

基于配电监控终端的配网故障区域判断和隔离

江道灼¹, 张 锋¹, 张 怡²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江海洋学院信息工程学院, 浙江 舟山 316004)

摘要: 为充分发挥日益完善的馈线自动化硬件系统的功能来达到迅速判断隔离配网故障区域的目的, 算法采用变结构耗散网络配网模型, 将配电网的开关看作图的顶点, 将其馈线看作图的弧, 并将流过开关的电流当作顶点的负荷, 将馈线供出的负荷 (即接于该馈线的配电变压器供出的负荷) 当作弧的负荷, 通过合理配置配电监控终端快速构成配网归一化负荷矩阵, 从而进行过热弧搜索以有效地解决配电网故障区段的判断和隔离问题。实践结果表明使用本算法能快速有效地达到目的。同时给出了算法中关键模块的程序框图, 对算法中的稀疏矩阵数据结构也进行了详细描述。

关键词: 配电网; 配电监控终端; 故障区域; 稀疏矩阵

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)09-0021-04

1 引言

馈线自动化是配电自动化系统的重要组成部分。对配电网系统的故障定位、隔离和恢复非故障区域的供电, 其实质也就是对馈线故障进行准确定位、迅速隔离和快速恢复非故障区域供电的问题。通过在户外馈线分段开关处安装柱上 FIU 以及在配电变压器处安装 TIU, 并建设可靠的通信网络将它们和配电网控制中心的 SCADA 系统连接, 再配合相关的处理软件可以构造高性能的馈线自动化系统。通过利用该系统中的测控装置并结合本文提出的算法, 可以迅速判断故障区域和决定隔离故障所需要操控的开关, 以便快速切除故障, 恢复非故障区域的供电, 从而可以有效缩短停电时间, 提高供电可靠性^[1], 这是目前负荷密度大的城网馈线自动化的发展方向^[2]。目前配电网自动化系统中的硬件系统日趋完善, 要充分发挥这些硬件系统的功能, 减轻运行调度人员的负担, 必须有性能良好的事故处理程序的支持^[3]。文献[4]提出了解决单电源辐射状配电网和开环运行环形配电网的故障定位和隔离的矩阵算法, 该方法的缺点是无法处理双电源或多电源并列运行的情况, 同时算法实现需要的存储空间与计算量大, 当系统节点数较多时, 难以满足系统实时性的要求; 文献[5]提出了一种基于变结构耗散网络的新算法, 将故障区域判断和隔离的问题转化为过热弧搜寻问题, 较好地解决了多电源并列运行情况下配电网故障处理的问题。但算法在故障后重新构造配网拓扑结构、根据顶点负荷求取弧负荷的点弧变换以及过热弧的搜寻过程中仍存在大量的计算, 在某些实时性要求高的配电网中仍然可能达不

到要求。根据分析, 占据算法处理时间主要在于点弧变换过程, 这是因为该算法中认定配电变压器处没有安装测控装置 (如 TIU), 弧的负荷不能直接获取。但实际上目前很多配电自动化项目为了实现进一步提高供电可靠性以及远方抄表、电能损耗核算等功能, 都采用在配电变压器处安装测控装置 (如 TIU), 并且通过通信网络和配网自动化中心相连的系统方案, 这在硬件上为提出新的配电网故障定位和隔离方法奠定了基础。

2 配电网基本简化条件 (BSC)

为简化分析起见, 进行配电网拓扑分析和故障定位处理时, 假设^[6]:

- (1) 主干馈线上各段的电压相等;
- (2) 主干馈线上各段的电压归一化值为 1, 即等于相应电压等级的额定电压 U_N (kV);
- (3) 各负荷点负荷功率因数近似相等;
- (4) 忽略三相不平衡因素和馈线沿线的损耗, 采用一线图代替三线图描述配电网结构。

在 BSC 下, 负荷可以采用代表相的电流来反映, 即配电网的负荷矩阵可以用流过馈线沿线各开关的代表相电流和各段馈线供出负荷的代表相电流来描述, 显然此时的负荷矩阵是一个实数矩阵。根据工程实践证明, BSC 条件下的配网故障判断和隔离结果可以有效地反映实际配网情况^[6,7]。

