

一种实用的配电网短路故障定位方法

朱志平, 张 民

(国网直流工程建设有限公司, 北京市 东城区 100005)

A Practical Method to Locate Short Circuit Faults in Distribution Network

ZHU Zhi-ping, ZHANG Min

(State Grid DC Project Construction Company Limited, Dongcheng District, Beijing 100005, China)

ABSTRACT: According to practical condition of distribution networks in China, a practicable algorithm that can find out exact position of faulty point in distribution network is proposed. By means of extracting positive-, negative- and zero-sequence components of both post-fault load current and voltage as well as considering the variation of line current before and after the fault, a set of linear equations of voltages and currents in distribution network before and after the fault is built, and the position of faulty point can be obtained by solving the equation set. The proposed algorithm is suitable to the location of various short-circuit faults occurred in distribution networks with neutral grounding via low resistance or that with neutral indirectly grounded, and the automatic online fault detection can be implemented by use of the proposed algorithm.

KEY WORDS: distribution network; fault location; inter-phase short circuit; single-phase earth fault

摘要: 结合我国配电网的实际情况, 提出一种能够确定配电网故障点确切位置的实用算法, 该算法通过提取故障后负荷电流及电压的正序、负序和零序分量, 并考虑故障前后线路电流的变化量, 建立了故障前后线路电压电流的线性方程组, 联立求解得出故障点距离。该算法适用于中性点经低电阻接地或不直接接地系统的各种短路故障的定位, 并可实现故障的自动在线检测。

关键词: 配电网; 故障定位; 相间短路; 单相接地

0 引言

随着电力市场化程度和人民生活水平的提高, 供电可靠性越来越受到人们的关注。供电可靠性不仅涉及到用户的经济利益, 也涉及到供电企业本身的经济利益。我国配电网停电的主要原因有限电(电源不足或线路过负荷)、计划检修、事故检修、市政建设等。随着电力供需关系的缓和以及城网改造和

建设的深入, 备用容量和线路增多, 限电和计划检修造成的停电时间都大幅度减少, 故障检修停电逐步成为影响供电可靠性的主要因素^[1-7]。当前的城网改造采用了线路自动分段器, 当发生永久性故障时可以隔离出故障线路区段, 减少停电范围, 但检修时还是要根据经验判断故障点的准确位置。在故障段内有很多分支和配电变压器, 要查找故障点位置需要较长时间。有的研究者想用能量管理系统(energy management system, EMS)中的故障诊断功能来确定故障点, 但 EMS 主要针对输电线路, 不适用于辐射型的配电线路。

目前针对配电线路的故障诊断方法仍存在许多不足^[8-11]。故障距离的计算一般是根据短路的特点及边界条件, 利用首端开关采集到的三相电流、三相电压及线路参数来计算故障点到首端开关的距离。由于分段器之间负荷分支很多, 用计算出来的故障距离很难判断故障点的真实位置, 即存在很多伪故障点。本文结合我国配电网的实际情况, 采用数据结构中深度遍历的方法从正、反两个方向进行搜索, 从而能够找出故障点的确切位置。

1 相间短路故障自动定位原理

假设图 1 所示配电线路发生 BC 相间短路故障。

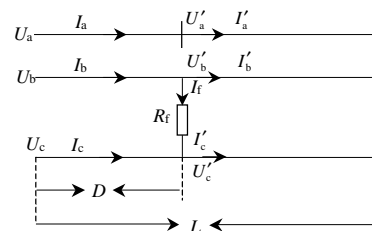


图 1 配电线路 BC 相间短路故障示意图
Fig. 1 Illustration of short circuit fault between phase B and C of distribution line

图中: U_a 、 U_b 、 U_c 是线路短路时始端的三相电压; I_a 、 I_b 、 I_c 是线路短路时始端的三相电流; U'_a 、 U'_b 、 U'_c 是故障点处的三相电压; I'_a 、 I'_b 、 I'_c 是从故障点流向该线路负荷侧的三相电流; D 是故障点到该线路始端的距离; L 为该线路的长度; I_f 为流过短路点过渡电阻的电流。由图 1 可得

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_a \\ U'_b \\ U'_c \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{ca} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 Z_{aa} 、 Z_{ab} 等分别是相应线路单位长度的自阻抗和互阻抗。

