

文章编号:1000-582X(2010)05-078-05

# 基于启发式搜索和模糊评价算法的配电网故障恢复

周永勇,周 涑,刘育明,杨柱石,孙才新,代 姚

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**为快速恢复非故障失电区的供电,提出了一种基于启发式搜索和模糊评价的配电网故障后多目标快速供电恢复算法。算法首先从寻找有效的联络开关和分段开关开始搜索供电路径,通过潮流计算剔除不符合系统运行约束的开关组合。将恢复步骤分为自馈线恢复、整区恢复、分区恢复、转移负荷恢复和切负荷恢复,考虑了开关操作次数和用户优先级别,得出初始供电恢复方案。然后,引入模糊评价,从最少开关操作次数、负荷转移量、馈线容量裕度和最大电压降 4 个方面衡量候选方案,并根据实际情况为其赋予不同的权重,通过加权值的大小选择最佳的供电方案作为最终的方案。最后,算例分析证明了所提恢复算法的可行性和高效性。

**关键词:**配电网;供电恢复;启发式搜索;模糊评价;多目标

**中图分类号:** TM732, TM727.2

**文献标志码:** A

## Heuristic research and fuzzy evaluation for-post-fault restoration in distribution networks

ZHOU Yong-yong, ZHOU Quan, LIU Yu-ming, YANG Zhu-shi, SUN Cai-xin, DAI Yao

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** A heuristic research and fuzzy evaluation fault restoration algorithm for distribution network is proposed to quickly restore power supply for the regions where power supply is interrupted. The algorithm searches power supply paths by finding effective tie-switches and sectionalizing switches, and eliminates improper switch pair according to power flow calculation. During service restoration process, the problem is divided into self-healing restoration, whole-region restoration, sub-region restoration, load-transfer restoration and load shedding restoration. The algorithm takes switch operation times and customer priority into account, and consequently, obtains initial feasible schemes. Fuzzy technique is used to evaluate the schemes from minimal switch operation times, load transfer, feeder margin and maximal voltage drop. Weighted sum of four indices provides a good guideline for choosing the optimal scheme for restoration operation. Calculation results of a certain distribution network show that this algorithm is feasible.

**Key words:** distribution system; service restoration; heuristic research; fuzzy evaluation; multi-objective

配电网故障恢复是在隔离故障设备后,依据当前网络拓扑及潮流分布,在满足相关约束的条件下,寻找最优的非故障失电区的恢复方案,并对配电网

进行重构的过程。因而,恢复供电的主要目标是寻找正确有效的停电恢复策略,其最终的解是一系列开关动作组合。针对这一大规模、多目标、非线性的

收稿日期:2009-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607023);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2006BB2189)

作者简介:周永勇(1972-),男,重庆大学博士研究生,主要从事电力系统运行与控制的研究,(E-mail)yymx417@sina.com。

组合优化问题,文献[1-2]根据专家的经验建立了求解供电恢复问题的专家系统,但由于配电网供电恢复问题的本质十分复杂,专家系统知识库的建立和维护比较困难。文献[3-6]采用遗传算法恢复供电,得到了供电恢复的最优解,但遗传算法的计算速度过慢,必须有效结合问题的特点,才能更好地发挥其优越性。文献[7]提出了利用图论知识<sup>[8]</sup>为每个负荷分别寻找最短供电路径,从而进一步在局部最优解中寻求全局最优解。该方法虽能取得全局最优解,但无法保证供电恢复的实时性。

启发式搜索方法<sup>[9]</sup>是寻找配电网可能供电恢复方案的典型算法,它将专家知识和经验转化为相应的处理规则,可大大减少供电恢复问题的搜索空间,迅速得出恢复方案。同时,基于模糊数学原理的模糊评价<sup>[10-11]</sup>,能够解除其他算法的死约束,如绝对不允许过载等,且能够针对多个目标选取相对最优的方案。因此,笔者提出采用启发式搜索策略得到问题的可行解,并引入模糊评判得出最佳的恢复供电方案,从而实现配电网故障后多目标快速供电恢复。