3 配电网数学模型

文献[7]提出将配电网看作是一种有向图, 采用邻接矩阵加以描述, 将配电线路沿线的馈线开关当作是图的顶点, 将馈线当作是图的有向边, 其方向

就是线路上潮流的方法,馈线供出的负荷可以看作是弧的负荷,开关流过的电流可以看作是顶点的负荷,从而构成描述配电网的数学模型。以下是一些具体的矩阵模型。

3.1 配电网的负荷分布矩阵

建立 $N \times N$ (N 为配电网中主干馈线上的顶点数目)的配电网负荷分布矩阵 L ,即

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ l_{N1} & l_{N2} & \dots & l_{NN} \end{bmatrix}$$

式中: L 的对角线元素为流过各顶点的负荷,即 $l_{ii} = l(v_i)$ ($1 \leq i \leq N$),也就是对应开关流过的负荷; L 的其它元素为对应弧供出的负荷,即 $l_{ij} = l(v_i, v_j)$,在配电网基本简化条件下即等于该弧对应馈线段上所有配电变压器供出负荷的和; L 中没有对应弧的元素为 0。

3.2 配电网的额定负荷分布矩阵

建立 $N \times N$ 的配电网额定负荷分布矩阵 R ,即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & r_{NN} \end{bmatrix}$$

式中: R 的对角线元素为各顶点的额定负荷,即对应开关的额定负荷; R 的其它元素为该元素所对应的弧供出的额定负荷,即相应馈线段的额定负荷; R 中没有对应的弧的位置上的元素为 0(这样可以在存储 R 时采用稀疏矩阵存储技术)。

3.3 配电网的归一化负荷分布矩阵

建立 $N \times N$ 的配电网归一化负荷分布矩阵 L_n ,

$$L_n = \begin{bmatrix} l_{n11} & l_{n12} & \dots & l_{n1N} \\ l_{n21} & l_{n22} & \dots & l_{n2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ l_{nN1} & l_{nN2} & \dots & l_{nNN} \end{bmatrix}$$

即 L_n 中的元素分别为

$$l_{nii} = \frac{100 l_{ii}}{r_{ii}}; \quad l_{nij} = \frac{100 l_{ij}}{r_{ij}}$$

称其中归一化负荷大于 100 的弧为过热弧。

3.4 耦合点分布矩阵

配电网中的 T 接分支对应的顶点通常为不可测控点,称为耦合点。可以用一个 $1 \times N$ 的分布矩阵 O 来描述配电网中耦合点的分布情况,即

$$O = [o_1 \quad o_2 \quad o_3 \quad o_4]$$

式中: $o_i = \begin{cases} 1, & \text{顶点 } v_i \text{ 是耦合点} \\ 0, & \text{顶点 } v_i \text{ 不是耦合点} \end{cases}$

建立耦合点分布矩阵,不但有利于快速构成负荷分布矩阵,而且有利于降低对配电网故障进行判断、定位与隔离时的处理难度。

4 配电网矩阵信息的存储

从上面配电网数学模型的分析可知,其负荷分布矩阵是一个稀疏矩阵,对于负荷未知或为 0 的顶点信息可以不必存储;另一方面,该负荷分布矩阵的元素在计算过程中需要经常变动(如通过计算使负荷顶点从未知变成已知时,就需要对负荷分布矩阵动态追加信息)。根据这些特点,通过分析,认为用十字链表存储该负荷分布矩阵的信息最为恰当。

一般的十字链表由于考虑到其矩阵维数也经常动态变化,故而其头结点指针 $Head$ 也用链表串接效率高。但考虑到算法中的负荷分布矩阵的维数由配电网主干馈线上的顶点数决定,而配网主干馈线上的顶点数不经常变动,为了提高定位矩阵元素的速度,将算法中定义的十字链表的头结点放入一个数组中,但为了应付可能出现的主干馈线段增减的问题,将该数组设计为一个可以动态增减长度的数组,从而在提高算法效率的同时也保证算法的健壮。在十字链表中,每个非零元均用一个结点表示,结点中有表示结点位置的 row, col 变量,有表示结点数值的 val 变量,还有用来链接同一行中下一个非零元素的 $right$ 指针和用来链接同一列中下一个非零元素的 $down$ 指针。例如,图 1 给出了稀疏矩阵 M 的十字链表结构。

