

9-3-2020

A novel fault location algorithm for radial distribution networks considering the unbalanced characteristics

Mengke LIANG

College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China ; Xinxiang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China

Huan TENG

College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Xuesong LI

College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Yifei FU

Xinxiang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China

Shuren ZHAO

Xinxiang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

LIANG, Mengke; TENG, Huan; LI, Xuesong; FU, Yifei; and ZHAO, Shuren (2020) "A novel fault location algorithm for radial distribution networks considering the unbalanced characteristics," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 8.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.008

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/8>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

考虑非平衡特性的辐射状配电网故障定位方法

梁梦可^{1,2}, 滕欢¹, 李雪松¹, 傅艺斐², 赵树人²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网河南省电力公司新乡供电公司, 河南 新乡 453000)

摘要: 配电线路通常采用非换相运行方式, 存在三相不平衡负荷, 造成线路参数不平衡, 给故障定位带来困难。该文针对辐射状配电网提出一种新的故障定位方法, 仅利用单端故障信息便可实现配电线路的准确故障定位。该算法利用网路矩阵研究配电网结构, 降低故障计算的复杂程度; 利用斐波那契(Fibonacci)数列搜索方法进行故障搜索, 加快搜索过程。最后, 利用 PSCAD/EMTDC 对配电网进行仿真分析, 结果表明该文方法具有较高的故障定位精度。

关键词: 配电网; 非平衡特性; 故障定位; 网络矩阵; 斐波那契数列

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.008 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2020)02-0061-08

A novel fault location algorithm for radial distribution networks considering the unbalanced characteristics

LIANG Mengke^{1,2}, TENG Huan¹, LI Xuesong¹, FU Yifei², ZHAO Shuren²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Xinxiang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The non-commutation operation mode is commonly utilized in distribution network, but there exist three-phase unbalanced loads resulting in line parameter imbalance. This situation brings some difficulties into the fault location. In this paper, a new fault location algorithm is proposed for radial distribution networks. Just single-ended fault information is considered to realize the accurate fault location. Firstly, a network matrix is employed to study the distribution network structure and the calculation complexity is reduced. Then, the Fibonacci (Fibonacci) sequence search method is adopted to speed up the fault point searching process. Finally, PSCAD/ EMTDC is utilized to model a typical distribution network under different fault types. It is shown that the presented algorithm is able to identify fault locations with high accuracy.

Key words: the unbalanced characteristics; distribution system; fault location; network matrix; Fibonacci series

电力配电网将电能直接分配给终端用户, 与人们的生产生活密切相关。当配电网发生故障时, 直接影响电力企业的效益和人们的生产生活。因此, 准确迅速定位故障距离、排除线路故障, 就可以加速

系统恢复、缩短停电时间,提高配电网的可靠性和经济性。

配电网结构复杂,线路参数和负载的不平衡性易造成三相不对称运行,其故障特征与高压输电网显著不同。配电网的故障定位算法主要分为行波法、智能算法和阻抗法。行波测距法是根据行波理论实现故障测距的算法,根据原理可分为基于行波折反射现象的时域测距法和基于行波固有频率的频域测距法,其在高压输电网中已经进行深入的研究,并取得了不错的效果^[1-5]。文献[6-8]将行波法应用于配电网中,但是配电网结构复杂,馈线上多有分支线路,针对行波反射波的检测成为故障定位的难题;此外行波测距装置价格昂贵,经济性较差;文献[9]提出了 S 注入法,但是该方法对过渡电阻的鲁棒性较差,在这方面还有待研究;文献[10]提出利用行波固有频率与故障距离的函数关系来精准定位配电网故障,但是同样面临配电网结构复杂、分支较多等问题,单纯依赖行波固有频率很难实现故障定位。

近些年,随着智能算法在电力系统运算中的运用,人们开始尝试将神经网络、模糊理论、模拟退火、免疫算法、模式识别技术和小波分析等相关学科的最新研究成果引用到电力系统故障测距领域,文献[11-14]提出了不同的智能化测距方法,该类测距方法发展还不够成熟,有待深入研究。由于基于阻抗算法的故障测距技术投资小,仅需要变电站出线电压、电流作为输入量,且适用于大电流接地系统的各种类型的故障,已经得到广大电力从业人员的重视。文献[15-16]分别从不同角度将阻抗法应用于配电网故障定位,并且取得了不错的效果,但是需要建立配电网的节点导纳矩阵,对不同类型故障进行分类讨论;文献[17]针对配电网的故障定位进行了系统性的分析和总结,提出配电线路具有高度的非平衡特性,仅采用单相故障信息时需要对线路参数进行充分解耦。在实际应用中,忽略相间耦合的算法不能有效估算故障距离;并且单纯采用电路的等效变换求解故障电阻时计算复杂,对于多分段馈电线路将面临计算困难的现状。