## 1 配电网故障恢复数学模型

故障恢复的数学模型<sup>[12]</sup>由恢复目标和约束条件组成,在实际中可根据不同的故障情况或恢复目的、侧重点形成对该问题的不同数学表述。笔者的目标函数考虑了失电负荷恢复最大化,最小开关操作次数,最小母线电压降以及最小馈线电流。约束条件包括辐射状网络约束,电源容量约束,节点电压约束,以及变压器、线路最大允许电流约束。限于篇幅,详细的目标函数及约束条件描述参见文献[13]。

从上可见供电恢复是一个多目标、非线性的组合优化问题,问题的规模随网络规模的扩大而增大。对于这个 NP 难问题,如果用穷举法寻找恢复方案就可能出现组合爆炸问题。启发式方法由于其快速、灵活、适应性良好,便于维护且能在较短的时间内给出多个供电恢复方案,同时融合了专业领域知识的启发式方法在搜索中避免了盲目搜索,能缩小搜索空间进而快速得到问题的解。因此,采用启发式搜索解决供电恢复这一问题。

## 2 启发式搜索算法

### 2.1 相关概念

供电恢复问题的主要思想就是如何寻找有效的开关,将失电负荷转移出去。在介绍故障恢复的启发式搜索方法之前,先解释3个主要概念<sup>[14-15]</sup>。

1) 联络开关的最大备用容量  $I_M$ 。在联络开关

与向其供电的电源之间的所有支路中,支路额定电流与实际电流之差的最小值。

2) 联络开关与发生电压越限的母线之间的电气距离  $Z_{path}$ 。该距离指联络开关与该母线之间的“阻抗”值,建立这一指标的目的在于,当恢复供电过程中某一母线发生电压越限时,可用这一指标对联络开关排序,选择闭合适当的联络开关来消除电压越限问题,定义为

$$Z_{path} = \frac{V_{ts}}{\sum_{C_p} I_L}, \quad (1)$$

式中: $C_p$ 为联络开关与产生电压越限的母线之间的所有母线集; $V_{ts}$ 为联络开关出口处电压; $I_L$ 为各母线所带的负荷值。

3) 分段开关的可转移负荷量  $I_{ss}$ 。对于每一个联络开关,分段开关的可转移负荷是指分段开关可向联络开关转移的负荷量,即该分段开关下游的所有负荷之和。

$$I_{ss} = \sum_{C_d} I_L, \quad (2)$$

由定义可知,按可转移电流量对有效分段开关排序时,可由拓扑搜索时的上下游关系确定。显然,在选取开关对时,只有那些冗余载流量大于有效分段开关的可转移流量的有效联络开关才予以考虑。

### 2.2 算法实现

#### 2.2.1 故障后网络初始化

形成所有的失电区域,统计各失电区域的重要用户负荷和失电总负荷,进行潮流计算,确定故障后的系统状态。

#### 2.2.2 自馈线恢复

在与停电区域相连的所有联络开关中,若存在与该停电区域原供电馈线相连的联络开关时,直接合上该联络开关利用原馈线恢复供电。否则,利用支持馈线为停电区域供电。

#### 2.2.3 用支持馈线恢复

按照初始化中对失电区域的排序,逐一对其进行处理。

##### 1) 整区恢复

首先搜索与停电区域相连的联络开关。在这一步中选择联络开关时,仅考虑直接与停电区域相连且备用容量大于零的联络开关;假定  $t_{s1}$  为备用容量最大的联络开关,将  $t_{s1}$  闭合,通过与  $t_{s1}$  相连的支持馈线向停电区域供电。由于该馈线增加了负荷,因此对其进行潮流计算。若无越限现象出现则表明整区恢复实现了停电区域的供电。若安全校验发现存

在电流越限(既包括仅存在电流越限,又包括电流越限、电压越限同时存在的情况),需将部分失电负荷转移到其他支持馈线上,以缓解或消除电流越限,算法进入步骤 2)。若只出现电压越限则转 3)。