令

$$\begin{cases} \Delta U_a = U_a - U'_a \\ \Delta U_b = U_b - U'_b \\ \Delta U_c = U_c - U'_c \end{cases} \quad (2)$$

则有

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{ca} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

将三相相量用正序、负序、零序相量表示, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。

将式(4)(5)代入式(3)得到

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{ca} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{sc} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

可见 \mathbf{Z}_{sc} 就是该线路单位长度的序阻抗矩阵。假定线路结构参数完全对称, 即 $Z_{aa}=Z_{bb}=Z_{cc}=Z_s$, $Z_{ab}=Z_{ac}=Z_{bc}=Z_m$, 则式(6)可化简为

$$\mathbf{Z}_{sc} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s + 2Z_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 分别是该线路单位长度的正序、负序、零序阻抗, 其中 $Z_1 = Z_s - Z_m$ 。

由图 1 可得 $U'_b - U'_c = R_f I_f$, 因此由式(1)可推出

$$U_b - U_c = R_f I_f + DZ_1(I_b - I_c)。令 Z_{rk} = (U_b - U_c) / (I_b - I_c), 则得到$$

$$Z_{rk} = DZ_1 + R_f I_f / (I_b - I_c) \quad (8)$$

图 1 中因故障而引起的 B、C 相电流变化为

$$\begin{cases} \Delta I_b = I_b - I_{bq} \\ \Delta I_c = I_c - I_{cq} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{bq} 、 I_{cq} 分别是故障前该线路始端 B、C 相电流; I_b 、 I_c 分别是故障后该线段始端 B、C 相电流。由于故障后从故障点流向线段负荷侧的电流较小, 因此取

$$I_f \approx \Delta I_b - \Delta I_c \quad (10)$$

按式(10)估算出 I_f 后, 方程(8)余下 D 和 R_f 未知, 利用实部、虚部相等关系得到 2 个实数方程, 求解该方程组可得故障距离 D 。式(8)(10)是线路 B、C 相发生相间短路故障时故障距离的基本计算方程。若故障发生变化, 同样可以推导出与之相似的方程。

2 单相接地故障自动定位原理

假设图 2 所示配电线路发生 A 相接地短路故障。图中各参数的含义与图 1 相同。

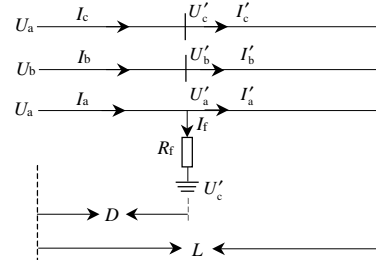


图 2 配电线路 A 相接地故障示意图

Fig. 2 Illustration of A-to-earth fault of distribution line

根据对称分量法, 故障点电压的各序分量可以表示为

$$\begin{cases} U_{1f} = U_1 - DZ_1 I_1 \\ U_{2f} = U_2 - DZ_2 I_2 \\ U_{0f} = U_0 - DZ_0 I_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_1 、 U_2 、 U_0 分别是该线路短路时始端的正序、负序和零序电压; I_1 、 I_2 、 I_0 分别是该线路短路时始端的正序、负序和零序电流; U_{1f} 、 U_{2f} 、 U_{0f} 分别是故障点正序、负序和零序电压; Z_1 、 Z_2 、 Z_0 分别是线路单位长度的正序、负序和零序阻抗。

考虑单相接地故障的边界条件, 有

$$U_{1f} + U_{2f} + U_{0f} = 3I_{0f} R_f \quad (12)$$

式中 I_{0f} 是流入故障点的零序电流。

因为 $Z_1=Z_2$, 所以 $U_a = (I_a + kI_0)DZ_1 - 3I_{0f}R_f$,

其中 $k = (Z_0 - Z_1) / Z_1$ 。令 $Z_{rk} = U_a (I_a + kI_0)$ ，则有

$$Z_{rk} = DZ_1 - 3I_{0f} R_f / (I_a + kI_0) \quad (13)$$

由于故障后流向线路负荷侧的零序电流较小，因此取

$$I_{0f} \approx I_0 \quad (14)$$

按式(14)估算出 I_{0f} 后，方程(13)余下 D 和 R_f 未知，利用实部、虚部相等关系得到 2 个实数方程，求解该方程组可得故障距离 D 。式(12)、(14)是线路中 A 相发生单相短路故障时计算故障距离的基本方程。若故障相发生变化，同样可以推出与之相似的方程，并且经仿真验证该方法同样适合于中性点不直接接地系统的单相接地故障诊断^[12-14]。

