

# 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法

张海波<sup>1</sup>, 张晓云<sup>1</sup>, 陶文伟<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206; 2. 深圳供电局, 广东省 深圳市 518001)

## A Breadth-First Search Based Service Restoration Algorithm for Distribution Network

ZHANG Hai-bo<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-yun<sup>1</sup>, TAO Wen-wei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518001, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** Taking active load as the fundamental to draw up initial service restoration scheme, by means of judging the relation between total reserve capacity of bus-tie circuit breakers and total load in power interruption region whether the load connected to the second supporting feeders should be shifted in advance is determined to enlarge the range of service restoration. Using breadth-first search algorithm that adopts the restoration of active load as the fundament for the design of initial restoration scheme, the power supply for the non-faulty interrupted region can be restored uniformly while the power supply path will not be too long. Leading in the concept of reserve capacity correction factor, the service restoration scheme can be automatically modified according to the overload condition of voltage or current. Analysis of case study verifies the feasibility of the proposed algorithm.

**KEY WORDS:** distribution network; service restoration; breadth-first search; adjacent list; reserve capacity correction factor

**摘要:** 采用有功负荷作为制定初始恢复方案的依据, 通过判断联络开关总备用容量与失电区总负荷的关系, 确定是否需要提前转移二级支持馈线的负荷, 以便扩大恢复供电的范围。采用广度优先搜索方法可使非故障失电区均匀恢复供电, 且供电路径不会过长。引入了备用容量修正系数的概念, 可根据电压(电流)过载情况, 自动修正恢复方案。算例分析验证了该算法的可行性。

**关键词:** 配电网; 故障恢复; 广度优先搜索; 邻接表; 备用容量修正系数

## 0 引言

故障恢复的目标是在允许的操作条件和电气约束下, 尽可能多地恢复非故障失电区的供电。实

际上, 故障恢复<sup>[1-3]</sup>问题属于 NP 难问题, 最终得到的解是一系列开关刀闸的动作组合。目前, 已有很多文献对该问题进行了讨论。文献[4]将故障类型和相应的恢复策略转化为专家系统知识库中的产生式规则, 建立了故障恢复专家系统; 文献[5]首次提出了建立分阶段的配电网负荷的二次规划模型, 并运用二次规划法对故障恢复问题进行递归求解; 文献[6-7]研究了遗传算法在电力系统故障恢复中的应用; 文献[8]将遗传算法同专家系统相结合, 提出了高压配电网的故障恢复方法; 文献[9]将各种约束按照人类专家思想模糊化, 并应用模糊推理进行故障恢复; 文献[10]将神经网络应用到故障恢复中; 文献[11-12]提出了一种将 Petri 网应用于故障恢复的方法; 文献[13-15]采用了启发式方法, 利用启发式规则定义专门的运行标准, 并用以检验可能的解, 其中文献[16]把故障恢复问题转化为待恢复树切割问题, 降低了问题的复杂度, 但恢复搜索属于深度优先搜索, 联络开关顺序的不同将导致多种恢复策略, 且最终结果不一定为最优策略。上述方法各有优缺点, 但对实际系统来说, 启发式搜索往往可以获得较好的效果。

为满足配电网故障恢复实用化的要求, 本文将提出一种以有功分配为基础的启发式配电网故障恢复算法, 该算法通过广度优先搜索方法可使非故障失电区均匀恢复供电。

## 1 供电恢复的目标与约束条件

配电网故障恢复的目标有很多, 本文选择的恢复目标有: 1) 尽可能多地恢复负荷供电; 2) 没有过载现象; 3) 开关操作次数尽可能少; 4) 馈线负荷分配尽可能均衡。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50807014)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50807014).