### 2) 分区恢复

在停电区域的支持馈线中,对除  $t_{s1}$  外其余的联络开关用其最大备用容量排序,形成  $t_s$  列表。若选用  $t_s$  列表为空,则通过向下一级馈线转移负荷。选用其中备用容量最大的联络开关  $t_{sA}$  对停电区域的负荷进行转移,同时为了保持网络的辐射状结构需要打开某一分段开关,具体方法如下:

a. 计算位于  $t_{sA}$  与  $t_{s1}$  之间的路径上的各候选分段开关  $s_s$  的可转移负荷  $I_{ss}$ 。

b. 寻找满足  $I_{ss} < I_M$  且  $I_{ss}$  最大的分段开关  $SS_A$ , 记为  $SS_A$ , 如果所有  $I_{ss}$  均大于  $I_M$ , 则无法用该联络开关转移  $t_{s1}$  上的负荷。这时候应考虑  $t_s$  列表中的下一个联络开关。

c. 若存在  $SS_A$ , 则闭合  $t_{sA}$  并打开  $SS_A$ , 对  $t_{sA}$  所在的馈线进行潮流校验。如果出现安全越限, 则进入步骤 d, 否则进入步骤 e。

d. 将  $t_{sA}$  与  $SS_A$  下游的下一个  $SS$  组合为候选开关对。以这个新分段开关为对象, 返回步骤 c。重复步骤 c 和 d, 如果没有候选的分段开关, 则删除联络开关  $t_{sA}$ , 从  $t_s$  列表中选择下一联络开关, 以进一步缓解或消除电流越限, 返回步骤 a; 以此类推, 直到没有安全越限发生或没有与失电区相连的  $t_s$  为止。

e. 选择好与  $t_{sA}$  相应的  $SS_A$  后, 将  $t_{sA}$  闭合并将  $SS_A$  打开, 这时失电区的一部分通过  $t_{s1}$  供电, 另一部分通过  $t_{sA}$  供电, 搜索过程结束。

### 3) 电压越限处理

如果用  $t_{s1}$  恢复供电后仅存在电压越限, 则搜索备用容量  $I_M$  大于失电总负荷  $I_{loss}$  的联络开关, 并用  $Z_{path}$  对这些联络开关进行排序。如果是电压越下限, 将  $Z_{path}$  从大到小排列, 否则将  $Z_{path}$  从小到大排列。把  $t_{s1}$  打开, 将  $Z_{path}$  列表中最前面的联络开关闭合, 进行潮流计算。如果不存在安全越限, 则搜索过程停止, 否则, 将  $Z_{path}$  列表中的下一个联络开关闭合。如果不存在  $I_M$  大于失电总负荷  $I_{loss}$  的联络开关, 或者前面无法找到不产生安全越限的联络开关, 则对  $Z_{path}$  排序后, 进行类似于电流越限的处理。

### 2.2.4 向下一级馈线转移负荷

本步将有越限现象的分区邻近馈线上的部分负荷转移到与之邻近的其他馈线上, 增加该分区周围联络开关的备用容量。在负荷转移的过程中, 要保

证负荷转移的有效性, 同时, 不改变停电区域的联络开关所关联的馈线。

第 1 步 考虑  $t_{s1}$  所在的馈线向其下一级馈线进行转移负荷, 直接减少  $t_{s1}$  的负荷, 这样开关操作次数比用其他支持馈线向下一级馈线转移再进一步分担  $t_{s1}$  的负荷要少。对  $t_{s1}$  所在的馈线进行潮流计算, 若无越限则停止搜索。若出现电流越限则进行第 2 步, 否则进行切负荷处理。

