

# 基于过热区域搜索的 多电源复杂配电网故障定位方法

梅 念, 石东源, 段献忠

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## A Fault Location Algorithm for Complex Multi-Source Distribution Networks Based on Over-Heated Region Searching

MEI Nian, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The distribution network fault location method based on over-heated arc is analyzed in various aspects, and its deficiencies are reviewed. On this basis, an over-heated region searching based new fault location method for complex multi-source distribution network is proposed. By means of estimating the faulty section of the over-heated region instead of the over-heated arc as well as introducing of the vertex-to-arc load and regional load, a concise algorithm to separate minimum distribution region is given and the searching steps of over-heated region are discoursed upon in detail. Meanwhile, for the incomplete fault information of feeder's measurement and control terminal, the solution is provided by ignoring the node with unknown information. Analysis result of calculation example shows that the proposed method possesses good fault tolerance and is suitable to multi-source distribution networks with various special switches, its reasoning is simple as well as the fault degree can be accurately scaled, so the proposed method is available.

**KEY WORDS:** distribution networks; fault location; over-heated arc; over-heated region; special switches; incomplete information

**摘要:** 对基于过热弧搜索的配电网故障定位方法进行了多方面分析, 讨论了其不足之处。在此基础上提出基于过热区域搜索的多电源复杂配电网故障定位新方法。通过判断区域故障以及引入顶点对弧的负荷和区域负荷, 给出简便的最小配电网区域分离算法, 并详细论述了过热区域的搜索步骤; 同时对馈线测控终端故障信息不完备的情况给出了相应对策。算例分析表明, 新方法推理简单, 容错性好, 且可精确衡量故障的程度, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 配电网; 故障定位; 过热弧; 过热区域; 特殊开关; 不完备信息

## 0 引言

馈线自动化是配电自动化的重要内容。对于馈线故障, 已有的基于重合器的馈线自动化系统存在故障切断时间长、可靠性差、故障影响范围大等一系列缺点, 而基于馈线测控终端(feeder terminal unit, FTU)及通信网络的配电自动化系统可有效地解决这一问题。

由于故障定位所依据的 FTU 信息可能受干扰而丢失或发生畸变, 很多学者对故障信息不完备情况下的单电源辐射状配电网故障定位方法进行了深入研究, 如利用粗糙集<sup>[1-2]</sup>、人工神经网络<sup>[3-4]</sup>、优化算法<sup>[5]</sup>以及贝叶斯理论<sup>[6]</sup>等进行故障定位。为适应配电网多电源并列供电的发展, 已有文献提出基于优化算法<sup>[7]</sup>、矩阵算法<sup>[8-11]</sup>及过热弧搜索<sup>[12-14]</sup>等方法的故障定位策略, 其中过热弧搜索算法具有原理简单、可详细提供故障程度等优点, 并在实际电网中获得了成功应用<sup>[12-14]</sup>。

文献[12]提出了基于过热弧搜索的故障定位方法, 并通过分离支接点区域、点弧变换 2 个步骤获取弧的负荷。文献[13]通过配变测控终端(transformer terminal unit, TTU)直接获取弧的负荷, 但是在没有配置 TTU 的配电网中该方法将失效。文献[14]在文献[12]的基础上给出了含特殊开关的配电网的故障定位方法, 但是其特殊开关的转化方案比较复杂。

本文提出了基于过热区域搜索的多电源复杂配电网的故障定位方法。针对已有文献中支接点区域分离过程较复杂的问题, 给出一种简便的最小配电网区域分离算法及相关的数据库结构设计, 然后通过