该文提出一种新型的故障定位算法,忽略对故

障类型的预处理,对任意故障类型都可以精准定位故障距离。采用双端口网络矩阵进行分析,降低故障计算的复杂程度,利用斐波那契数列的搜索方法进行故障搜索,加快搜索过程。通过 PSCAD/EMTDC 对不平衡配电网进行仿真分析,对不同故障类型进行多次定位,验证此算法的准确性和有效性。

1 模型介绍

1.1 基本网络结构

对于任何配电网,其网络都可认为是阻抗和导纳矩阵级联而成。线路、负载和故障模型也可以用这 2 种元素的二端口网络表示,如图 1 所示。

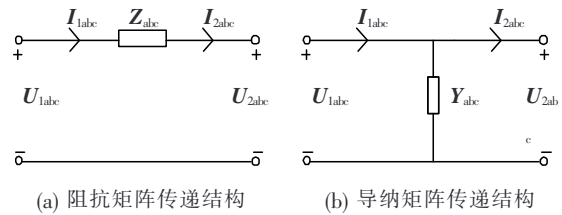


图 1 基本二端口网络结构

Figure 1 Basic two-port network structure

2 种基本二端口网络的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} U_{2abc} \\ I_{2abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & -Z_{abc} \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1abc} \\ I_{1abc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{2abc} \\ I_{2abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ -Y_{abc} & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1abc} \\ I_{1abc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 E 为三阶单位矩阵; Z_{abc} 、 $Y_{abc} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, 分别为线路阻抗矩阵和导纳矩阵,其传递矩阵 T_Z 和 T_Y 表达式为

$$T_Z = \begin{bmatrix} E & -Z_{abc} \\ 0 & E \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_Y = \begin{bmatrix} E & 0 \\ -Y_{abc} & E \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, Z_{abc} 、 Y_{abc} 是传递矩阵中的一个三阶子矩阵。任何由阻抗和导纳矩阵组成的线路元素都可以由传递矩阵 T_Z 和 T_Y 级联而成。

1.2 输电线路模型

由于配电网中的输电线路通常距离较短,故常采用集中参数形式,其 π 型结构如图 2 所示。

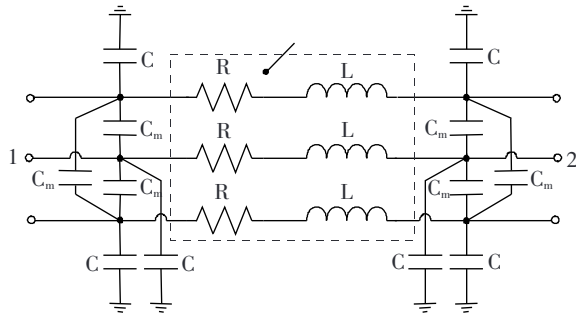


图 2 输电线路 π 型结构

Figure 2 π type structure of transmission line

输电线路的阻抗和导纳矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当三相线路均匀换相时,存在相间耦合阻抗 $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$ 、耦合导纳 $Y_{ab} = Y_{bc} = Y_{ca}$ 。通过解耦可以把相互之间存在耦合关系的相方程转化为相互独立的序分量。但是对于大部分配电网,三相线路通常采用非换相运行方式,即三相线路参数不对称 $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ 、 $Y_{ab} \neq Y_{bc} \neq Y_{ca}$,解耦时需要求取特定的变换矩阵 T ,否则通过传统的对称分量法、clark 变换等不能有效地实现线模变换^[18]。该文通过利用三相参数进行故障定位算法,无须对线路进行解耦处理。

输电线路二端口网络结构如图 3 所示,由 2 个导纳矩阵和 1 个阻抗矩阵级联而成。根据式(3)、(4)求取线路的二端口传递矩阵 T_l ,可得:

$$\begin{aligned} T_l &= \begin{bmatrix} E & 0 \\ -Y_{labc} & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & -Z_{labc} \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 \\ -Y_{labc} & E \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} E + Z_{labc}Y_{labc} & -Z_{labc} \\ -2Y_{labc} - Y_{labc}Z_{labc}Y_{labc} & E + Y_{labc}Z_{labc} \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

