

# 一种基于 FTU 的馈线故障定位优化算法

刘会家, 李宁

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 提出一种基于 FTU 的配电网馈线故障定位优化算法。当馈线发生故障时, 必然会形成故障电流支路, 通过远方监控终端所获得的故障电流及其方向信息, 将该信息加入网络描述矩阵  $D$  的对角线上, 并对该矩阵进行修改, 可以获得描述故障电流支路的网络结构的故障判断矩阵  $P$ , 依据矩阵  $P$  可以快速判断出故障电流支路的末端节点, 从而定位出故障区段。采用十字链表存储网络描述矩阵  $D$  和故障判断矩阵  $P$ , 由于十字链表适合于进行双向搜索, 可以有效地减小存储空间和进一步提高故障区段定位速度。

**关键词:** 馈线自动化; 故障定位; 配网自动化; 十字链表

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0040-04

## 0 引言

随着经济的发展和人民生活水平的提高, 对供电可靠性提出了更高的要求, 配电自动化对于提高供电可靠性具有十分重要的作用。馈线自动化是配网自动化中的重要组成部分, 其核心是故障定位、故障区域隔离和非故障处供电的恢复, 当馈线出现短路故障时, 要求配网自动化系统迅速判断出故障地点, 隔离故障区域, 迅速恢复对非故障区域的供电, 尽可能缩短停电时间。为满足上述目的, 需要在馈线沿线分段开关和联络开关安装用于数据采集和监控的现场监控终端, 并通过可靠的通讯系统将数据传送到配电自动化控制中心, 利用故障定位、故障区域隔离和非故障处供电恢复系统迅速实现非故障区域的供电。文献[1, 2]给出了基于 FTU 的配电网故障定位的算法, 该算法适用于单电源树状馈线和环网开环运行网络单一故障的故障定位, 算法复杂理解困难, 需要复杂的矩阵运算和规格化处理。文献[3]给出了一种以有向图描述接线关系, 不需矩阵运算的算法, 但是仍然未解决无联络线的馈线末端故障时的定位问题, 同时搜索过程复杂。文献[4]和文献[5]将配电网描述为变结构耗散网络, 将故障定位问题转化为过热弧搜寻问题, 能够解决配电网多点故障及无联络线的馈线末端故障时的定位问题, 过程复杂, 计算量大。文献[6]提出了基于配电网的变结构耗散网络模型的故障判断及隔离方法, 搜索过程稍显复杂。

从以上问题着手, 本文提出一种故障定位优化算法, 该算法适用于单电源树状网络和多电源网络开环运行情况下非单一故障的故障定位, 能很好地

解决无联络开关的馈线末端定位问题, 定位原理简单, 搜索与定位过程速度很快。

## 1 算法的基本原理

单电源树状网或环网开环运行情况, 一般判断一馈线段是否为故障区段的根据是通过馈线段两端的现场监控终端可以检测到故障电流的有无和方向<sup>[1]</sup>。当出现故障短路时, 如故障电流从馈线区段的一端流入, 而从馈线区段另一端流出, 则该馈线区段不是故障区段; 如故障电流从馈线区段的一端流入, 而从馈线区段另一端并无故障电流流出, 表明该馈线区段是故障区段。显然此判据需要馈线段两端现场监控终端采集的信息, 只对单电源树状网或环网开环运行情况下故障区段为非馈线末端的故障能进行故障定位, 而当无联络开关的馈线末端故障时, 只能得到故障馈线区段一端的信息, 采用前述方法无法定位出故障区段。如图 1 所示配电网, 当馈线段 45 之间发生故障时, 节点 5 流过故障电流, 节点 4 未流过故障电流, 显然故障发生在馈线段 45 之间; 而当节点 12 之后的馈线段发生故障时, 节点 12 流过故障电流, 只能获得该馈线段一端的信息, 因而无法对该故障区段进行故障定位。

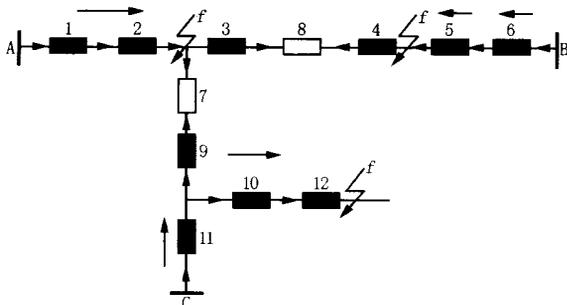
事实上并不需要故障区段两端的的信息定位故障区段, 因为当线路上一馈线段发生故障时, 必然形成故障电流支路。根据各节点上装设的 FTU 上报的故障电流信息即可确定故障电流支路的末端节点, 该节点即为故障区段的过电流端节点, 节点之后的馈线段即为故障区段。该故障定位的原理与故障区段所处位置无关, 即使是多点故障也同样能判断出所对应的故障区段。

