

# 基于分层拓扑模型的配电网故障定位优化算法

林景栋, 曹长修, 张帮礼

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 随着配电网规模的不断扩大, 配电网中的电源点及 T 接点的数量不断增多, 配电网故障定位的实时性矛盾将日益突出。针对此问题, 提出了基于分层拓扑模型的配电网故障定位优化算法。该算法充分考虑配电网故障定位的特点, 采用分层拓扑模型, 利用对分法, 通过计算某一区间中间层顶点故障信息状态组合情况, 以确定故障所属的更小区间, 逐步压缩并逼近故障所属区间, 实现故障的快速、准确定位。

**关键词:** 故障定位; 对分法原理; 分层模型; 配电自动化

**中图分类号:** TM71      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2002)08-0006-04

## 1 前言

配电网的故障定位和隔离是配电自动化的关键功能之一, 是提高供电可靠性的重要保证。随着配电网规模的不断扩大, 配电网中的电源点和 T 接点的数量也将不断增多, 对配电网故障定位的实时性要求也将越来越高。

目前, 实现配电网故障定位和隔离的算法主要有两类: 一类是以图论知识为基础, 根据配电网的拓扑结构进行故障定位, 文献[1]对各开关的故障信息状态采用异或计算, 经规格化处理后确定故障区段; 文献[2]通过对文献[1]的网络描述矩阵进行分块处理以节约内存; 文献[3, 4]采用过热弧搜寻算法, 将配电网的馈线看作弧, 将开关看作顶点, 则馈线供出

的负荷可以看作弧的负荷, 开关流过的电流可以看作是顶点的负荷。定义归一化负荷为弧负荷与额定负荷之比再乘以 100, 则故障区段显然是归一化负荷远大于 100 的那些弧, 这些弧称为过热弧。因此故障区段的问题实际上是过热弧搜寻问题。文献[3]将区域与一般弧同等对待, 先要计算区域内各条弧的平均负荷, 造成了计算的复杂。文献[5]将区域与一般弧分别描述、分别判断, 简化了故障定位的计算。另一类是以人工智能为基础, 如采用遗传算法<sup>[6]</sup>、神经网络和模式识别算法<sup>[7]</sup>等。文献[6]将网络拓扑信息通过评价函数反映出来, 随着网络拓扑结构的变化, 必须修改评价函数; 文献[7]通过神经网络训练识别, 计算时间长, 同时网络拓扑结构的变化又需重新训练。

- [4] 朱声石. 差动保护用 P 级电流互感器的问题[J]. 继电器, 2000, 28(7).
- [5] 朱声石. 多段式微机差动保护[J]. 继电器, 2001, 29(8).
- [6] (苏联) A M 费多谢也夫, 著, 张瑞政, 等译. 继电保护原理[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965, 4.
- [7] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].

北京: 中国电力出版社, 2002.

**收稿日期:** 2002-04-18

**作者简介:** 朱声石(1929 - ), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统继电保护的研究工作。

## The transient reliability of differential protection

Zhu Sheng-shi

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The transient reliability of the differential protection is determined by the accuracy of the current transformer and the characteristics of the differential relay. The transient error of the class P current transformer is analyzed. A suggestion is promoted to limit the transient error by double the accuracy limit factor of the class P current transformer. On the other hand by increasing the restraint coefficient, discriminating the wave form of the differential current and fast measuring the differential relay may override the transient unbalance differential current even the current transformer can keep linear transformation only about 2ms. The method of fast measuring recommended does not require an additional fast operating fault detector to catch the fault starting time.

**Key words:** differential protection; transient error of current transformer

以上这些算法均是利用相关故障信息通过对配电网的所有顶点进行较为复杂的计算而确定故障区段,并未充分利用配电网故障特点,因此随着配电网规模的扩大,这些故障定位算法的实时性矛盾将日益突出。为此,本文基于配电网的分层拓扑模型提出了配电网故障定位的优化算法,只利用部分顶点信息通过分阶段的计算方法,以逐步压缩逼近故障所属区间,到最后确定故障区段的寻优算法,该算法大大简化了故障定位算法的计算量,提高了故障定位算法的实时性,为故障定位算法的工程实用化提供了保证。其主要特点为:

(1) 采用分层拓扑模型对配电网拓扑进行描述,可挖掘更多拓扑信息;

(2) 将区域与一般区段分别对待,将区域作为一个整体进行处理,实现故障定位;