则矩阵 T_l 的可逆矩阵为

$$T_l^{-1} = \begin{bmatrix} E + Z_{labc}Y_{labc} & Z_{labc} \\ 2Y_{labc} + Y_{labc}Z_{labc}Y_{labc} & E + Y_{labc}Z_{labc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

线路末端三相电压、电流与首端电压、电流的关系为

$$U_{2abc} = (E + Z_{labc}Y_{labc})U_{1abc} - Z_{labc}I_{1abc} \quad (9)$$

$$I_{2abc} = (-2Y_{labc} - Y_{labc}Z_{labc}Y_{labc})U_{1abc} + (E + Y_{labc}Z_{labc})I_{1abc} \quad (10)$$

分析可知,已知线路首端三相电压、电流和线路参数,即可求取线路末端的电压、电流。

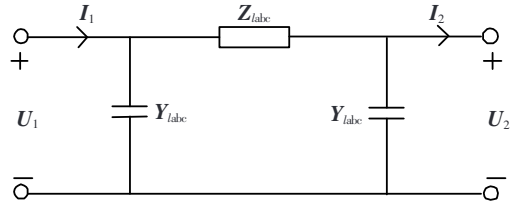


图 3 输电线路二端口网络结构

Figure 3 Two-port network structure of transmission line

1.3 负载模型

配电网负载通常与输电线路呈并联关系,其负载矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y_{load} = Z_{load}^{-1} \quad (12)$$

通常情况下,当 $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ 时,配电网三相负载呈现不平衡状态,则负载的传递矩阵可表示为

$$T_{load} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ -Y_{load} & E \end{bmatrix} \quad (13)$$

1.4 故障模型

当线路发生短路故障时,设定故障电阻 R_f 、故障矩阵 K_f 表示各种类型故障:

$$I_{fabc} = \frac{1}{R_f} K_f U_{fabc} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$I_{fabc} = [I_{fa} \ I_{fb} \ I_{fc}]^T$ 为流经故障电阻的电流; $U_{fabc} = [U_{fa} \ U_{fb} \ U_{fc}]^T$ 为故障点的电压。

矩阵元素通过故障类型来决定,任何类型的故障矩阵都是严格的对称矩阵,求取故障矩阵 K_f 的步骤如下(下标 i 和 j 表示对应的故障相)。

1) 求取对角元素,即

$[k - 1, \text{存在 } k \text{ 相发生非对地故障}]$

$k_{ii} = \begin{cases} k, & \text{存在 } k \text{ 相发生对地故障} \end{cases}$

$\begin{cases} 0, & \text{非故障相} \end{cases}$

2) 根据对角线元素可求取非对角元素, 即

$$k_{ij} = k_{ji} = \begin{cases} -1, k_{ii} \neq 0 \text{ 且 } k_{jj} \neq 0 \\ 0, \text{ 其他} \end{cases}$$

由式(14)可求得:

$$\mathbf{I}_{\text{fabc}}^* = \frac{1}{R_f} \mathbf{U}_{\text{fabc}}^* \mathbf{K}_f^* \quad (16)$$

其中, * 表示对矩阵的共轭转置, 故障矩阵 $\mathbf{K}_f$ 的共轭转置矩阵 $\mathbf{K}_f^*$ 仍然是 $\mathbf{K}_f$, 即

$$\mathbf{I}_{\text{fabc}}^* = \frac{1}{R_f} \mathbf{U}_{\text{fabc}}^* \mathbf{K}_f \quad (17)$$

因此, 流经故障点的三相视在功率可表示为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{R_f} \left[\sum_{i=a,b,c} k_{ii} \mathbf{U}_{fi}^* \mathbf{U}_{fi} + \sum_{ij=ab,ac,bc} k_{ij} (\mathbf{U}_{fi} \mathbf{U}_{fj}^* + \mathbf{U}_{fi}^* \mathbf{U}_{fj}) \right] \quad (18)$$