## 2 算法实现

### 2.1 形成网络描述矩阵

为了定位故障区段,应形成配电网接线拓扑信息,即网络描述矩阵  $D$ ,该矩阵只与配电网拓扑结构有关,而与各节点上的开关状态无关,当开关状态发生变化后该矩阵不需修改。将馈线上安装有现场监控终端的重合器、分段开关和联络开关进行编号。若有  $N$  个节点,则可以构造一个  $N \times N$  方阵。以有向图描述网络的接线关系,但需要先确定网络接线的正方向。网络接线的正方向原则上可以任意确定,但为了计算方便,可以统一确定网络的正方向。

网络接线的正方向可以这样来确定:单电源网络和多电源网络开环运行情况可以以正常运行时网络的功率方向作为网络接线的正方向。若第  $i$  个节点和第  $j$  个节点之间存在一条馈线,正方向为从开关节点  $i$  流向开关节点  $j$ ,则矩阵  $D$  上位于第  $i$  行第  $j$  列的元素  $d_{ij} = 1$ ,而位于第  $j$  行第  $i$  列的元素  $d_{ji} = 0$ ;反之将矩阵  $D$  上不存在馈线连接的节点所对应的元素均置 0。



A、B、C 电源点; ■ 分联开关或重合器; □ 联络开关

图 1 三电源配电网运行模式

Fig. 1 Operation mode of three source distribution network

图 1 所示为一个三电源并列运行的复杂网络,图中馈线上的箭头表示指定的正方向,馈线旁边的箭头表示发生故障后故障电流的方向, $f$  表示故障点的位置。

根据图 1,可以得到该网络的网络描述矩阵  $D$ 。

### 2.2 生成故障电流支路末端节点判断矩阵

故障时 FTU 上报了故障电流信息以形成故障电流支路末端节点判断矩阵  $P$ 。其定义方式为:若第  $i$  个节点的开关经历了超过整定值的故障电流,则将网络描述矩阵  $D$  中节点  $i$  对应的对角线元素置

为 1,同时  $D$  中第  $i$  列所有非对角线上的元素均保

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

持不变;若第  $i$  个节点的开关未经历超过整定值的故障电流,则将网络描述矩阵  $D$  中节点  $i$  对应的对角线元素置为 0,同时将  $D$  中第  $i$  列所有非对角线上的元素均置为 0。这样就得到新矩阵即为故障电流支路末端节点判断矩阵  $P$ ,该矩阵实际上反映了故障网络的拓扑结构。

故图 1 中所示位置发生多点故障时,故障电流矩阵  $P$  为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从矩阵  $P$  可知:图 1 多点故障情况下的故障电流支路为:1 - 2;6 - 5;11 - 10 - 12。

### 2.3 故障电流支路末端节点及故障区段定位方法

利用故障判断矩阵  $P$  就可以进行故障电流支路末端节点及故障区段的判断。判断方法是:如果矩阵  $P$  中第  $i$  行只有对角线上的元素值为 1,该行非对角线上的元素的值均为 0,节点  $i$  就是故障电流支路的末端节点。确定故障支路的末端节点  $i$  之后,通过网络描述矩阵  $D$  可进行故障定位:若  $D$  中第  $i$  行存在  $D_{ij} = 1$ ,则故障区段为节点  $i$  和节点  $j$  之间;若  $D$  中第  $i$  行的元素全为 0,则故障区段为节点  $i$  之后的末端馈线。

由图 1 及多点故障情况下的故障判断矩阵  $P$

可知:第 2、5、12 行只有对角线上的元素为 1,表明节点 2、5、12 为相应故障电流支路的末端节点,相应 D 矩阵中有  $D_{23} = 1$ 、 $D_{27} = 1$ 、 $D_{54} = 1$  及第 12 行元素均为 0,所以短路故障发生在馈线段 2-3、2-7、5-4 和节点 12 之后的末端馈线,通过算法判断得到的故障区段和图 1 所示完全一致。