对每个最小配电区域进行故障判定而省略了大量的过热弧识别步骤,还对 FTU 上报故障信息不完备的情况给出了相应对策。

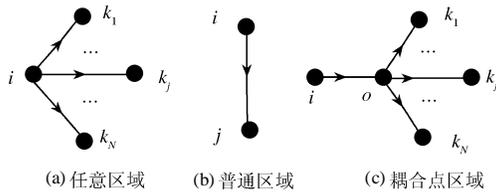
## 1 过热弧搜索方法

### 1.1 基本原理

将配电网的开关(包括断路器、分段开关、联络开关)和支接点看作顶点,馈线段看作弧,且弧的方向是线路上潮流的方向,可以将配电网映射为一个有向图。定义顶点的负荷为流经开关的负荷,弧的负荷为馈线段供出的负荷,就得到该配电网对应的变结构耗散网络。根据耗散网络的性质,可由顶点的负荷计算弧的负荷,并找出过热弧(即故障区段)<sup>[12]</sup>。图 1 给出了以有向图方式表示的几类区段。对于图 1(a)所示区段,其点弧变换公式为

$$l_{ik_j} = l_{ii} - \sum_{m=1}^N l_{k_m k_m} - \sum_{m=1}^{j-1} l_{ik_m} - \sum_{m=j+1}^N l_{ik_m} \quad (1)$$

式中:  $l_{ii}$  为顶点  $i$  的负荷;  $l_{ik_j}$  为弧  $(i, k_j)$  的负荷;  $N$  为顶点  $i$  的出度。



注:  $\rightarrow$  实际的负荷方向

图 1 故障定位中的几类区段

Fig. 1 Several types of sections in the fault location process

在普通配电网中,由于一台馈线开关只能馈出一条线路,而支接点的度数大于 2,因此支接点的负荷信息实际上不可直接获取。因此,为了使得区段端点不是支接点,将区段分为类似图 1(b)(c)所示的 2 类区段。对于图 1(b)所示区段,根据式(1),其点弧变换公式可简化为

$$l_{ij} = l_{ii} - l_{jj} \quad (2)$$

对于图 1(c)所示区段,由于支接点的负荷未知,无法求出该区域内各条弧的负荷。一种近似的处理办法是用耦合点区域  $P$  内各条弧的平均负荷  $l_a$  代替各条弧的实际负荷,且根据式(1)可得  $l_a$  与区段端点负荷之间的关系为

$$l_a = \frac{1}{n} l(i, k_1, \dots, k_N) = \frac{1}{n} (l_{ii} - \sum_{k_m \in a} l_{k_m k_m}) \quad (3)$$

式中:  $l(i, k_1, \dots, k_N)$  为  $P$  内各条弧的负荷的总和;  $n$  为  $P$  内弧的总条数;  $a$  为  $P$  的末点集合。

然后,对负荷矩阵进行归一化处理,其中归一

化负荷大于 100 的弧即为最终的故障区段<sup>[12]</sup>。

### 1.2 算法分析

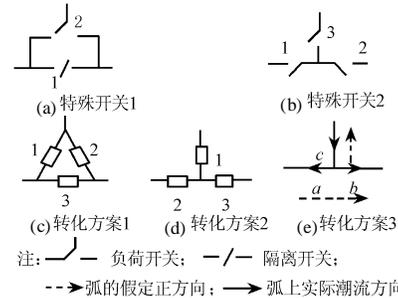
过热弧搜索方法能够快速、准确地定位故障区段,且能够提供故障的程度信息,但在实际应用中存在以下问题:

(1) 由于耦合点的负荷未知,当耦合点区域内的一条弧上发生故障时,以上平均值的近似处理方法得到的结果将是该区域内所有弧都是过热弧,也就是说仅能确定故障发生的最小配电区域。由于故障隔离的最小范围就是最小配电区域,不论耦合点区域内哪一条弧上发生故障,整个区域都必须隔离出来。因此不必求取耦合点区域内弧的平均负荷,直接判断区域内是否有故障将更加简便。