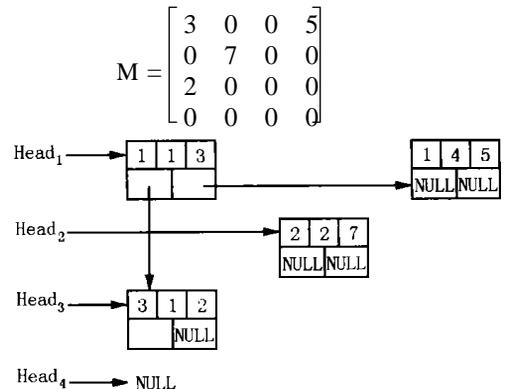


图 1 稀疏矩阵 M 的十字链表结构

Fig. 1 The crosslinked table of sparse matrix M

5 算法介绍

5.1 根据各测控终端 (FIU、TIU 及 RTU) 上报数据形成负荷分布矩阵

5.1.1 弧负荷求取

如果在弧对应的馈线段上无配电变压器或者不

存在该弧对应的馈线段,则该弧负荷为0;如果接有配电变压器,则弧负荷是这些配电变压器负荷的总和。假如弧 (v_i, v_j) 对应馈线段上装有 N 个配电变压器,则有

$$l(v_i, v_j) = \sum_{k=1}^N l(v_k) \quad (1)$$

式中: $l(v_i, v_j)$ 为弧 (v_i, v_j) 的负荷; $l(v_k)$ 为接于该馈线段上某一配电变压器的负荷。

5.1.2 顶点负荷求取

按顶点是否安装有测控装置将顶点分为可测控顶点和不可测控顶点,可测控顶点对应于配电网各类开关(断路器、负荷开关、联络开关等),其负荷就是对应测控终端上报的电流。

不可测控顶点也就是耦合点,对应于配电网的T接分叉点,由于该顶点没有安装FTU等测控装置,故该点负荷不能直接获取。但根据前面配电网的基本简化条件,其值可以由该顶点所有子顶点负荷和所有从该顶点出发到其子顶点弧负荷的总和求得。如图2所示,顶点 i 是耦合点,顶点 j, k 是其子顶点。



图2 耦合点示意图

Fig. 2 The sketch map of coupling point

顶点 i 的负荷可表示为

$$l(v_i) = l(v_j) + l(v_k) + l(v_i, v_j) + l(v_i, v_k) \quad (2)$$

耦合点负荷求取程序框图如图3所示。

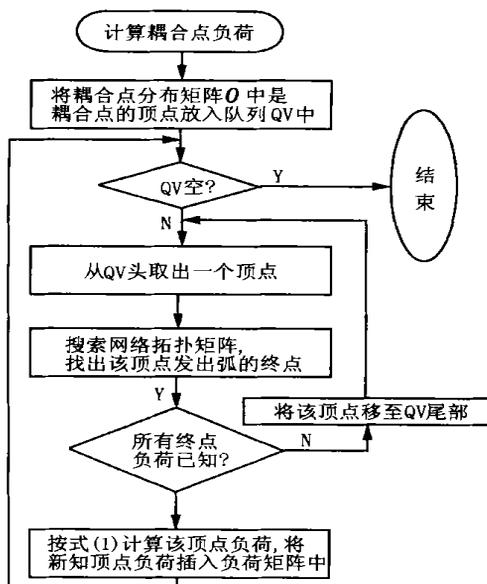


图3 耦合点负荷求取程序框图

Fig. 3 The program flow for evaluation of coupling point

5.1.3 形成负荷分布矩阵

根据上面两步所求取的弧负荷和顶点负荷,可以依据3.1中配电网的负荷分布矩阵的定义求出该矩阵。而额定负荷矩阵反映了顶点和弧的负荷限制条件,该阵可以根据实际设备情况通过配套可视化软件输入形成。然后根据3.2中配电网归一化负荷分布矩阵的定义,通过运算就能快速地确定该矩阵,为后续的过热弧搜索算法奠定基础。

5.2 过热弧搜索

通过计算获得配电网归一化负荷矩阵后,有关配电网故障区段判断和定位隔离问题,实际上就是从归一化负荷矩阵中搜索出过热弧,并根据所有过热弧的起点和终点的性质决定出故障区域,然后将故障区域周围的开关均断开的过程。具体步骤是:计算并按上述十字链表类存储配电网归一化负荷稀疏矩阵以后,利用该类中的十字链表头节点数组中存储的头节点,对矩阵中所有的弧元素进行循环搜索,对有负荷的弧可以通过操作十字链表取得该弧负荷,如果其值大于100时,则记录该弧为过热弧。