### 3 算法优化

#### 3.1 配电网信息存储

用于描述配电网拓扑结构的网络描述矩阵 D 是一个高度稀疏的矩阵,该矩阵只有少数的元素为 1,其余元素皆为 0。如果直接使用该矩阵进行存储及运算,由于配电网节点很多,存储该矩阵需要占用较大的存储空间,搜索该矩阵也需要较长的时间。

从压缩存储空间出发,有向图的存储可以使用邻接表、十字链表等多种存储方法<sup>[7]</sup>。虽然邻接表比十字链表结构简单,但是不容易判断两点之间关系。考虑到故障定位过程中,需要修改顶点之间的信息以反映故障时的网络结构及判断顶点之间的关系,选择使用十字链表作为配电网的存储结构。在十字链表中,配电网中每一条馈线  $v_i, v_j$  用一个弧结点表示,有向馈线段的始端称为弧尾,末端称为弧头。弧结点有四个域:tail 域表示这条弧的尾  $v_i$ ; head 域表示这条弧的头  $v_j$ ; linkh 域是链接以顶点  $v_j$  为弧头的弧的指针域;linkt 域是链接以顶点  $v_i$  为弧尾的弧的指针域;增加一个 value 域,用以存放弧的信息,当馈线无故障时,所有弧结点的 value 值为 1,表明正常时的馈线两端结点的联系,当该馈线故障时,用于表示馈线上的故障电流信息,馈线流过故障电流时,对应的弧结点的 value 值为 1,馈线未流过故障电流时,对应的弧结点的 value 值为 0。弧结点的结构如下:

|       |      |       |
|-------|------|-------|
| tail  | head | value |
| linkh |      | linkt |

弧结点的数目由馈线的数目决定,弧头相同的弧在同一链表上,弧尾相同的弧也在同一链表上,它们的头结点即为顶点结点。配电网中每一节点用一个顶点结点  $v_i$  表示,顶点结点  $v_i$  包含四个域:vertexnumber 域表示顶点编号;right 域用于链接以  $v_i$  为弧尾的第一个弧结点的指针域;down 域用于链接以  $v_i$  为弧头的第一个弧结点的指针域;value 域用于存放顶点的信息,若顶点无故障电流流过,value 值为 0;若顶点有故障电流流过,value 值为 1。顶点结点之间

非链相接,而是顺序存储,顶点结点数由配电网的节点数决定,用一个数组表示。顶点结点结构如下:

|              |       |
|--------------|-------|
| vertexnumber | right |
| value        | down  |

由于网络描述矩阵 D 是稀疏矩阵,十字链表也是稀疏矩阵的存储结构,因此十字链表既可以看成是配电网的存储结构,也可以看成是描述网络结构的网络描述矩阵 D 的存储结构。图 2 即为一有向图及其网络描述矩阵和十字链表表示,其中图 2(c)中  $V_1, V_2, V_3, V_4$  为四个顶点结点,表示有向图中的四个节点:顶点结点  $v_i$  的水平箭头链接以  $v_i$  为弧尾的弧结点,顶点结点  $v_i$  的垂直箭头链接以  $v_i$  为弧头的弧结点;弧结点  $v_i, v_j$  的水平箭头链接以  $v_i$  为弧尾的弧结点,垂直箭头链接以  $v_j$  为弧头的弧结点。符号  $\Lambda$  表示链接域为空。

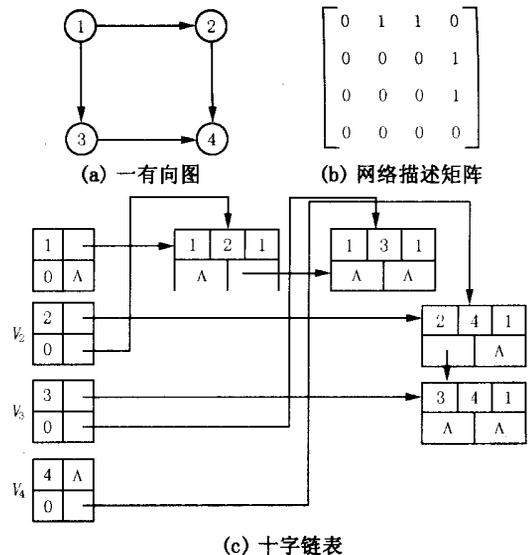


图 2 一有向图及其网络描述矩阵和十字链表

Fig. 2 Crosslinked list and sparse matrix of an oriented graph

#### 3.2 算法优化

利用十字链表存储配电网结构信息后,在形成网络判断矩阵 P 时,可以对前述算法进行优化。

##### 1) 生成故障判断矩阵 P 的十字链表

远方监控终端检测到某节点过流,则将网络描述矩阵 D 的十字链表中相应的顶点节点的 value 值变成 1。若某顶点节点的 value 值为 1,则该 down 域所指向的弧结点的 value 值不变;若某顶点节点的 value 值为 0,则该 down 域所指向的弧结点的 value 值变成 0。