(2) 为了区分区域内负荷为 0 的弧和负荷平均分配的弧,还需要对分支线路的首级分段开关距离耦合点很近的情况进行特殊处理。

(3) 向专线用户或综合配电负荷供电的中压/低压配电所,在其馈线的进线、出线和变压器交汇处常安装类似图 2(a)(b)所示形式的组合开关<sup>[15]</sup>。文献[14]已为特殊组合开关 1 提供了如图 2(c)所示的转化方案,但是该方案需用 3 个耦合点和 3 个普通开关来对该组合开关进行等效,即在对应的变结构耗散网络中增加了 5 个顶点,使得网络模型极其复杂。同理可以将特殊组合开关 2 按照图 2(d)所示方案来转化,但也需用 1 个耦合点和 3 个普通开关进行等效。由于这种特殊组合开关一般安放在配电所内,与处于户外的馈线段相比,开关内部发生短路故障的概率很小,因此完全可以将这些特殊开关分别处理成一个节点,而将重点放在馈线的故障定位上。但这种转化方案使得 2 类组合开关都成了耦合点,应用原有算法存在扩大故障隔离区域的问题。

产生问题(2)(3)的根本原因在于原有算法没有定义支接点处的负荷。实际上,顶点和弧的负荷都是有方向的,而原算法是针对单电源供电配电网



注:  $\square$  负荷开关;  $\square/\square$  隔离开关;

$\dashrightarrow$  弧的假定正方向;  $\rightarrow$  弧上实际潮流方向

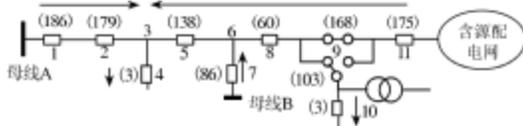
图 2 几类特殊开关及其转化方案

Fig. 2 Several types of special switches and their conversion scheme

网，且弧的正方向规定为线路上潮流的方向，因此这些负荷仅用负荷的大小来表征即可。这种处理方法对仅与 2 条馈线关联的普通开关是有效的，但是不能表征支接点处的负荷。例如图 2(e)中，如果弧的方向与潮流的实际方向一致，顶点处有 3 个负荷量，用哪一个来表征顶点负荷都不正确。在多电源供电网络中，假定正向可能与实际潮流方向相反，负荷的表征就更复杂了。

## 2 基于过热区域搜索的故障定位方法

为使原算法适用于多电源网络，对弧的方向作如下规定：该配电网仅由其中一个电源(该电源可任意选取)供电时，向全网供电的功率流出方向为馈线的正方向。以图 3 所示配电网为例，假定以母线 A 为供电端时的功率流出方向为网络正方向，则存在分别以顶点 1 和 2 为始点和末点的弧(1, 2)。故障发生后，当 FTU 采集的负荷与网络正方向相同(反)时，则上报正(负)的负荷值。为解决 1.2 节所述问题，提出一些新的概念并对原有的某些术语进行重新定义。



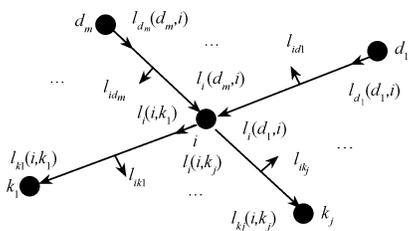
注：→ 实际的负荷方向； ( ) 内为流经各开关的负荷

图 3 含有特殊接线开关的多电源并列供电配电网  
Fig. 3 A multi-source distribution network with special switches

定义 1: 顶点对弧的负荷即弧 $(i, k_j)$ (或弧 $(d_m, i)$ )上流出(入)顶点  $i$  的负荷，如图 4 所示。若该负荷的实际方向与弧的假定正方向相同，则顶点  $i$  对该弧的负荷  $l_i(i, k_j) > 0$  ( $l_i(d_m, i) > 0$ )，反之  $l_i(i, k_j) < 0$  ( $l_i(d_m, i) < 0$ )。顶点对弧的负荷实际表征了顶点对弧的供电能力。