5.3 故障区段判断和隔离

通过分析,可以归纳出过热弧顶点的性质不同,同一条过热弧所确定的故障区域不同。对于两端顶点都装有可控开关的过热弧,其两端顶点所确定的区域就是故障区段,将两端顶点对应可控开关分断就可以隔离故障。但如果过热弧两端的顶点存在不可测控顶点,其故障区域的判断和定位隔离则要根据具体的配电网结构来确定。图4为判断、定位配电网故障区域的一种可行程序流程。

6 算例分析

假设如图5所示的双电源并列运行的配电网,在弧(2,3)上的配电变压器出口处发生了三相短路故障。配电网配置的TTU、FTU上报数据如表1所示(为一般起见,故意打乱了编号顺序)。

表1 TTU、FTU上报数据

测控装置名称	上报电流数据	测控装置名称	上报电流数据
FTU1	102.0	TTU3	4.0
FTU3	90.0	TTU4	9.0
FTU4	75.0	TTU5	9.0
FTU6	3.0	TTU6	146.0
FTU7	4.0	TTU7	3.0
FTU8	93.0	TTU8	3.0
FTU9	100.0	TTU9	7.0
TTU1	8.0	TTU10	7.0

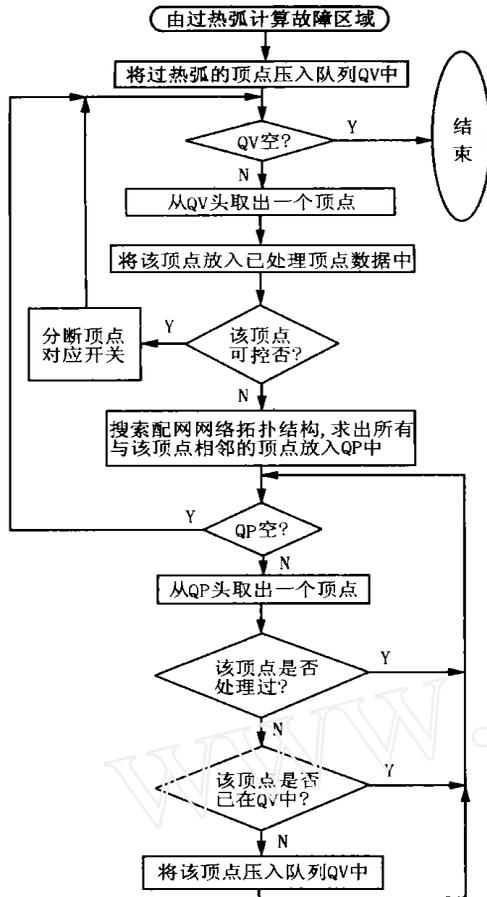


图4 由过热弧求取故障区域的流程

Fig. 4 The program flow for acquisition of the fault sections by over-heated arcs

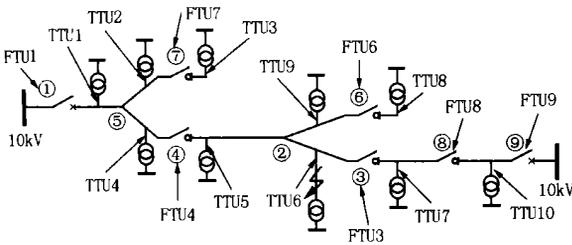


图5 含有过热弧的双电源并列运行配电网
Fig. 5 Double source distribution network which has over-heated arc

由此可得该配网的负荷矩阵 L 为

$$L = \begin{bmatrix} 102.0 & 0 & 0 & 0 & 8.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 66.0 & 146.0 & 0 & 0 & 7.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 90.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 \\ 0 & 9.0 & 0 & 75.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9.0 & 94.0 & 0 & 6.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 93.0 & 7.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 \end{bmatrix}$$

假设图 5 所示的配电网的额定负荷矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 100.0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100.0 & 10.0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 \\ 0 & 10.0 & 0 & 100.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.0 & 100.0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 & 10.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 \end{bmatrix}$$

则归一化后的负荷矩阵 L_n 为

$$L_n = \begin{bmatrix} 104.0 & 0 & 0 & 0 & 80.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 66.0 & 1460.0 & 0 & 0 & 70.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 90.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30.0 & 0 \\ 0 & 100.0 & 0 & 76.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100.0 & 96.0 & 0 & 60.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 93.0 & 70.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100.0 \end{bmatrix}$$