其中, $\mathbf{U}_{fi}^* \mathbf{U}_{fi}$ 、 $(\mathbf{U}_{fi} \mathbf{U}_{fj}^* + \mathbf{U}_{fi}^* \mathbf{U}_{fj})$ 均为实数。因此, 视在功率 $\mathbf{S}$ 中虚部为零, 即无功功率为

$$\text{Imag}(\mathbf{S}) = 0 \quad (19)$$

分析可知, 流经故障点的无功功率为零, 其与故障电阻和故障类型无关, 利用这一特征可以准确定位故障距离。

2 故障定位算法

该文选取 4 节点的辐射状配电网进行算法说明, 其结构如图 4 所示。

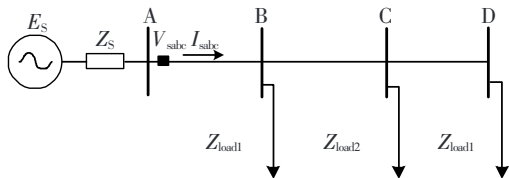


图 4 辐射状配电网示意

Figure 4 Radial distribution network diagram

2.1 故障定位算法原理

假定在线路 L_1 上发生线路故障, 其等效电路如图 5 所示, 其故障点距离首端母线 A 为 d (km)。线路采取集中参数 π 型结构, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的长度; $\mathbf{T}_{\text{load1}}$ 、 $\mathbf{T}_{\text{load2}}$ 、 $\mathbf{T}_{\text{load3}}$ 分别为与母线 A、B、C 并联的负载传递矩阵; $\mathbf{I}_{\text{flabc}}$ 、 $\mathbf{I}_{\text{f2abc}}$ 分别为流入和流出故障点的三相电流, $\mathbf{I}_{\text{fabc}}$ 为流经故障点的三相电流。

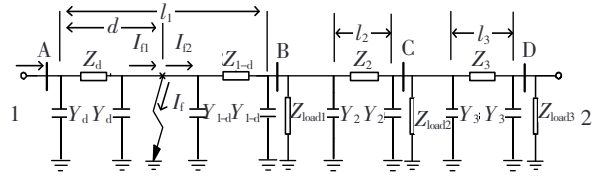


图 5 L_1 发生故障的等效电路

Figure 5 Equivalent circuit diagram under the L_1 fault

假定故障距离为 d_0 , 故障点前、后的等效网络矩阵分别为 $\mathbf{T}_{1abc}$ 、 $\mathbf{T}_{2abc}$, 端口 1 电压、电流分别为 $\mathbf{U}_{1abc}$ 、 $\mathbf{I}_{1abc}$, 末端电压、电流分别为 $\mathbf{U}_{2abc}$ 、 $\mathbf{I}_{2abc}$, 根据电流流向存在等式关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{fabc}} \\ \mathbf{I}_{\text{f1abc}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{1abc} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1abc} \\ \mathbf{I}_{1abc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{2abc} \\ \mathbf{I}_{2abc} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{2abc} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{fabc}} \\ \mathbf{I}_{\text{f2abc}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, 故障点前、后的传递矩阵分别为 $\mathbf{T}_{1abc} = \mathbf{T}_{l_{d0}}$ 、 $\mathbf{T}_{2abc} = \mathbf{T}_{l_{1-d0}} \mathbf{T}_{\text{load1}} \mathbf{T}_{l_{d2}} \mathbf{T}_{\text{load2}} \mathbf{T}_{l_{d3}} \mathbf{T}_{\text{load3}}$ 。 $\mathbf{T}_{l_{dn}}$ 为线路长度是 d_n 的传递矩阵。

根据式(9)可求得故障点流入的电压和电流:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{\text{fabc}} = \mathbf{T}_{1abc}(1,1) \mathbf{U}_{1abc} + \mathbf{T}_{1abc}(1,2) \mathbf{I}_{1abc} \\ \mathbf{I}_{\text{f1abc}} = \mathbf{T}_{1abc}(2,1) \mathbf{U}_{1abc} + \mathbf{T}_{1abc}(2,2) \mathbf{I}_{1abc} \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\mathbf{T}_{1abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{1abc}(1,1) & \mathbf{T}_{1abc}(1,2) \\ \mathbf{T}_{1abc}(2,1) & \mathbf{T}_{1abc}(2,2) \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_{1abc}(m, n)$ 为矩阵 $\mathbf{T}_{1abc}$ 的三阶子矩阵。

由于端口 2 处于开路状态, 因此 $\mathbf{I}_{2abc}$ 等于零。根据式(21)可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{fabc}} \\ \mathbf{I}_{\text{f2abc}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{2abc}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{2abc} \\ \mathbf{I}_{2abc} \end{bmatrix} \quad (23)$$

进一步可以求得:

$$\mathbf{I}_{\text{f2abc}} = \mathbf{T}_{2abc}(2,1) \mathbf{T}_{2abc}^{-1}(1,1) \mathbf{U}_{\text{fabc}} \quad (24)$$