由图 4 可知，对任意顶点，顶点对弧的负荷有如下关系

$$\sum_m l_i(d_m, i) = \sum_j l_i(i, k_j) \quad (4)$$



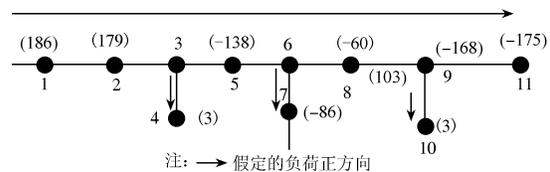
注：→ 假定的负荷正方向

图 4 顶点对弧的负荷及弧的负荷关系示意图  
Fig. 4 Relationship between vertex-to-arc load and arc load

式中： $d_m$  为假定正方向指向顶点  $i$  的弧的始点； $k_j$  为假定正方向离开顶点  $i$  的弧的末点。特别地，当顶点  $i$  的度数为 2 时，顶点  $i$  对 2 条弧 $(d_1, i)$ 和 $(i, k_1)$ 的负荷相等，即  $l_i(d_1, i) = l_i(i, k_1)$ 。

定义 2: 耦合点是因没有对应开关和 FTU 而使状态(顶点对弧的负荷)不可获取的顶点。耦合点不一定是 T 接点，T 接点也不一定是耦合点。以图 3 为例，若开关 2 处负荷信息不可获取，则其为耦合点；而对于开关 9，由于其对应一个特殊开关，该顶点对与其关联的弧的负荷均可获取，因此顶点 9 不是耦合点。

图 3 中配电网对应的耗散网络如图 5 所示。其中，顶点 1 对弧(1,2)的负荷为 186；顶点 3 处没有开关，为耦合点，顶点 3 对相关弧的负荷不能确定；顶点 9 为特殊开关，其对弧(9,10)的负荷为  $l_9(9,10) = 103$ ，对弧(9,11)的负荷为  $l_9(9,11) = -168$ ，由式(4)可知顶点 9 对弧(8,9)的负荷为  $l_9(8,9) = l_9(9,11) + l_9(9,10) = (-168) + 103 = -65$ 。由上述过程可知，顶点负荷的概念不能表征顶点 9 处的负荷信息，而顶点对弧的负荷更能准确地描述 FTU 采集的负荷信息。



注：→ 假定的负荷正方向

图 5 图 3 所示电网对应的变结构耗散网络模型  
Fig. 5 Variable-structure dissipated network model for the distribution network in Fig. 3

定义 3: 如果一个区域的所有端点都是开关并且没有内点，或者所有内点都是耦合点，则称该区域为最小配电区域<sup>[12]</sup>。最小配电区域实际上是故障隔离的最小范围。

定义 4: 以顶点  $i$  为始点，顶点  $k_1, \dots, k_N$  为末点的最小配电区域的负荷  $l(i, k_1, \dots, k_N)$  定义为区域  $P$  内的供电负荷。类似地，区域额定负荷定义为最小配电区域内的额定供电负荷。

在实际故障定位过程中，非耦合点对弧的负荷信息均可获取，由图 4 可知，区域负荷即为该区域始点对区域内弧的负荷与区域末点对区域内弧的负荷之差。又各条弧的额定供电负荷已知，区域额定负荷即为区域内各条弧的额定负荷之和。例如，若  $o$  点的负荷信息未知，图 1(b)(c)都是最小配电区域，其对应的区域负荷分别为  $l(i, j) = l_i(i, j) - l_j(i, j)$ ，

$$l(i, k_1, L, k_N) = l_i(i, o) - \sum_{k \in a} l_o(o, k)。$$

将区域负荷进行归一化处理, 则有

$$l_n(i, k_1, L, k_N) = \frac{100l(i, k_1, L, k_N)}{R(i, k_1, L, k_N)} \quad (5)$$

式中:  $l(i, k_1, \dots, k_N)$  为最小配电区域  $P$  的负荷;  $R(i, k_1, \dots, k_N)$  为  $P$  的额定负荷。若  $l_n(i, k_1, \dots, k_N)$  大于 100, 则称区域  $P$  为过热区域(即故障区域)。