3 故障定位软件的实现

故障定位软件首先从正、反两个方向分别判别出 2 组可能的故障点，然后再从中找到真正的故障点。该软件主要由 8 个程序块组成，名字分别是 pb、bps、sps、qui、qui1、js、js1、tx。各程序块的主要功能如下：

(1) pb 程序块的功能是根据 SCADA 系统的数据确定单相接地故障，并采集故障相、故障线路以及单相接地时的零序电流；另外确定相间故障并采集故障相、故障后的电流和电压。

(2) bps 程序块的主要作用是网络发生相间短路故障后分别从前往后和从后往前搜索出 2 组可能的故障位置。

(3) sps 程序块的主要作用是网络发生单相接地故障后分别从前往后和从后往前搜索出 2 组可能的故障位置。

(4) qui 程序块的主要作用是根据故障搜索的方向确定所需要的相应线段首端或末端的三相电压或电流。

(5) qui1 程序块的主要作用是反向搜索故障时确定所需要的相应线段首端或末端的三相电压和电流。

(6) js 程序块的功能是对每一个被搜索的线段计算出相应的故障距离 D_1 ，并根据 D_1 与该线段长度的关系确定该线段是否存在可能的故障点。

(7) js1 程序块的功能是反向搜索故障时对每一个被搜索的线段计算出相应的故障距离 D_2 ，并根据 D_2 与该线段长度的关系确定该线段是否存在可能的故障点。

(8) tx 程序块的功能是从 2 组可能的故障点中筛选出真实的故障位置，最终实现故障定位。

主程序逻辑框图见图 3，子程序 bps 和 sps 的流程图分别见图 4、5。图中：子程序 Gs、Gs1 用于判断搜索段有无故障点；qs、qs1 用于计算下一个搜索段首端的三相电压和电流。

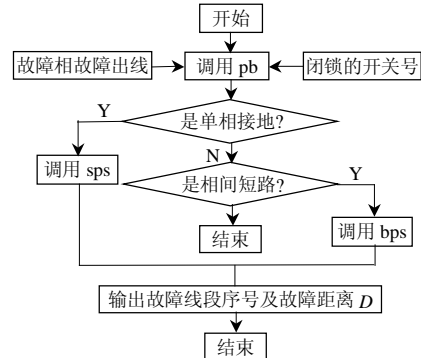


图 3 主程序流程图

Fig. 3 Flow chart of the main program for fault location

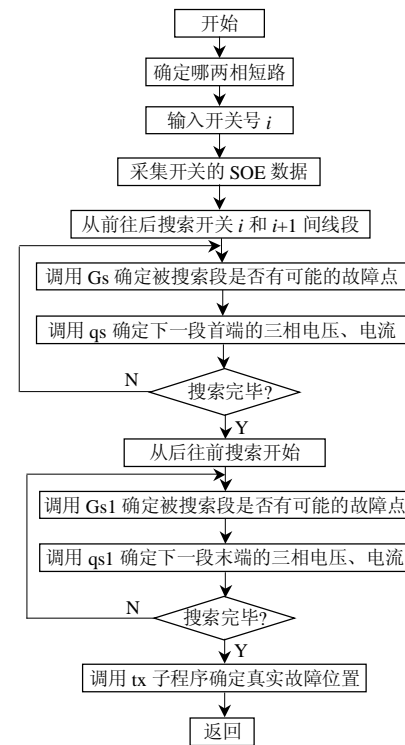


图 4 子程序 bps 流程图

Fig. 4 Flow chart of the subprogram-bps

4 结论

本文结合我国配电网的实际情况，提出利用故障发生后线路三相电压电流的变化量进行故障距离的计算，并采用数据结构中的深度遍历方法从正、反两个方向进行搜索，从而找出确切的故障位置。公式推导证明了该算法的正确性和可行性。该