(3) 通过计算对应区间中间层相邻顶点的故障信息状态组合情况,重新确定故障区段所属的更小区间,逐步压缩逼近故障区段的所属区间,以实现故障的快速定位。

## 2 配电网故障定位优化算法原理

对于辐射状网、树状网和处于开环运行的环网,判断故障区段只需根据馈线沿线各开关是否流过故障电流就可以了。假设馈线上出现故障,显然故障区段位于从电源侧到末梢方向最后一个经历了故障电流的开关和第一个未经历故障电流的开关之间的区段<sup>[1]</sup>。

在配电自动化系统中,通常可以在各馈线开关处安放 FIU(馈线终端单元)来采集开关处的参数,因此利用 FIU 上传的各开关状态就可实现故障定位;但配电网中经常出现 T 接点,T 接点既不可控也不可测,将这样的顶点定义为耦合点(T 接点);与某一 T 接点直接相连的区段构成一个区域。由于 T 接点的存在,使得整个区域内各个区段的故障无法区分。因而,整个区域可作为一个整体进行故障判断。

**定义 1 耦合点:** (T 接点)在配电网中经常存在三条或三条以上馈线交于一点情况,这一点不是开关,所以该点不装备 FIU,因此这一点的状态既不可测也不可测,称其为耦合点。耦合点的负荷无法测量,即与耦合点相连的三条线段,其负荷是无法区分的。若确实要计算,可以按平分的方式计算。本文将作为一个整体进行辨识和计算。

**定义 2 区域:** 与耦合点相联的几条馈线组成的区间称为区域,区域必然只有一条馈线是流入电

能,其余为流出电能。即区域只能由一个源点供电。因此区域内的负荷便可由输入电能减去输出电能而计算出来。

对于不含耦合点的区段,故障区段两端顶点的故障信息状态一定不同,而其前后必是一段顶点的故障信息状态全为“0”,另一段全为“1”;对于含耦合点的区域,若与耦合点相邻的三个顶点之间,各顶点的故障信息中只有一个为“1”,则该区域故障,而其前后也必是一段顶点的故障信息状态全为“1”,另两段全为“0”。因此,在配电网中存在着大量的冗余故障信息,这就为故障定位的优化算法提供了基础。

由于故障区段只有一处,且故障区段的前后区间状态不同,因此如果能描述出配电网各顶点顺序关系,则不仅可以方便、快速地计算各相邻顶点之间的故障信息状态关系,而且还可采用对分法的分段定位原理,逐步压缩逼近故障区段所属区间,实现故障定位的快速搜索。

用对分法来实现故障区段的搜索,需要事先确定初始搜索区间,并要计算区间中间一点的状态即可压缩一半区间,从而大大简化故障定位的计算量。而如何寻找和表示搜索区间则与配电网的拓扑模型有关,本文提出了分层拓扑模型。

## 3 基于分层的配电网分层拓扑模型

对于  $N$  个顶点的配电网,其邻接矩阵  $C(c_{ij})_{N \times N}$  为  $N$  行  $N$  列矩阵,若顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间存在一条边,则  $c_{ij} = c_{ji} = 1$ ; 否则  $c_{ij} = c_{ji} = 0$ ; 另外  $c_{ij} = 0$ 。由于邻接矩阵  $C(c_{ij})_{N \times N}$  的元素  $c_{ij}$  表示顶点  $v_i$  到  $v_j$  长度为 1 的通路数目;  $C^k = (c_{ij}^{(k)})_{N \times N}$  的元素  $c_{ij}^{(k)}$  表示顶点  $v_i$  到  $v_j$  长度为  $k$  的通路数目。因此根据这一特点即可实现分层模型。

### 3.1 配电网的分层拓扑模型

配电网的分层拓扑模型指的是以某一源点(或末梢点或顶点)为基点,按距该基点的长度实现拓分层模型。显然,在配电网中每一顶点到基点的路径只有一条,为此定义配电网分层拓扑辨识矩阵

$$A_k = (a_{ij}^{(k)})_{N \times N}.$$

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} c_{ij}^{(k)} & c_{ij}^{(k)} = 1, i \neq j, k = 1, \dots, N-1 \\ 0 & c_{ij}^{(k)} = 1, i = j, k = 1, \dots, N-1 \\ 0 & i = j, k = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1)$$

定义基点矩阵  $D_i = (d_{1j})_{1 \times N}$ 。

由分层拓扑辨识矩阵就可以求出基点矩阵对应的分层拓扑模型为:

$$\begin{cases} \text{第一层} & y_{i1} = D_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iN}) \\ \text{第二层} & y_{i2} = D_i \cdot A = (d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2N}) \\ \dots & \\ \text{第 } N \text{ 层} & y_{iN} = D_i \cdot A_{N-1} = (d_{N1}, d_{N2}, \dots, d_{NN}) \end{cases} \quad (2)$$