配电网恢复供电需考虑的约束条件<sup>[15,17-22]</sup>有：

1) 满足系统潮流约束。

$$\dot{U}_i \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij}^* \dot{U}_j^* = P_i + jQ_i \quad (1)$$

式中： $P_i + jQ_i$  为节点  $i$  的注入功率； $\dot{U}_i$ 、 $\dot{U}_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压； $\mathbf{Y}_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间的互导纳。

2) 满足支路容量限制。

$$|P_k| \leq P_{k \max} \quad (2)$$

式中： $P_k$  为流过支路  $k$  的有功功率，MW； $P_{k \max}$  为支路  $k$  的最大有功传输容量，MW。

3) 满足可用供电容量限制。

$$\sum_{r=1}^m x_r P_r \leq G_q, \quad q \in S \quad (3)$$

式中： $P_r$  为流过支路  $r$  的有功功率； $x_r$  为 0-1 变量， $x_r = 1$  表示恢复路径包含支路  $r$ ， $x_r = 0$  表示恢复路径不包含支路  $r$ ； $G_q$  为从带电母线  $q$  获得的恢复功率； $S$  为与失电区域相连的带电母线的集合。

4) 满足辐射状供电限制。

$$g \in G_R \quad (4)$$

式中： $g$  为已恢复供电的区域，需满足辐射状拓扑结构； $G_R$  为保证网络辐射状拓扑结构的集合。

## 2 算法的实现

### 2.1 概述

采用文献[16]的定义，称通过联络开关与失电区域直接相连的馈线为一级支持馈线；称不直接与失电区域相连，但与一级支持馈线相连的馈线为二级支持馈线。图 1 为平安站 220 kV 母线故障恢复前网络，接于西乡站和公明站的馈线都是一级支持馈线，接于育新站的馈线为二级支持馈线。TS、SS 分别代表联络开关和分段开关，其中 TS<sub>5-6</sub>、TS<sub>14-18</sub> 分别为一级和二级联络开关。

$K_1$  为一级联络开关备用容量修正系数， $K_2$  为二级联络开关备用容量修正系数。 $K_1$  和  $K_2$  的取值区间为(0,1)。 $K_1$ 、 $K_2$  的初值可根据恢复供电后对联络开关备用裕度的要求来取值，一般情况下，联络开关不同， $K_1$ 、 $K_2$  的初值也不同。图 1 中，对 TS<sub>5-6</sub>、TS<sub>6-12</sub>、TS<sub>14-18</sub>，各修正系数的初值分别为 98%、95%、70%。

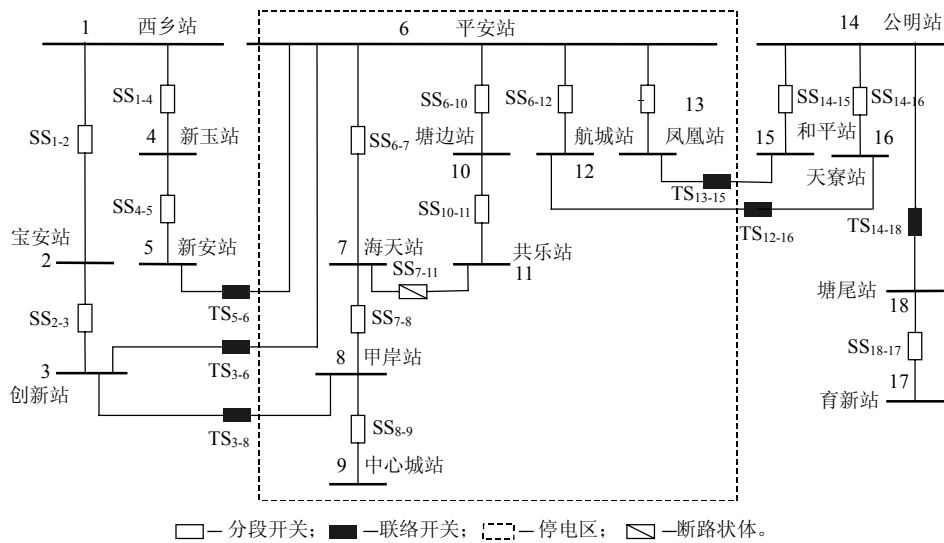


图 1 深圳平安站 220 kV 母线故障时网络

Fig. 1 The network of Ping'an station in Shenzhen after 220 kV bus fault

算法流程见图 2。首先比较总有功失电负荷  $P_{Loss}$  和  $\sum_{i=1}^n K_{li} P_{Mi}$  (失电区域相连的所有联络开关备用容量  $P_{Mi}$  与其修正系数  $K_{li}$  的乘积之和)，若前者大于后者，需先转移二级支持馈线负荷，然后根据联络开关的修正后备用容量，按照广度优先搜索方法对失电区分组恢复供电。算法的主要步骤为：