##### 2) 判断故障区段

搜索故障判断矩阵  $P$  的十字链表的顶点节点,若某顶点节点的  $value$  值为 1,且该顶点节点的  $right$  域所联接的所有弧结点的  $value$  值为 0,则该节点为故障电流支路的末端节点,而相应的弧结点所对应的馈线即为故障区段;若某顶点节点的  $value$  值为 1,且该顶点节点的  $right$  为空,表明该节点为故障电流支路的末端节点,也是馈线支路的末端节点,故障发生在该节点之后的馈线末端。

#### 4 结语

本文将馈线故障定位过程归结为先进进行故障电流支路末端节点的判断,即判断出故障区段一端过流节点,然后根据接线关系进行故障定位。在此基础上,提出了一种馈线故障定位优化算法,该算法采用有向图描述网络接线关系以提高存储效率,判断过程只需要过电流监控点的信息和网络接线关系。另一方面,由于使用网络描述矩阵存储配电网的网络结构信息及利用矩阵进行运算占用较多的存储空间和搜索时间,采用十字链表存储网络结构信息和矩阵,并对算法进行优化,可以更有效地提高存储效率和缩短搜索时间。该算法适用于单电源树状网络和多电源网络开环运行情况的非单一故障的故障定位,故障区段定位过程表明该算法实现故障定位十分简单,搜索故障区段速度很快。

#### 参考文献:

[1] 刘健,倪建立,杜宇(LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu). 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法(The Unified Matrix Algorithm for Fault Section Detection and Isolation in Distribution System) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 3(1):31-33.

- [2] 朱发国,孙德胜,姚玉斌,等(ZHU Fa-guo, SUN De-sheng, YAO Yu-bin, et al). 基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法(Optimized Matrix Algorithm of Line Fault Location Based on Field Terminal Unit) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(15):42-44.
- [3] 卫志农,何桦,郑玉平(WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping). 配电网故障定位的一种新算法(A Novel Algorithm for Fault Location in Power Distribution Network) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(14):48-50.
- [4] 刘健(LIU Jian). 变结构耗散网络(Variable Structure Dissipated Network) [M]. 北京:中国水利水电出版社(Beijing:China Hydraulic and Electric Power Press), 2000.
- [5] 江道灼,张峰,张怡(JIANG Dao-zhuo, ZHANG Feng, ZHANG Yi). 基于配电监控终端的配网故障区域判断和隔离(Fault Sections Detection and Isolation in Distribution System Based on FTU) [J]. 继电器(Relay), 2002, 30(15):21-24.
- [6] 刘健,程红丽,董海鹏,等(LIU Jian, CHENG Hong-li, DONG Hai-peng, et al). 配电网故障判断与负荷均衡化(Fault Section Identification and Load Balancing of Distribution Network) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(22):34-38.
- [7] 高宏宾,倪玲(GAO Hong-bin, NI Ling). 数据结构(Data Structure) [M]. 西安:西北工业大学出版社(Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press), 1994.

收稿日期: 2003-08-27; 修回日期: 2003-11-21

作者简介:

刘会家(1969 - ),男,硕士,讲师,主要研究方向为配电网自动化,绝缘设备故障检测;

李 宁(1964 - ),男,工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。

### An optimized algorithm for feeder fault location based on FTU

LIU Hui-jia, LI Ning

(College of Electric & Information, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** This paper presents an optimized algorithm for feeder fault location based on FTU. When the fault feeder occurs, the corresponding fault overcurrent branch circuit will be built, then the fault judgement matrix  $P$  will be formed by adding the FTU information about the fault overcurrents and their directions to the describing matrix  $D$ . According to the values of the related elements in the matrix  $P$ , the end node of the fault overcurrent branch circuit can be identified rapidly and correctly, consequently the fault feeder can be judged. Because of the crosslinked list suitable for bidirectional search, applying it to store the matrix  $D$  and  $P$ , can reduce the storage space efficiently, and improve the speed of the fault feeder location further.

**Key words:** feeder automation; fault location; distribution automation; crosslinked list