式中 $\mathbf{T}_{2abc}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{2abc}(1,1) & \mathbf{T}_{2abc}(1,2) \\ \mathbf{T}_{2abc}(2,1) & \mathbf{T}_{2abc}(2,2) \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_{2abc}^{-1}$ 为 $\mathbf{T}_{2abc}$ 的逆矩阵; $\mathbf{T}_{2abc}(m, n)$ 为矩阵 $\mathbf{T}_{2abc}^{-1}$ 的三阶子矩阵。

由于 $\mathbf{I}_{\text{fabc}} = \mathbf{I}_{\text{f1abc}} - \mathbf{I}_{\text{f2abc}}$, 则可求得流经故障电阻的视在功率, 即

$$\mathbf{S} = \mathbf{I}_{\text{fabc}}^* \mathbf{U}_{\text{fabc}} \quad (25)$$

根据式(19)可知, 只有当 $d_0 = d$ 时, 存在关系:

$$\mathbf{Q} = \text{Imag}(\mathbf{S}) = 0 \quad (26)$$

分析可知, 流经故障点的无功功率与故障类型和阻

抗大小无关。

已知线路结构参数,根据式(26)可以计算出流经故障点的无功功率,当无功功率 Q 小于阈值 ε 时,输出的故障距离 d_0 即是定位的故障距离。

2.2 斐波那契搜索法

该文故障定位方法的核心理论是搜索最小故障无功功率 Q ,需要对全部系统的每条线路进行搜索。在通常情况下,故障距离变化是通过使用恒定步长 Δd 决定,因此,故障距离的精度取决于搜索步长。为了能够对较多点进行评定,提高故障定位精度,通常要减小步长,相应会增加搜索时间。基于此缺点,该文提出一种新的搜索策略,利用斐波那契数列,使得搜索步长随着搜索进度的变化而变化。这种方法可以减少搜索点的数目,在保证定位精度的基础上获得理想的故障距离。因此,斐波那契搜索方法可以大大提高故障点的搜索效率。

在斐波那契数列基础上,斐波那契搜索法是通过单一函数的评价来减少搜索空间的大小,而不是通过 2 个函数或导数计算的方法。在搜索过程中,变量 λ, μ 为斐波那契数列的函数值,通过改变 2 个变量来减小搜索区间。如图 6 所示, $\lambda, \mu \in [a, b]$, 且 $\lambda < \mu$, 则 λ 和 μ 可表示为

$$\lambda_q = a_q + \frac{W_{n-q-1}}{W_{n-q+1}}(b_q - a_q) \quad (27)$$

$$\mu_q = a_q + \frac{W_{n-q}}{W_{n-q+1}}(b_q - a_q) \quad (28)$$

式中 a_q, b_q 为 q 次迭代的区间边界; W_i 为第 i 个斐波那契数列。

$|Q_F|$ 为目标函数在 λ_q 和 μ_q 的函数值。假如 $|Q_F(\lambda_q)| > |Q_F(\mu_q)|$, 如图 6(a) 所示, 必定存在 $g \in [a_q, \lambda_q]$, 使得 $|Q_F(g)| \geq |Q_F(\mu_q)|$, 最小值 $|Q_F|$ 必定存在于子区间 $[\lambda_q, b_q]$, 因此, 下次迭代的子区间为 $[\lambda_q, b_q]$ 。同理, 假如 $|Q_F(\lambda_q)| < |Q_F(\mu_q)|$, 如图 6(b) 所示, 存在 $g \in [\mu_q, b_q]$, 使得 $|Q_F(g)| \geq |Q_F(\lambda_q)|$, 则最小值 $|Q_F|$ 必定存在于子区间 $(a_q, \mu_q]$, 因此, 下次迭代的子区间是 $[a_q, \mu_q]$ 。通过以上过程不断循环迭代, 直至满足精度 $|a_q - b_q| \leq e$, 输出故障距离为