1) 估算联络开关备用容量，建立失电区邻接

表，确定初始的联络开关备用容量修正系数。

2) 修正邻接表。

3) 转移二级支持馈线负荷，扩大联络开关备用容量。

4) 根据联络开关备用容量，按照广度优先搜索方法对失电区分组恢复供电。

5) 当负荷转移后，若失电总负荷仍然大于联络开关备用容量或失电区恢复供电后仍有未供电

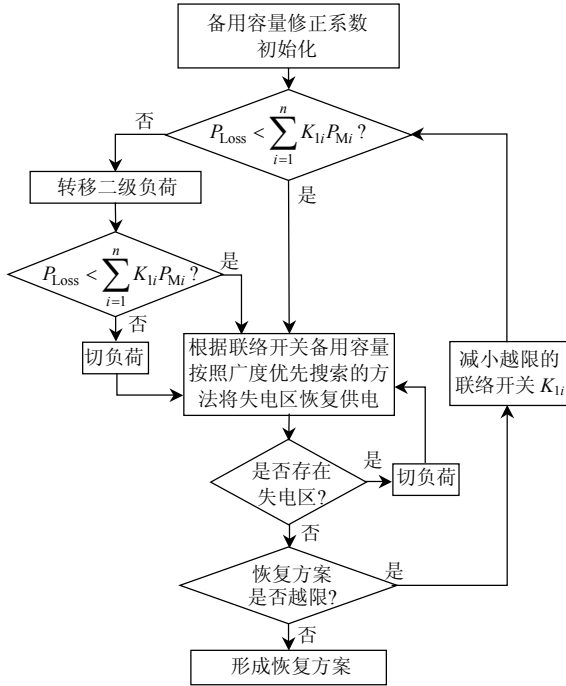


图2 算法流程  
Fig. 2 Flowchart of the algorithm

负荷，需考虑切负荷来满足系统安全约束。

6) 校验恢复方案，若出现电压(电流)越限情况，则减小对应联络开关备用容量的修正系数，重新制定恢复方案。

### 2.2 估算联络开关备用容量并建立失电区邻接表

1) 估算联络开关的有功备用容量  $P_M$ 。

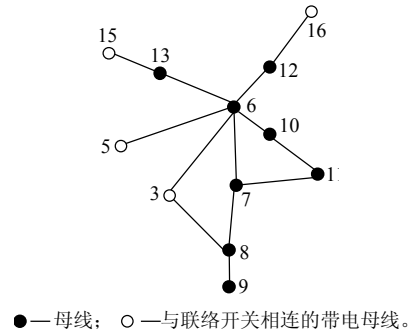
由联络开关开始向电源点搜索，形成联络开关到支持馈线的路径，并加以记录。设在此路径上有  $n$  条支路，则

$$I_M = \min(I_i^m - I_i), P_M = U_{av} I_M \cos \theta \quad (5)$$

式中： $I_i^m$  为支路  $i$  的最大允许电流； $I_i$  为支路  $i$  的电流； $U_{av}$  为平均额定电压； $\cos \theta$  为平均功率因数； $P_M$  为联络开关的有功备用容量。各联络开关的有功备用容量确定后，将所有与失电区相连的联络开关按照有功备用容量的大小进行排序。

2) 建立失电区邻接表。

在非故障失电区，将母线看作节点  $n_i$  (所带负荷为  $P_i$ )，将分段开关作为边，将线路功率上限作为权  $\omega$ ，建立配电网简化模型，并采用邻接表的数据结构进行存储，其中度用变量  $D_i$  表示。将与备用容量最大的联络开关相连的母线作为邻接表的起始节点，建立邻接表。图3为图1所对应非故障失电区的网络结构及其邻接表，节点16、15、5和3为与联络开关相连的有电区母线。