### 3 算法的实现

#### 3.1 基本流程

算法的实现流程如图 6 所示, 其中过热区域识别的 3 个步骤在实际操作时归结为分离最小配电区域和过热区域识别 2 个步骤。

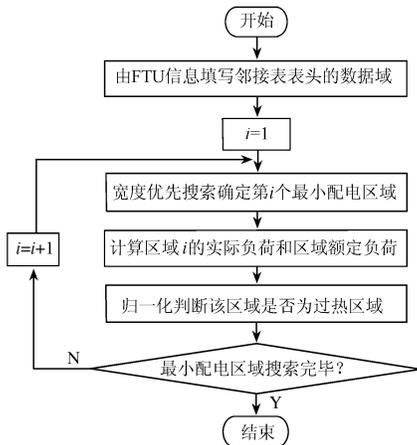


图 6 故障定位流程

Fig. 6 Flow chart of the fault location method

#### (1) 分离最小配电区域。

为便于后续操作且节省存储空间, 采用邻接表的形式存储映射后的有向图。依次以各非耦合点为始点, 执行宽度优先搜索, 直至搜索到的末端均为开关顶点。由于配电网中环路极少, 因此宽度优先搜索方法的适应性好, 效率较高。

以图 3 为例, 假设各条弧的额定负荷均为 10。首先以顶点 1 为始点搜索到顶点 2, 由于顶点 2 为开关顶点, 以顶点 1 为始点的最小配电区域搜索完毕, 区域额定负荷为  $R(1,2)=10$ 。然后以顶点 2 为始点搜索到顶点 3, 由于顶点 3 为耦合点, 因此继续搜索到开关顶点 4 和 5, 以顶点 2 为始点的最小配电区域搜索完毕, 区域额定负荷为  $R(2,4,5)=10+10+10=30$ 。顶点 3 为耦合点, 因此不以其为始点搜索。最后以顶点 8 为始点搜索到顶点 9, 由于顶点 9 为开关顶点, 以顶点 8 为始点的最小配电区域搜索完毕, 区域额定负荷为  $R(8,9)=10$ 。表 1 为最终的最

表 1 最小配电区域及对应区域负荷

Tab. 1 Minimum distribution region and the corresponding regional load

区域端点	弧段数	区域负荷	区域额定负荷
1, 2	1	186-179=7	10
2, 4, 5	3	179-(-138)-3=314	30
5, 7, 8	3	(-138)-(-60)-(-86)=8	30
8, 9	1	(-60)-(-65)=5	10
9, 10	1	103-3=100	10
9, 11	1	(-168)-(-175)=7	10

小配电区域搜索结果。

#### (2) 过热区域识别。

在以上搜索过程中, 区域额定负荷已经计算完毕。对于每个最小配电区域, 根据其端点信息计算对应的区域负荷, 详细计算过程见表 1。然后, 由式(5)计算各最小配电区域的归一化负荷, 将过热区域列为故障区域即可。仍以图 5 为例, 以顶点 2、4 和 5 为端点的区域归一化负荷为

$$l_n(2, 4, 5) = \frac{100l(2, 4, 5)}{R(2, 4, 5)} = \frac{100 \times 314}{30} = 1046.7 \quad (6)$$

可见该区域为过热区域, 同理可得  $l_n(9, 10)=1000$ , 可知以顶点 2、4 和 5 为端点的区域内故障更严重, 需要优先处理。

由此可见, 基于过热区域搜索的配电网故障定位方法步骤简单, 可直接处理含有图 2(a)所示特殊开关的多电源供电配电网而不需作任何转化。当配电网中含有图 2(b)所示特殊开关时也可以进行类似处理。通常这类特殊开关中仅有 2 处配置 FTU, 而另一处的负荷信息可以通过式(4)得到。