分层拓扑模型中元素  $f_{ij} = 1$  表示第  $i$  层的顶点为  $v_j$ 。

### 3.2 配电网区域的辨识

T接点的度大于2,因此从邻接矩阵  $C(c_{ij})_{N \times N}$  可以判断出 T 接点。

$$\deg(\sum_{j=1}^N c_{ij}) > 2 \quad \text{则顶点 } v_i \text{ 为 T 接点} \quad (3)$$

定义 T 接点矩阵  $W = (w_i)_{1 \times N}$ ,  $v_i$  为 T 接点, 则  $w_i = 1$ , 否则  $w_i = 0$ 。

### 4 配电网故障定位的数据结构

对于一般的区段故障,则故障区段必位于两个相邻顶点之间,且其两个相邻顶点的故障信息状态必不同,而其他区段两个相邻顶点的故障信息状态必相同;对于区域故障,则故障区段一定位于与耦合点相邻的几个顶点之间,且这相邻几个顶点的故障信息状态中只有一个顶点的故障信息状态为“1”,而其他区段两个相邻顶点的故障信息状态必相同。由于故障唯一,在整个配电网必只有一处相邻顶点的故障信息状态不同。因此只需计算相邻顶点之间的状态关系即可确定故障区段。

故障信息状态是通过 FIU 上传开关是否经历了超过整定值的过负荷信息而获取的,为此定义以下数据结构:

**定义 3** 故障信息矩阵  $G = [g_i]_{1 \times N}$ 。如果顶点  $v_i$  经历了过电流,则  $g_i = 1$ ; 如果顶点  $v_i$  未经历过电流,则  $g_i = 0$ ; 耦合点因无法上传故障信息,设其故障信息状态为 0。

**定义 4** 顶点向量  $I_k = [e_i]_{1 \times N}$ , 若  $i = k$ , 则  $e_k = 1$ ; 若  $i \neq k$ , 则  $e_i = 0$ 。

**定义 5** 区域向量  $T_{ij} = [c_{i1} \cdot d_{j1}, c_{i2} \cdot d_{j2}, \dots, c_{iN} \cdot d_{jN}]_{1 \times N}$ 。

分层拓扑模型描述了各顶点顺序关系,邻接矩阵则表达了各顶点的邻接关系,因此采用异或运算计算相邻两层或与耦合点相邻的上下两层之间顶点对应的故障信息状态,即可确定故障区段。因此利用全部顶点信息的确定故障区段的计算公式如下:

$$P_Q = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot (d_{ij} \cdot g_i \oplus d_{(i+1)k} \cdot g_k) \cdot (1 - w_j) \cdot (1 - w_k) \cdot (I_j + I_k) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot w_k \cdot g_i \oplus$$

$$\left( \sum_{l=1}^N c_{kl} \cdot d_{(i+2)l} \cdot g_l \right) \cdot (T_{k(i+2)} + I_j) = [p_i]_{1 \times N} \quad (4)$$

通过此公式,利用全部顶点的故障信息即可确定故障区段,  $p_i$  中状态为 1 的两个顶点或三个顶点所组成的区段即为故障区段。

## 5 配电网故障定位的优化算法

不论配电网有多少个电源点(源点),若某一区段故障了,必在某一源点可以反映出来,因此就可以以该源点为基点求出其分层拓扑模型。故障区段必在这分层拓扑模型的中间。用对分法来搜索故障区段,必须确定初始搜索区间和计算函数。

### 5.1 初始搜索区间的确定

由于故障区段必在这分层拓扑模型的中间,而且分层拓扑模型的第一层即源点的故障信息一定为“1”,其最后一层中必有一个顶点的故障信息为“0”,因此就选这整个分层拓扑模型为初始搜索区间。

### 5.2 对分法的搜索方法和搜索函数

按对分法的原理,先确定中间一层,但这一层的顶点数量可能多个,而且可能有些顶点故障状态为“1”也可能为“0”,因此单计算某一层的顶点故障状态无法确定故障区间。为此需先计算中间层与其上一层故障信息状态的关系,根据结果判定故障位于前半段或后半段或是就在这层开始的区间内;若故障就在这层开始的区间内,则停止搜索;否则再搜索前半段或后半段的中间层,如此操作直到确定故障区段。