(a) 网络结构

1	0	$n_{16}$	1	1	2	3	4	5	6	7	9
2	1	$n_{12}$	0	2	3	4	5	6	7	9	
6	2	$n_6$	1	3	4	5	6	7	9		
2	3	$n_{13}$	2	4	5	6	7	9			
1	4	$n_{15}$	3	5	6	7	9				
1	5	$n_5$	2	6	7	9					
2	6	$n_3$	2	7	9						
2	7	$n_{10}$	2	8	9						
2	8	$n_{11}$	7	9							
3	9	$n_7$	2	10	11						
3	10	$n_8$	6	11							
1	11	$n_9$	10								

(b) 邻接表

图3 非故障失电区的网络结构及其邻接表

Fig. 3 The network configuration of out-of-service area and its adjacency list

### 2.3 修正邻接表

从与具有备用容量的联络开关相连的有电区母线开始，向起始节点方向回溯，当遍历完所有节点还有母线未被访问时，将这些母线对应的分段开关视为不能开断的开关<sup>[16]</sup>，如图1中的  $SS_{8-9}$ ，打开这类开关会导致它的下游负荷无法恢复供电。

若失电区域存在这种不能开断的开关，为防止打开这类开关，可以采用剪枝法将不能开断开关的下游负荷转移到与之相邻的母线上，具体步骤为：首先从度为1 ( $D_i=1$ ) 的带负荷的叶子节点  $n_i$  (除去与TS相连的带电母线) 开始，访问相邻节点  $n_j$ ，将节点  $n_i$  的负荷  $P_i$  转移到节点  $n_j$  上，即  $P'_j = P_i + P_j$  ( $P_i$  为节点  $n_i$  的负荷， $P'_j$ 、 $P_j$  分别为转移前后节点  $n_j$  的负荷)；然后将  $n_i$  从邻接表中删除，并将  $n_j$  的度减1，若修正后  $n_j$  的度不为1 (即  $D'_j = D_j - 1 \neq 1$ ， $D_j$ 、 $D'_j$  分别为修正前后节点  $n_j$  的度)，则寻找下一个需要转移的节点；当所有带负荷的度为1的母线均转移完毕时，停止运算。具体流程如图4所示。

### 2.4 转移负荷

由2.1节可知，若  $P_{Loss} > \sum_{i=1}^n K_{li} P_{Mi}$ ，则需要先

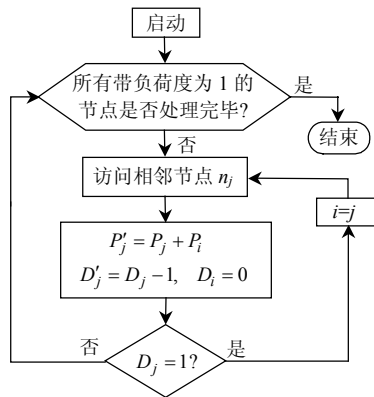


图4 邻接表的修正

Fig. 4 Modification of adjacency list

转移二级负荷，以提高一级联络开关的备用容量。具体步骤为：

1) 由二级联络开关开始，查找一级联络开关，若形成路径中包括决定一级联络开关备用容量的支路，则此二级联络开关不能用于负荷转移(如图1中的  $TS_{14-18}$ ，不能通过转移负荷来提高其备用容量)，并寻找下一个二级联络开关；若不包括决定一级联络开关备用容量的支路，则转到步骤2)。

2) 求二级联络开关的备用容量  $P_{M2}$ 。

3) 由二级联络开关所在馈线上所有的联络开关开始，向二级馈线方向回溯，若存在不能断开的开关，则按照2.3节修正邻接表。

4) 由二级联络开关开始，根据  $K_2 P_{M2}$  大小，向二级馈线方向查找需要断开的分段开关。若查到度大于2的节点，则停止该二级联络开关的查找，将该节点前的分段开关断开，并寻找下一个二级联络开关。