第 2 步 用  $(t_{sA}, SS_A)$  表示在分区恢复中选择的联络开关和与之相应的分段开关, 则在分区恢复完成之后, 每一个  $(t_{sA}, SS_A)$  对失电区域的一部分进行供电, 其中打开的分段开关  $SS_A$  现在成为候选联络开关。

a. 判断  $SS_A$  和  $t_{s1}$  之间是否还有分段开关, 即能否继续用  $SS_A$  所在的馈线对  $t_{s1}$  进行负荷分担, 若不存在, 删除当前  $SS_A$ , 对下一个  $SS_A$  进行判断, 若存在, 进入步骤 b。

b. 判断  $t_{sA}$  所在馈线向下一级馈线转移负荷后, 能否增大  $SS_A$  的备用容量。若不行则转步骤 a, 否则转入步骤 c。

c. 把由  $(t_{sA}, SS_A)$  供电的未失电负荷的一部分转移到下一级馈线上, 已增大  $SS_A$  的备用容量。然后采用新的备用容量进行类似于步骤 3) 的处理。从而可以进一步转移由  $t_{s1}$  供电的负荷, 以缓解或消除电流越限。值得注意的是, 仅在向下一级馈线转移负荷能使  $SS_A$  备用容量增大, 且能使  $SS_A$  进一步转移由  $t_{s1}$  供电的负荷才将由  $(t_{sA}, SS_A)$  供电的未失电负荷的一部分转移到下一级馈线上去。

d. 如果这一步结束后, 存在安全越限, 则实行切负荷。如果没有安全越限, 则搜索过程结束。

### 2.2.5 切负荷以满足系统安全约束

当所有的停电路径都已经搜索完毕或仍有馈线电流越限现象出现, 但还没有完成全部负荷的供电, 此时应该考虑切负荷恢复以满足系统的安全约束。

## 3 供电恢复方案的模糊评价

根据故障恢复的目的, 制定了开关操作次数、负荷转移量、恢复后馈线的容量裕度、最大电压降 4 个指标并借助模糊理论对其模糊化, 最后通过 4 个指标的加权和实现方案评价。

### 1) 开关操作次数(SN)

故障恢复的最终方案由一些开关操作构成, 不管开关是闭合还是断开都要对开关的寿命产生影响。此外, 由于中国配电网中手动开关占多数, 开关操作次数的多少影响着恢复时间, 因此应该尽量减

少对开关的频繁操作。开关操作次数是对方案进行评估的重要指标,其隶属度函数如图 1 所示,取  $SN_1$ 、 $SN_2$  分别为 1 和 7。

2) 负荷转移量(LT)

负荷转移量  $LT$  定义为某方案的负荷转移量之和,  $LT_a$  为接受负荷转移的馈线的总负荷。隶属度函数如图 2 所示。

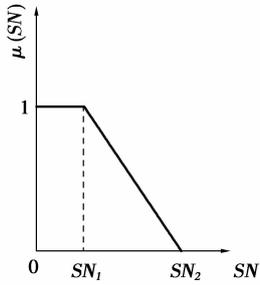


图 1 开关操作次数

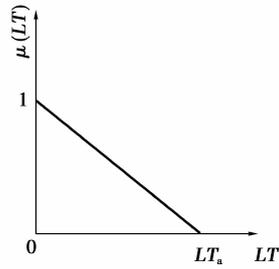


图 2 负荷转移量

3) 馈线容量裕度(M)

馈线的容量裕度是指该馈线再次发生故障时的恢复储备程度,用恢复方案集中馈线的容量裕度指标  $M$  的最小值最为评价指标,如图 3 所示,其中  $M$  定义<sup>[16]</sup>为

$$M = \min \left\{ \frac{L_{TS1}}{L_{L,1}}, \frac{L_{TS2}}{L_{L,2}}, \dots, \frac{L_{TSj}}{L_{L,j}}, \frac{L_{TSN}}{L_{L,N}} \right\} \quad (3)$$