因此在这计算中,首先构造一个计算某两层或相邻两层顶点的状态关系的函数,称这函数为定位向量  $ZP$ 。通过相邻两层间顶点故障信息的加法运算即可确定故障区段的位置。相邻两层的顶点有无联结关系由邻接矩阵决定;相邻两层有哪些顶点由分层拓扑模型确定;是否有耦合点由耦合点状态矩阵确定。其计算公式如下:

$$ZP = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot (d_{ij} \cdot g_i + d_{(i+1)k} \cdot g_k) \cdot (1 - w_j) \cdot (1 - w_k) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot w_k \cdot g_i + \left( \sum_{l=1}^N c_{kl} \cdot d_{(i+2)l} \cdot g_l \right) \quad (5)$$

若计算结果  $ZP$  为“0”,则说明故障区段位于基点到该层的上半区间;若计算结果  $ZP$  为偶数(不含 0);则说明故障区段位于该层到末梢层的下半区间;若计算结果  $ZP$  为奇数;则说明故障区段就位于该层相邻的两层(或三层)内,搜索到此结束。

### 5.3 故障区段的确定

若故障区段就位于该层相邻的两层(或三层)内,就需要找出故障区段究竟是由哪些顶点组成,其计算公式为:

$$P = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot (d_{ij} \cdot g_i \oplus d_{(i+1)k} \cdot g_k) \cdot (1 - w_j) \cdot (1 - w_k) \cdot \{ I_j + I_k \} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_{jk} \cdot w_k \cdot g_i \oplus \left( \sum_{l=1}^N c_{kl} \cdot d_{(i+2)l} \cdot g_l \right) \cdot \{ T_{k(i+2)} + I_j \} = [p_i]_{1 \times N} \quad (6)$$

### 5.4 故障定位的优化算法的计算步骤

为了快速实现故障定位,并尽量减小计算量,可找一个故障信息状态为1的源点,按该源点求出配电网的分层拓扑模型。第一层称为源点层,最后一层称为末梢层。并取*i*为中间层的数值。

按公式(5)计算故障定位向量 $Z_P$ 。若 $Z_P$ 为奇数,则故障就位于这层开始的区间,按式(6)将*i*带入计算即可得到故障区段;若 $Z_P$ 为偶数(不含0),故障就位于这中间层到末梢层之间,则*i*取为这段区间中的中间层;若 $Z_P=0$ ,故障就位于这中间层到源点层之间,则*i*取为这段区间中的中间层。

若计算还未结束,按*i*的新值回到步骤继续计算。

## 6 算例分析

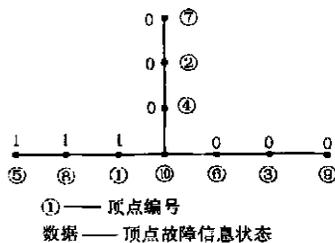


图1 某双源点配电网

已知图1所示双源点配电网源点矩阵

$$Z = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

顶点故障信息状态

$$G = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

T接点矩阵

$$W = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

### 6.1 利用全部顶点的故障定位算法

(1)由于源点 $V_5$ 的故障状态为1,以 $V_5$ 为基点的分层拓扑模型为:

$$\begin{cases} y_{51} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ y_{52} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0) \\ y_{53} = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ y_{54} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ y_{55} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ y_{56} = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ y_{57} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

(2)利用式(4)可以计算出

$$P_Q = [p_i]_{1 \times N} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

所以故障区段位于 $(v_1, v_4, v_6)$ 所组成的区间。

### 6.2 利用故障定位的优化算法

(1)由于源点 $V_5$ 的故障状态为1,以 $V_5$ 为基点的分层拓扑模型如式(7)。

(2)取 $i=4$ ,经公式(5)计算 $Z_P=0$ ,则故障区段应位于第一层到第四层之间,取 $i=2$ ;

(3) $i=2$ 时,经公式(5)计算 $Z_P=2$ ,则故障区段应位于第二层到第四层之间,取 $i=3$ ;

(4) $i=3$ 时,经公式(5)计算 $Z_P=1$ ,则故障区段应位于第三层开始的区段,取 $i=3$ ;

(5) $i=3$ 时,经公式(6)计算 $P=[1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,则故障区段位于 $(v_1, v_4, v_6)$ 所确定的区段。