5) 负荷转移完成后，进行一次潮流计算。如果没有电压(电流)越限情况发生，则重新计算一级联络开关的备用容量，否则减小越限区域对应联络开关  $P_2$  的值，重新确定二级负荷转移方案。

如果转移负荷后， $\sum_{i=1}^n K_{li} P_{M,i}$  仍然小于总失电负荷，则按照切负荷的基本原则进行切负荷。

## 2.5 失电区分组恢复供电

为使失电区分组恢复供电，恢复供电路径应尽可能短，馈线的负荷分配应尽可能均衡，本文从所有一级联络开关开始，按广度优先策略进行搜索，且搜索过程中要遵循以下几个原则：

1) 优先访问度为1的节点。

2) 优先访问备用容量大的联络开关所对应的节点。

3) 若访问到已访问过的节点，则将其前面的分段开关SS断开或者保持节点间的联络开关TS为断开状态。

4) 每访问一次节点，应判断该分支的备用容量是否大于该节点负荷。若大于，则表明被访问节点的负荷可由该分支供电，该分支的备用容量要修正一次，修正后备用容量为修正前备用容量与访问节点所带负荷之差，将上层节点从邻接表中删除，并将此节点标注为已访问节点；否则，断开该节点前的分段开关或者保持联络开关为断开状态。

5) 每访问一个新节点后，都要修正上游树枝的边权，即  $\omega'_i = \omega_i - P_i$ ，( $\omega_i$ 、 $\omega'_i$  分别为修正前后访问节点  $i$  的上游树枝的功率上限)，若上游树枝出现权值小于0的情况，则该分支停止恢复负荷，断开节点  $i$  前的分段开关，节点  $i$  不标注。

失电区分组恢复供电的具体方法为：

1) 按照原则1)~2)对与联络开关相连的有电区母线节点进行排序，并将它们标记为已访问节点，依次以这些节点为顶点，访问未被访问的各顶点的邻接点，按照原则4)修正备用容量，按照原则5)修正上游树枝的权值；

2) 访问完某一层时，对该层的节点按照原则1)~2)排序，再以它们为顶点访问未被访问的邻接点，修正备用容量，修正上游树枝的权值；

3) 遇到已访问节点，按照原则3)进行操作；

4) 若备用容量不足，按照原则4)进行操作；

5) 若上游树枝出现权值小于0的情况，按照原则5)进行操作。

若分组完成后仍然有未恢复供电的区域，则只能考虑切除失电区的一部分负荷，再重新分组。若全部恢复供电，则对其潮流进行计算，判断是否越限，若存在越限情况，则减小越限区域对应联络开关的  $K_1$  值，并重复上述过程。

## 2.6 切负荷

当负荷转移后，若失电总负荷仍然大于联络开关的备用容量或失电区分组恢复供电后仍有未供电负荷，则需考虑切负荷以满足系统安全约束。

对于前者应考虑切除失电区中心部位的负荷，若此区域用户已定义过负荷重要性，则按照失电总负荷与联络开关备用容量的差值切除普通负荷，否则切除该区域末端负荷。

对于失电区分组恢复供电后仍存在失电负荷的情况，本文做如下处理：

1) 确定切除基值, 取与失电负荷电气距离较近且剩余备用容量较大的分支的备用容量, 以未恢复负荷与此备用容量的差作为切除基值。

2) 若用户已定义负荷重要性, 则按照重要性程度进行排队, 根据切除基值先切除普通负荷, 再切除与联络开关电气距离较远的一部分重要负荷。

3) 若用户对负荷重要性没有定义, 则切除未恢复供电区域路径的末端负荷。

### 3 算例分析

以图1故障为例, 说明故障恢复过程。故障隔离后的下游支路构成了停电区域, 非故障失电区负荷情况见表1, 联络开关的相关信息见表2。

表1 失电区负荷  
Tab. 1 Loads of outage area

节点	6	7	8	9	10	11	12	13
负荷/MW	10.00	33.32	1.32	1.00	0.00	58.34	121.10	105.26

表2 联络开关信息  
Tab. 2 Parameters of two-terminal HVDC system

序号 <i>i</i>	相邻母线节点	TS	$P_{M_i}/MW$	$K_{I_i}/\%$
1	16	TS <sub>16-12</sub>	219	95
2	15	TS <sub>15-13</sub>	44	98
3	5	TS <sub>5-6</sub>	66	98
4	3	TS <sub>3-6</sub> /TS <sub>3-8</sub>	83	95

