C. Analysis of Multi-grounded Four-wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16, (4): 710-717.
- [8] Ciric R M, Ochoa L F, Padilha A. Power Flow in Distribution Networks with Earth Return[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2004, 26: 373-380.
- [9] Ciric R M, Padilha A, Ochoa L F. Power Flow in Fourwire Distribution Networks—General Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1283-1290.
- [10] Kersting W H. Radial Distribution Test Feeders[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, (6): 975-985.

收稿日期: 2006-11-19

收稿日期: 2006-12-16

作者简介:

张辉(1975-),男,硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方面的研究; E-mail: hcfzqh@yahoo.com.cn

颜伟(1968-),男,博士,教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究;

牟文鹏(1977-),男,助理工程师,主要从事电力系统运行方面的工作。