$$m = \frac{|b_q - a_q|}{2} \quad (29)$$

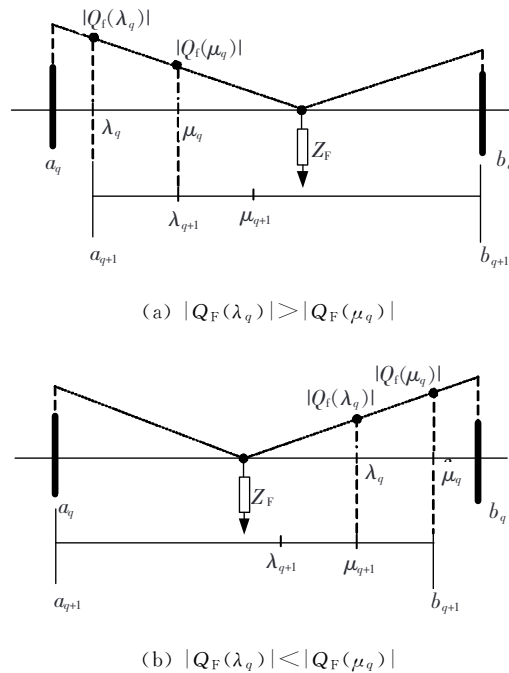


图 6 新的迭代范围

Figure 6 New uncertainty range

2.3 故障定位算法流程

此配电网存在 3 条线路, 其故障定位算法流程如图 7 所示, 分别对每条线路进行故障点搜索, 通过选定阈值来判断故障距离是否满足要求, 即 $Q_m < \varepsilon$ 、 $|a_q - b_q| \leq e$ 。该文中选取 $\varepsilon = 0.1, e = 0.01$ 。

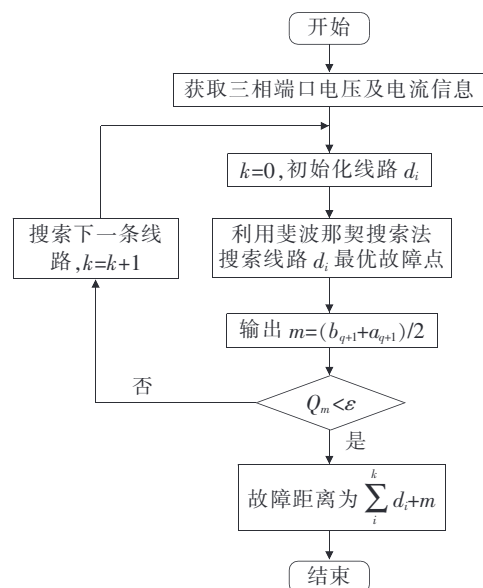


图 7 配电网故障定位算法流程

Figure 7 Distribution network fault location algorithm flowchart

3 算法验证及分析

为了验证此阻抗法在故障测距中的有效性, 该

文在 PSCAD 中搭建如图 8 所示的 14 节点配电系统。该配电网采用三相参数不对称线路, 负荷采用集中模型固定在母线节点上, 含有 1 条主馈线和 2 条分支线路, 构成末端节点到根节点的 3 条路径。在分支线路上安装故障指示器, 用来判断伪故障点 (已知系统中线路参数与负荷参数)。

为了分析算法原理, 假定支路 5-6 在 50% 位置发生 $5\ \Omega$ 的 A 相对地短路, 其无功功率与故障电流流经支路数目 m 的关系如图 9 所示 (为了便于比较不同路径上的故障点, 横坐标 m 表示故障点距离电源节点的支路数目)。分析可知, 无功功率随着故障距离呈现单调递减, 每条路径只存在唯一过零点, 过零点 m 分别是 4.48、2.6 和 3.58。根据故障指示器, 可判断故障发生在路径 1 上, 并且距离支路 5-6 首端百分比为 0.48。