由 L_n 可知, 弧 (v_2, v_3) 是过热弧, 根据配电网故障区域判断程序计算结果, 可知需切除顶点 v_3, v_4, v_6 对应的开关。

7 结语

本文所述的基于变结构耗散网络理论的配电网故障判断、定位与隔离的改进算法, 将断路器、分段开关和联络开关同样看待, 不必区分, 应用非常方便, 同时实现了多电源供电运行与带分支树形结构配电网故障定位算法的统一。另外与改进前的算法相比, 由于尽量利用配电网中各测控终端上报的数据直接形成负荷分布矩阵, 简化了点弧变换算法, 从而有效提高了程序的处理速度; 另一方面, 由于程序中采用了基于十字链表的稀疏矩阵存储技术, 有效提高了存储效率。作者在浙江某城区配电网自动化系统开发中采用了上述算法, 取得了良好的效果。

参考文献:

[1] Hart D G, Uy D, Northcote Green J, LaPlace C, Novosel D. Automated solutions for distribution feeders[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2000, 13(4).
 [2] Apel R, Jaborowicz C, Kussel R. Fault management in electrical distribution networks[J]. Electricity Distribution, 2001, 3.
 [3] 林功平. 配电网馈线自动化解决方案的技术策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7).

(下转第 57 页)

4 结语

本充电机具有绿色化概念,没有容量的瓶颈限制,特别适合于需要大容量充电机的场合。总而言之,此充电机在直流操作电源行业是一种全新概念的充电机,通过实际使用证明此充电机具有很强的实用性,充电机的绿色化将成为未来电源发展的方向。

参考文献:

[1] 朱松然. 蓄电池手册[M]. 天津:天津大学出版社, 1998.

- [2] 杨帮文. 实用电池充电器与保护器电路集锦[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.
- [3] 朱元保,沈子琛. 电化学数据手册[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1988.

收稿日期: 2002-05-10

作者简介:

戴永清(1948-),男,工程师,从事电力系统继电保护和直流操作电源的研究和产品开发工作。

张华敏(1961-),男,硕士研究生,高级工程师,从事电力系统自动控制研究工作。

DC charger with environmental protection concept

ZHANG Hua-ming¹, DAI Yong-qing²

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200081, China; 2. Ningbo Power Supply Bureau, Ningbo 315000, China)

Abstract: A DC charger with environmental protection concept and its new charge method - stairs charge method are introduced. This method is simple and useful with high reliability, it has not capacity limit or harmonic wave ponderance, and it won't produce electricmagnetic pollution to electricnetwork. This kind of charger has good application prospect.

Key words: charger; waveform complete; harmonic wave ponderance; stairs stabilize voltage & limit current charge method

(上接第 24 页)

- [4] 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).
- [5] 刘健,王兆全. 配电网故障区域判断和隔离[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(2).
- [6] 杨树余. 配电网[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [7] 刘健. 变结构耗散网络——配电网自动化新算法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2000.
- [8] 白树忠. 配电网故障自动诊断、隔离与恢复软件的开发与应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(2).
- [9] 朱锡贵,国志宏,贾明泉. 有信道馈线故障处理技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10).
- [10] Ozay N., Guven A N. Buyuksemerci A. Fettahlioglu, M. De-

sign and implementation of a feeder automation system for distribution networks[C]. Electric Power Engineering, 1999. Power Tech Budapest 99. International Conference on, 1999.

收稿日期: 2001-12-27;

回修日期: 2002-03-27

作者简介:

江道灼(1960-),男,教授,从事 HVDC 微机控制技术、FACTS 及其应用技术、配电网自动化等方面的科研工作。

张 锋(1960-),男,硕士研究生,从事配电网馈线自动化工作。

张 怡(1977-),女,助教,从事数据结构建模方面的研究工作。

Fault sections detection and isolation in distribution system based on FTU

JIANG Dao-zhuo¹, ZHANG Feng¹, ZHANG Yi²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China)

Abstract: For the sake of utilizing the function of the hardware system in the FA(Feeder Automation) to judge and isolate fault section rapidly, based on structure variable dissipated network model, the algorithm considers distribution network as a graph, so it regards the switches as vertexes and regards the feeder lines as arcs. The current flowed through the switches is defined as the load of the vertexes, and the supply of the feeder lines is defined as the load of the arcs. By configuring FTU reasonably we can format the unitary load matrix of distribution network quickly, so we can search for the over-heated arcs based on the matrix. With this, we can judge and isolate the fault sections in distribution system effectively. Program flow about the key modules are provided and discussed in the mean time, we also describe the detailed structure of the sparse matrix in the algorithm.

Key words: distribution network; FTU; fault section; sparse matrix