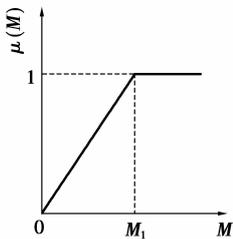


图 3 馈线容量裕度

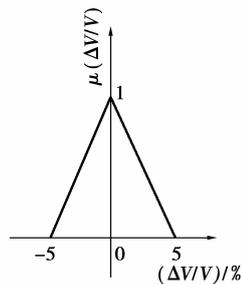


图 4 最大电压降

4) 最大电压降(ΔV/V)

最大电压降是指故障后配电网的所有馈线中电压降落百分数的最大值,见图 4 所示,定义为

$$\lambda = \max \left( \frac{V_i - V_0}{V_0} \right), \quad (4)$$

式中:  $V_i$  为节点电压的实际值,  $V_0$  为系统的电源电压。

4 算例分析

该算例为某一实际配电网,假设故障发生在  $c_1$  和  $c_2$  之间,故障隔离以后  $c_2$  的下游支路构成停电区域,如图 5 中实粗线所示,其中虚线为联络开关支路,系统的参数见文献[13]。

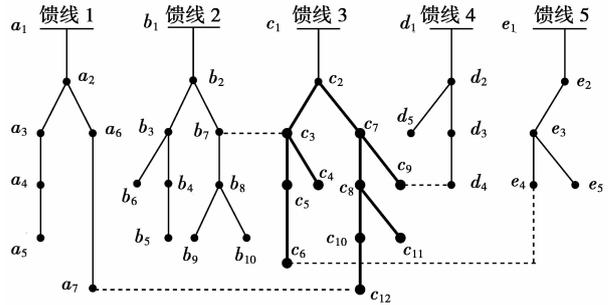


图 5 某配电网接线图

与停电区域相连的有 4 个联络开关,按其备用容量排列,依次为:  $TS_{b7-c3}$ 、 $TS_{a7-c12}$ 、 $TS_{d4-c9}$  和  $TS_{e4-c6}$ 。通过闭合  $TS_{b7-c3}$  无法实现整区恢复,闭合下一联络开关转入分区恢复步骤。最后,搜索得到的初始可行解为闭合  $TS_{b7-c3}$ 、 $TS_{a7-c12}$ , 断开分段开关  $SS_{c2-c3}$ , 开关操作次数为 3。

由于停电区域没有下一级馈线,因此候选恢复可行方案集由 2 条支持馈线和 3 条支持馈线供电方案组成。所有的恢复方案及其评价指标如表 1 所示。从表 1 看出方案 2 的评价值最高,故该方案为故障恢复的最终方案。

表 1 恢复方案及其评价

恢复方案	开关操作		指标				评价结果
	闭合	断开	$\mu(SN)$	$\mu(LT)$	$\mu(M)$	$\mu(\Delta V/V)$	
1	$b7-c3, a7-c12$	$c2-c3$	0.514 3	1.000 0	0.960 0	0.954 0	0.786 8
2	$b7-c3, c9-d4$	$c2-c7$	0.514 3	1.000 0	1.000 0	0.921 2	0.793 9
3	$b7-c3, e4-c6$	$c3-c5$	0.514 3	1.000 0	1.000 0	0.899 6	0.790 7
4	$b7-c3, a7-c12, d4-c9$	$c2-c3, c8-c10$	0.285 7	1.000 0	1.000 0	0.964 8	0.709 0
5	$b7-c3, a7-c12, e4-c6$	$c3-c5, c8-c10$	0.285 7	1.000 0	1.000 0	0.957 4	0.707 9
6	$b7-c3, d4-c9, e4-c6$	$c3-c5, c2-c7$	0.285 7	1.000 0	1.000 0	0.921 2	0.702 5