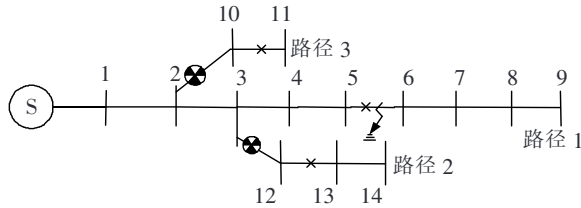


图 8 IEEE 14 节点配电网模型

Figure 8 IEEE 14-bus test distribution network

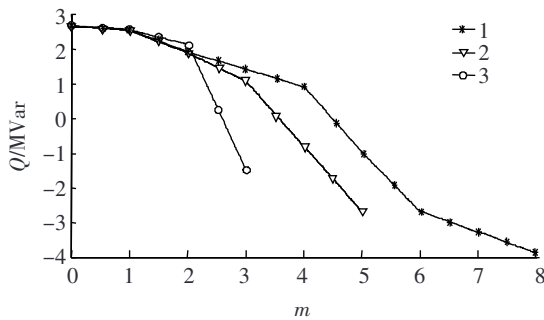


图 9 无功功率与支路数目的关系

Figure 9 Relation between the reactive power and the number of branch

该文采用误差率来评价故障定位的精准度, 其误差计算公式为

$$E\% = \frac{|d - d_0|}{\sum d_n} \times 100\% \quad (30)$$

式中 d_0 为变电站到故障点的实际距离; d 为故障定位算法中计算的故障距离; $\sum d_n$ 为主馈线即路径 1 的总长度。

该文将分别从故障类型、故障电阻和参数误差 3 个方面验证此算法的有效性和准确性。

1) 故障类型对故障定位误差率的影响。分别在主馈线上每条支路 50% 位置选取故障点, 其误差率随故障距离以及故障类型的关系如图 10 所示。分析可知, 故障误差随故障距离的增加而增加, 并且受到故障类型的影响, 但是定位精度仍然相当高, 最大误差不超 0.4%。

2) 故障电阻对误差率的影响。通过选取主馈线 a 相发生对地故障, 其误差率随故障距离以及故障电阻的关系如图 11 所示。分析可知, 故障误差随着故障距离和故障电阻的增加而增加, 但是定位精度仍然相当高, 最大误差不超 0.48%。

3) 实际运行工况条件下线路参数会存在一定的误差。该文对线路参数添加一定比例随机误差, 针对任一故障点分别运行 10 次, 选取最大定位误差, 其仿真结果如图 12 所示。当线路参数误差小于 10% 时, 定位误差不超过 0.6%, 可以满足精度要求; 当误差为 20% 时, 定位误差明显增大, 达到了 1.4%, 超过了可接受的定位误差范围。因此, 此算法针对线路参数误差具有一定程度的鲁棒性。

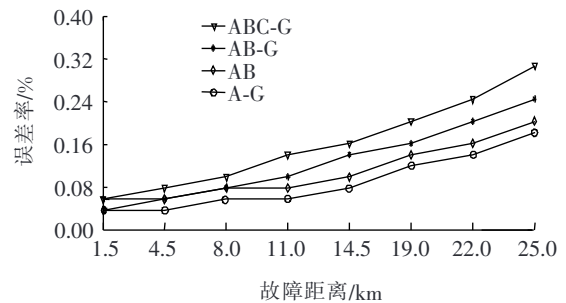


图 10 误差率与故障类型的关系

Figure 10 Relationship between error rate and fault type

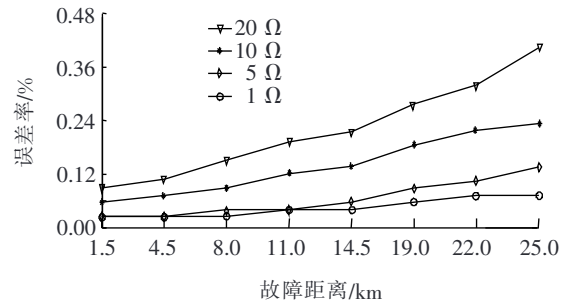


图 11 误差率与故障电阻的关系

Figure 11 Relationship between error rate and fault resistance

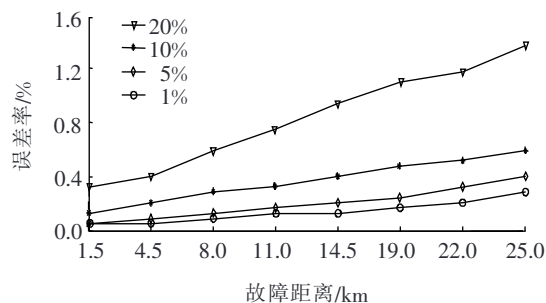


图 12 误差率与线路参数的关系

Figure 12 Relationship between error rate and line parameter

通过对故障类型、故障电阻、参数误差进行分析可知,定位误差随着故障距离的增加而增加,且受故障类型和故障电阻的影响。同时,实际运行情况下该算法针对线路参数误差具有一定鲁棒性。该文通过仿真验证此算法的可行性,并且定位精度在接受范围,具有很好的定位准确性。

4 结语

该文针对辐射状配电网,提出了一种新型的故障定位算法,对不平衡线路都具有适应性。此算法可以忽略对故障类型的预判断,针对配电网结构复杂性而形成的串并联交替现象,该文采用二端口网络进行计算,降低了计算难度;针对故障点的搜索过程,采用斐波那契搜索法加快了搜索速度。分别对故障类型、故障电阻和线路参数误差进行仿真分析,验证此算法对各种类型故障都具有较高准确性。当配电网存在分支线路时,此算法会产生伪故障点,针对这个问题的改进算法仍在研究中。

参考文献:

- [1] 黄龙,肖湘纯,曾祥君,等. 混合线路故障行波综合定位方法[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):93-101.
HUANG Long, XIAO Xiangchun, ZENG Xiangjun, et al. Integrated fault location method for mixed lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1):93-101.
- [2] 廖凯,何正友,李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault Location

of HVDC Transmission Line Based on the Natural Frequency of Traveling Wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(3):104-109.