分析以上算例的计算过程可以发现,利用配电网的分层拓扑模型可以将配电网中的区域和一般弧有效地结合在一起。不论是区域故障或是一般弧的故障,通过定义顶点向量和区域向量后均可采用统一的配电网故障定位算法,从而简化了故障定位过程。在采用分层拓扑模型的基础上,利用故障定位的优化算法,可以大大减小故障定位的计算量,为实现故障的快速性提供了一种有效的算法。

## 7 结论

(1)配电网的分层拓扑模型描述了各顶点顺序关系,有效地反映了顶点故障信息状态的顺序特点,满足了故障定位的实际操作需要。

(2)采用对分法原理,只通过计算中间层顶点的故障信息状态组合情况,就可以逐步压缩故障所属区间,既减小了计算量,又实现了故障快速定位。

(3)算例结果明确、直观,证明该算法正确、快速、实用性强。

### 参考文献:

- [1] 刘健,倪建立,杜宇.配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J].电力系统自动化,1999,23(1).

(下转第22页)

- Analysis in Deregulated power Systems Using Game Theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1340 ~ 1348.
- [6] Einar H S, W Ivar, Hans H F. Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1999, 14(2): 472 ~ 477.
- [7] Olav F B, Anders G, Arne H, Birger M, Ivar W. Generation Scheduling in A Deregulated System. The Norwegian Case [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 75 ~ 81.
- [8] Huse E S, Wangenstein I, Faanes H H. Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 472 ~ 477.
- [9] Garcia J, Roman H, Barquin J, Gonzalez A. Strategic Bidding in Deregulated Power System [C]. Trondheim 13th PSCC in Trondheim, 1999: 258 ~ 264.
- [10] Li C A, Raymond B J, Alva J S J. A New Unit Commitment Method [J]. IEEE Transactions on Power System, 1996, 12(1): 113 ~ 119.

收稿日期: 2001-12-28; 修回日期: 2002-01-25

作者简介:

王承民(1970 - ),男,博士研究生,从事电力市场方向的研究。

郭志忠(1961 - ),男,博士生导师,教授,研究领域为电力系统稳定,电力市场,光电互感器。

### Equal price method in the power market

WANG Cheng-min, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001 China)

**Abstract:** The equal price method based on the equilibrium theory in market can commendably be to combine the economic rule in market with the practice operation in power system, and is effective to solve competition problem in the power market. In the paper the basic theory of the equal price method was expatiated in detail, and it is indicated that the equal price method can solve not only the load dispatch problem, but also can solve the unit commitment problem.

**Keywords:** power market; equal price method; transactions; unit commitment

(上接第 9 页)

- [2] 朱发国,孙德胜,姚玉斌,等.基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法[J].电力系统自动化,2000,24(15):42-44.
- [3] 刘健,王兆安.配电网故障区域判断和隔离[J].西安交通大学学报,2000,34(2):7-10.
- [4] Jun Zhu, David L Lubkeman, Adly A Grgis. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders [J]. IEEE trans. on PWRD. 1997, 12(2): 801-809.
- [5] 林景栋,曹长修,张帮礼,等.基于拓扑辨识的配电网故障定位算法[J].重庆大学学报,2001,24(5):51-54.
- [6] 杜红卫,孙雅明,刘弘靖,等.基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J].电网技术,2000,24(5):52-55.
- [7] 费军,单渊达.配电网自动故障定位系统的研究[J].中国电机工程学报,2002,20(9):32-35.

收稿日期: 2002-01-15; 修回日期: 2002-03-08

作者简介:

林景栋(1966 - ),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为变电站综合自动化系统和配电网自动化系统、人工智能在电力系统中的应用。

曹长修(1937 - ),男,教授,博士生导师,主要研究方向为神经网络、专家系统、数据挖掘技术及其在工业领域中的应用。

张帮礼(1942 - ),女,教授,主要研究方向为神经网络、专家系统、数据挖掘技术及其在工业领域中的应用。

### Optimized algorithm of fault section diagnosis for distribution networks based on hierarchical model

LN Jing-Dong, CAO Chang-Xiu, ZHANG Bang-Li

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Along with enlargement of the scope of distribution networks, fault section diagnosis for distribution networks becomes an optimization problem in real-time operation environment. An optimal algorithm based on hierarchical topologic model is presented, where the mutual coupling of distribution networks are under considerations. By calculating fault state of middle vertexes in the region, the region that contains the fault section is compressed step-by-step by utilizing subsection principle. Finally the fault section in distribution network can be identified and isolated fleetly. Results of test show that the method presented is applicable and efficient.

**Keywords:** fault section diagnosis; subsection principle; hierarchical topologic; distribution automation system