由表1可知, 非故障失电区总的有功失电负荷为330.34 MW。由表2可知, 联络开关总备用容量为394.7 MW。前者小于后者, 故不需要转移二级负荷。分段开关SS<sub>8,9</sub>为不能开断开关, 对邻接表进行修正, 将 $n_9$ (中心城站)的负荷转移到 $n_8$ (甲岸站), 并将 $n_9$ 在邻接表中删除, 则转移后 $n_8$ 所带负荷为2.32 MW。

以 $n_{16}$ (田寮站)、 $n_{15}$ (和平站)、 $n_5$ (新安站)和 $n_3$ (创新站)为顶点, 按照搜索原则1)~2)确定其访问顺序为: $n_{16}, n_{15}, n_5, n_3$ , 依次访问各顶点未被访问的邻接点。具体过程为:

1)  $n_{16}$ 访问其邻接点 $n_{12}$ 。按照搜索原则4), 经判断 $P_{M1}K_{11} > P_{12}$ , 则修正该分支的备用容量, 修正后备用容量为修正前备用容量与 $n_{12}$ 所带负荷之差, 并将节点 $n_{16}$ 从邻接表中删除, 节点 $n_{12}$ 标注为已访问过节点, 按照原则5)对支路边权做同样的操作。

2)  $n_{15}$ 访问 $n_{13}$ 。因 $P_{M2}K_{12} < P_{13}$ , 故 $n_{13}$ 不能由 $n_{15}$ 恢复供电, 保持联络开关TS<sub>15-13</sub>为断开状态, 此支路访问结束。

3)  $n_5$ 访问 $n_6$ , 操作同 $n_{16}$ 。

4) 当 $n_3$ 访问其邻接点时, 由于 $n_6$ 已被 $n_5$ 访问, 根据原则3)不能闭合联络开关TS<sub>3-6</sub>, 则继续访问 $n_8$ , 操作同 $n_{16}$ 。

再以 $n_{12}$ (航城站),  $n_6$ (平安站),  $n_8$ (甲岸站)为顶点, 按照搜索原则1)~2)确定其访问顺序为: $n_{12}, n_8, n_6$ , 访问未被访问的邻接点, 操作同上, 依次类推, 直至所有节点都被访问。

访问结束后,  $n_{13}$ (凤凰站)失电, 切除其非重要负荷, 重新分组恢复供电。最终恢复策略见表3。

表3 恢复策略  
Tab. 3 Restoration strategies

恢复策略		失负荷情况	越限情况
合上	断开		
TS <sub>16-12</sub>	SS <sub>6-12</sub>	$n_{13}$ 切除60%负荷	无
TS <sub>15-13</sub>	SS <sub>6-13</sub>		
TS <sub>5-6</sub>	SS <sub>6-7</sub>		
TS <sub>3-8</sub>	SS <sub>7-11</sub>		

### 4 结论

本文提出了一种简单实用的配电网故障恢复算法, 该算法采用有功负荷作为制定初始恢复方案的依据, 简化了分析过程, 使问题表述更加直观, 降低了问题复杂度。当配电网具备潮流计算的条件时, 可根据潮流计算结果进行校验, 保证了恢复方案的可行性; 当出现设备电压或电流越限时, 可调整备用容量修正系数来修正恢复方案以消除越限。该算法在制定恢复供电方案时, 只需记录初始有功负荷和线路传输功率极限值, 并能初步排除线路功率越限的可能, 同时以广度优先搜索方法构成的恢复树较矮, 不易出现恢复后节点电压过低的情况, 因此, 在一些无法进行配电网在线潮流计算和校验的场合, 该算法仍能适用。

#### 致谢

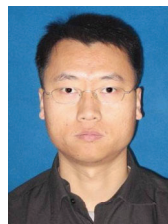
本文工作得到电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放课题(SKLD09KM08)资助, 在此表示衷心感谢!