- [3] 李斌,张纪航,刘海金,等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):27-32.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(9):27-32.
- [4] 林圣,何正友,陈鉴,等. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. 电网技术,2012,36(1):258-264.
LIN Sheng, HE Zhengyou, CHEN Jian, et al. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of traveling wave[J]. Power System Technology,2012,36(1):258-264.
- [5] 焦在滨,宋新尧,李炳绪,等. 一种采用2级反向传播神经网络的输电线路故障测距方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(9):61-69.
JIAO Zaibin, SONG Xinyao, LI Bingxu, et al. A fault location method for transmission line based on two-level back propagation neural network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2019,53(9):61-69.
- [6] Magnago F H, Abur A, Fault location using wavelets [J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1998, 134: 1475-1480.
- [7] 薛永端,段晶晶,徐丙垠,等. 直供方式牵引网故障行波特征分析[J]. 电网技术,2012,36(4):167-173.
XUE Yongduan, DUAN Jingjing, XU Bingyin, et al. Characteristic analysis of fault generated traveling waves in direct feeding traction network [J]. Power System Technology,2012,36(4):167-173.
- [8] 雷勇,何晓,周聪聪. 一种单端注入—多端检测的配电网故障分支判断方法[J],电网技术,2016,40(10):3233-3239.
LEI Yong, HE Xiao, ZHOU Congcong. A distribution network fault branch identification method using single-ended injecting and multi-terminal detecting[J]. Power System Technology,2016,40(10):3233-3239.
- [9] 梁梦可,刘远,韩文文,等. 基于虚拟电流注入技术的有源配电网故障定位[J]. 浙江电力,2019,38(6):9-16.
LIANG Mengke, LIU Yuan, HAN Wenwen, et al. Fault location method of active distribution networks based on

- virtual current injection technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(6): 9-16.
- [10] Javad S, Ehsan B, Rasoul K. A new fault location algorithm for radial distribution systems using model analysis[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 45: 271-278.
- [11] 李珂, 何晋, 曹鲁成, 等. 优化 BP 神经网络在配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术, 2019(19): 1-3.
LI Ke, HE Jin, CAO Lucheng. Application of optimized BP neural network in fault location of distribution network[J]. Electric Engineering, 2019(19): 1-3.
- [12] 张永健, 胥杰, 孙嘉, 基于静态小波变换的 T 型输电线路行波测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 84-88.
ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling wave fault location for three-terminal transmission line based on static wavelet transform[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 84-88.
- [13] 陈辉, 周羽生, 刘诗涵 等. 基于改进和声算法的含 DG 配电网故障定位[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 123-124+134.
CHEN Hui, ZHOU Yusheng, LIU Shihan, et al. Fault location of distribution network with distribution generation based on an improved harmony algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 123-124+134.
- [14] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 108-114.
WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 108-114.
- [15] 李乾坤, 李小龙, 周子恒, 等. 基于改进细菌觅食算法的配电网区段定位[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 88-93.
LI Qiankun, LI Xiaolong, ZHOU Ziheng, et al. Distribution network section location based on improved bacterial foraging algorithm[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 88-93.
- [16] 康忠健, 刘睿莹. 基于阻抗模型故障特征匹配技术的配电网单相接地故障测距研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 40-46.
KANG Zhongjian, LIU Ruiying. A fault location method for single-phase grounding fault in distributing network[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 40-46.
- [17] 肖先勇, 何婧宇, 陈纓, 等. 非有效接地配电网单相接地故障定位的技术难点[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 168-176.
XIAO Xianyong, HE Jingyu, CHEN Ying, et al. Technological difficulty of single line ground fault location in neutral un-effective grounded distribution system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 168-176.
- [18] 刘鑫, 滕欢, 梁梦可, 等. 基于电流偏差 2-范数的有源配电网故障距离定位[J]. 电工技术学报, 2019, 34(Z2): 720-728.
LIU Xin, TENG Huan, LIANG Mengke, et al. Fault distance location of active distribution network based on 2-norm current deviation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 720-728.