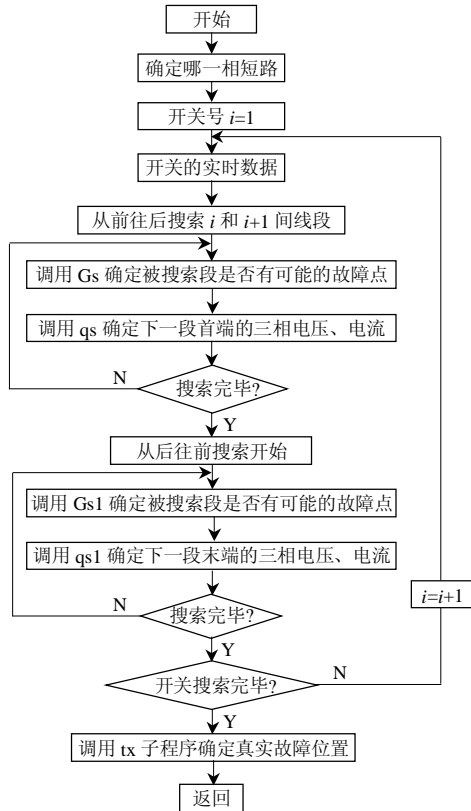


图 5 子程序 sps 流程图

Fig. 5 Flow chart of the subprogram-sps

算法适用于中性点经小电阻接地或不直接接地系统的各种短路故障的定位, 现场初步应用取得了良好的效果。

参考文献

- [1] 刘健, 倪建立. 配电网自动化新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 王明俊, 于尔铿, 刘广一. 配电系统自动化及其发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998
- [3] 张艳霞, 陈超英, 赵杰辉, 等. 配电网单相接地故障选线的一种新方法[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 21-24.
Zhang Yanxia, Chen Chaoying, Zhao Jiehui, et al. A new method of locating fault line under single phase to ground fault in distribution network[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 21-24(in Chinese).
- [4] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-10.
Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10(in Chinese).
- [5] 陈鹏, 腾欢, 腾福生. 故障信息不足时配电网故障定位的方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 71-72.
Chen Peng, Teng Huan, Teng Fusheng. An algorithm for fault location in power distribution network under the condition of lack of fault information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 71-72(in Chinese).

- [6] 徐青山, 唐国庆, 张欣. 计及容错的配电网故障定位新算法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 31-33.
Xu Qingshan, Tang Guoqing, Zhang Xin. Error-tolerated fault locating algorithm of power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 31-33(in Chinese).
- [7] 蒋秀洁, 熊信银, 吴耀武, 等. 改进矩阵算法及其在配电网故障定位中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 60-63.
Jiang Xiujie, Xiong Xinyin, Wu Yaowu, et al. Improved matrix algorithm and its application in fault location of distribution network [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 60-63(in Chinese).
- [8] 郭俊宏, 杨以涵, 谭伟璞, 等. 中压配电网的故障测距实用化方法[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 77-81.
Guo Junhong, Yang Yihan, Tan Weipu, et al. A practical fault location method for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 77-81(in Chinese).
- [9] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50.
Wei Zhinong, He Hua, Zheng Yuping. A novel algorithm for fault location in power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50(in Chinese).
- [10] 周羽生, 周有庆, 戴正志. 基于 FTU 的配电网故障区段判断算法[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 25-27.
Zhou Yusheng, Zhou Youqing, Dai Zhengzhi. Algorithm for fault section judgement in power distribution network based on FTU [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 25-27(in Chinese).
- [11] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-92.
Chen Yueyun, Qin Jian, Wang Xin. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-92 (in Chinese).
- [12] 夏雨, 姚月娥, 刘全志, 等. 配电网故障定位和隔离的新统一矩阵算法[J]. 高压技术, 2002, 28(3): 4-5.
Xia Yu, Yao Yuee, Liu Quanzhi. A new general matrix arithmetic on the location and isolation of the fault section in power distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 4-5(in Chinese).
- [13] 张慧芬, 潘贞存, 田质广, 等. 一种中低压配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 76-80.
Zhang Huifen, Pan Zhencun, Tian Zhiguang, et al. A new principle to detect single phase grounding feeder in middle and low voltage distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 76-80 (in Chinese).
- [14] 苏永智, 潘贞存, 丁磊. 一种复杂配电网快速故障定位算法[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 75-78.
Su Yongzhi, Pan Zhencun, Ding Lei. A fast algorithm of fault location for complicated distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 75-78 (in Chinese).

收稿日期: 2008-01-23。

作者简介:

朱志平(1965—), 男, 本科, 研究方向为电力工程技术和直流输电系统;

张民(1974—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流输电系统控制保护、电力系统分析与控制等方面工作, E-mail: min-zhang@sgcc.com.cn。

(编辑 李兰欣)