#### 3.2 对不完备故障信息情况的处理

由以上故障定位流程可知, 如果可确定某区域内发生故障, 令另一包含该区域的馈线区域的始点为  $i$ , 末点集合为  $K$ , 若忽略  $i$  和  $K$  之间的所有顶点仍按上述步骤进行判定, 则以  $i$  和  $K$  为端点的区域亦满足过热区域条件, 故障区域不会因为缺失某顶点的负荷信息而被覆盖掉。例如, 图 5 中以 1、3 为端点的区域包含以 2、3 为端点的区域, 以 2、4 和 5 为端点的区域包含以 3、5 为端点的区域(以 2、5 为端点因中间含有支接线而不构成区域)。因此, 当某些顶点处没有配置 FTU 或因 FTU 故障而不能得到该顶点信息, 或者该点过流信息由于通信原因畸变为不确定信号时, 过热区域搜索过程将这些顶点当作耦合点即可, 上述故障定位方法仍然适用。例如, 图 5 中, 故障发生在顶点 2、4 和 5 之间, 但顶点 2 的信息不确定, 则将其看作耦合点, 此时

以顶点 1、4 和 5 为端点的区域为最小配电区域，且区域额定负荷  $R(1,4,5)=40$ ，区域负荷  $I(1,4,5)=I_1(1,2)-I_4(3,4)-I_5(3,5)=186-(-138)-3=321$ ，最终可判定故障发生在顶点 1、4 和 5 之间。

#### 4 结论

(1) 与传统的过热弧搜索方法相比，本文所提方法的最小配电区域分离过程简单，占用的存储空间小。

(2) 对含支接点的区域避免了多次重复判定过程，配电网中的多种特殊接线开关可以不加转换而直接应用本方法。

(3) 本文方法可适用于故障信息不完备时的多电源并列供电配电网的故障定位，并且可精确衡量故障的程度。在多重故障同时发生时，可以选择优先处理更加严重的故障，以满足配电网故障隔离的实际要求。

#### 参考文献

- [1] Peng J T, Chien C F, Tseng T L B. Rough set theory for data mining for fault diagnosis on distribution feeder[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(6): 689-697.
- [2] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73-77.  
Shu Hongchun, Sun Xiangfei, Si Dajun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73-77(in Chinese).
- [3] 费军, 单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 32-34.  
Fei Jun, Shan Yuanda. Study of automatic fault location system in the distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 32-34(in Chinese).
- [4] Butler K L, Momoh J A, Sobajic D J. Field studies using a neural-net-based approach for fault diagnosis in distribution networks[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 429-436.
- [5] 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.  
Du Hongwei, Sun Yaming, Liu Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55(in Chinese).
- [6] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.  
Wang Yingying, Luo Yi, Tu Guangyu. Fault location based on Bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57(in Chinese).
- [7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.  
Wei Zhinong, He Hua, Zheng Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130(in Chinese).
- [8] 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): 31-33.  
Liu Jian, Ni Jianli, Du Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33(in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.  
Mei Nian, Shi Dongyuan, Yang Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70(in Chinese).
- [12] 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.
- [13] 江道灼, 张锋, 张怡. 基于配电监控终端的配网故障区域判断和隔离[J]. 继电器, 2002, 30(9): 21-24.  
Jiang Daozhuo, Zhang Feng, Zhang Yi. Fault sections detection and isolation in distribution system based on FTU[J]. Relay, 2002, 30(9): 21-24(in Chinese).
- [14] 张锋, 江道灼, 张怡. 基于变结构耗散网络的特殊配电网接线故障恢复的改进算法[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 49-53.  
Zhang Feng, Jiang Daozhuo, Zhang Yi. An improved algorithm special distribution network connection service restoration based on variable structure dissipated net theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 49-53(in Chinese).
- [15] 范明天, 张祖平, 岳宗斌. 配电网规划与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

收稿日期: 2007-11-26.

作者简介:

梅念(1982—), 女, 博士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电力系统继电保护及电力系统故障诊断, E-mail: [meinn@126.com](mailto:meinn@126.com);

石东源(1974—), 男, 副教授, 研究方向为信息化电力系统相关理论及支撑软件技术;

段献忠(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电压稳定、FACTS、信息化电力系统、网络化控制等方面的研究工作。

(编辑 李兰欣)