### 参考文献

[1] 刘健, 徐精求, 程红丽. 紧急状态下配电网大面积断电快速恢复算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 132-138.  
Liu Jian, Xu Jingqiu, Cheng Hongli. Algorithms on fast restoration of large area breakdown of distribution systems under emergency states[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132-138(in Chinese).

[2] 刘明慧, 张东英, 邹品元, 等. 能在线应用的地区电网故障恢复系统[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 35-40.  
Liu Minghui, Zhang Dongying, Zou Pinyuan, et al. Regional network fault restoration system applied in on-line mode[J]. Power System

- Technology, 2006, 30(18): 35-40(in Chinese).
- [3] 胡键, 郭志忠, 刘迎春, 等. 故障恢复问题和发电机恢复排序分析[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 1-4.  
Hu Jian, Guo Zhizhong, Liu Yingchun, et al. Power system restoration and analysis of restoration sequence of generating sets[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 1-4(in Chinese).
- [4] Fukui S. A knowledge based method for making restoration plan of bulk power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 914-920.
- [5] Aoki K, Ichimori T. Nomal state optimal load allocation in distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 12(1): 147-155.
- [6] Luan W P, Irving M R, Daniel J S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145-151.
- [7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.  
Liu Li, Chen Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69(in Chinese).
- [8] Shen Siqing, Sun Youjiang, Yang Yihan, et al. Integrating genetic algorithm with expert system for service restoration in distribution system[C]. 1998 International Conference on Power System Technology, Beijing, China, 1998.
- [9] Hsu Yuanyih, Kuo Hanching. A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 948-953.
- [10] Jung K H, Kim H, Ko Y. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1356-1366.
- [11] Wu Jawshyang. A petri-net algorithm for multiple contingencies of distribution system operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 1164-1171.
- [12] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 23-28.  
Ma Qian, Yang Yihan, Liu Wenying, et al. Method of power system restoration based on object-oriented Petri-net technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 23-28(in Chinese).
- [13] 汤亚芳, 陈曦, 程浩忠. 基于协同进化算法的配电网故障阶段式恢复策略[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 71-75.  
Tang Yafang, Chen Xi, Cheng Haozhong. A phased fault restoration algorithm for distribution system based on co-evolutionary algorithm of PSO and SA[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 71-75(in Chinese).
- [14] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 82-86.  
Wu Jianzhong, Yu Yixin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 82-86(in Chinese).
- [15] 郑兰, 别朝红, 王秀丽. 一种快速启发式配电网故障恢复算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 16-19.  
Zheng Lan, Bie Zhaohong, Wang Xiuli. A fast heuristic service restoration method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 16-19(in Chinese).
- [16] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-53.  
Wu Wenchuan, Zhang Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-53(in Chinese).
- [17] 乐秀璠, 杨成峰, 徐青山. 配电网故障恢复及负荷平衡的重构算法研究[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 34-37.  
Le Xiufan, Yang Chengfeng, Xu Qingshan. A distribution network reconfiguration algorithm for service restoration after faults and load balance[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 34-37(in Chinese).
- [18] 赵冬梅, 郑朝明, 高曙. 配电网的供电优化恢复策略[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 67-71.  
Zhao Dongmei, Zheng Chaoming, Gao Shu. Optimal service restoration strategy of distribution network[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 67-71(in Chinese).
- [19] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-56.  
Zhang Zhao, Feng Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-56(in Chinese).
- [20] Nagata T, Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 457-462.
- [21] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.  
Li Haifeng, Zhang Yao, Qian Guoji, et al. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-37(in Chinese).
- [22] 张海波, 张晓云, 张莉, 等. 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 24 届学术年会, 北京, 2008.



张海波

收稿日期: 2009-12-11。

作者简介:

张海波(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统调度自动化与电力系统仿真分析与计算, E-mail: zhb@ncepu.edu.cn;

张晓云(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能调度与分布式计算, Email: zhangxyncepu@yahoo.com。

(编辑 徐梅)