## 5 结 论

笔者提出了一种多目标配电网快速供电恢复算法。首先采用启发式搜索方法获得供电恢复初始可行方案,即在搜索过程中,根据停电区域的具体情况,将恢复问题划分为自馈线恢复、整区恢复、分区恢复、转移负荷恢复和切负荷恢复,融入了启发式知识的搜索能够有效降低开关搜索空间,指导搜索方向,并迅速给出一个可行的恢复方案;然后引入候选方案集的生成规则,得到可以和初始可行解对比的恢复方案,通过最大开关操作次数、负荷转移量、馈线容量裕度和最大电压降4个评价指标,对每个方案进行模糊评价,根据模糊加权值的大小选择最佳的恢复方案作为最终的结果。4个指标反映了故障恢复的目的和恢复后系统运行情况,权值的选择根据恢复问题侧重点的不同而变化。仿真实例表明最终的恢复方案不仅反映恢复问题的实际而且还保证系统在故障后安全、经济地运行。

### 参考文献:

- [1] BAXEVANOS I S, LABRIDIS D P. Implementing multi agent systems technology for power distribution network control and protection management [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):433-443.
- [2] 葛朝强,唐国庆,王磊. 综合智能式的故障恢复专家系统与故障恢复算法集相结合的自学习模糊专家系统[J]. 电力系统自动化, 2005, 24(2):17-21.  
GE CHAOQIANG, TANG GUO-QING, WANG LEI. Integrated intelligent service restoration system for distribution network: an auto-learning fuzzy expert system combined with service restoration algorithm set [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 24(2): 17-21.
- [3] HONG Y Y, HO S Y. Genetic algorithm based network reconfiguration for loss minimization in distribution systems [C]// 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada. [S. l.]: IEEE, 2003:486-490.
- [4] 周辉,王击,罗安,等. 克隆遗传算法与模拟退火算法相结合的配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35(7): 41-45.  
ZHOU HUI, WANG JI, LUO AN, et al. Distribution network reconstruction based on the combination of CGA and SA[J]. Relay, 2007, 35(7): 41-45.
- [5] 沈广,陈允平,刘栋. 基于最小生成树编码的配电网恢复遗传算法. 电力系统自动化, 2007, 31(14):81-84.  
SHEN GUANG, CHEN YUN-PING, LIU DONG. Distribution network restoration based on the genetic algorithm with minimum spanning tree decoding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 81-84.
- [6] 张利民,马强,李振坤,等. 基于禁忌克隆遗传算法的配电网故障恢复重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1):60-64.  
ZHANG LI-MIN, MA QIANG, LI ZHEN-KUN, et al. Service restoration reconfiguration in distribution network based on taboo clone genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1):60-64.
- [7] 李可,马孝义,邢化玲. 基于分块算法的复杂配电网修正的可靠性评估模型[J]. 电力学报, 2009, 24(6): 451-454.  
LI KE, MA XIAO-YI, XING HUA-LING. Reliability assessment prediction model of sophisticated power grids correction based on fragmental computation [J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(6):451-454.
- [8] 刘健,董海鹏,程红丽. 采用等效负荷简化配电网[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8):35-39.  
LIU JIAN, DONG HAI-PENG, CHENG HONG-LI. A simplified model for distribution system [J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(8):35-39.
- [9] RODRIGUEZ J R A, VARGAS A. Fuzzy-heuristic methodology to estimate the load restoration time in MV networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1095-1102.
- [10] HUANG C M. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 867-874.
- [11] NETO A C, CASTRO C L C, DA SILVA M G, et al. Inclusion of Voltage Drop and Feeder Loading Constraints in the Evaluation of Reliability Indices for Radial Distribution Networks [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission & Distribution, 2006, 153(6): 661-669.
- [12] LEE S J, LIM S I, AHN B S. Service restoration of primary distribution system based on fuzzy evaluation of multi-criteria [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3):1156-1163.
- [13] 刘育明. 配电网故障诊断与快速供电恢复算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [14] 颜萍,顾锦汶,张广. 一种快速高效的配电网供电恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 52-56.  
YAN PING, GU JIN-WEN, ZHANG GUANG. Y A fast efficient service restoration method for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4):52-56.
- [15] MIU K N, YUAN B, CHIANG H D, et al. Fast service restoration for large scale distribution systems with priority customers and constraint [J]. IEEE Transactions on Power System, 2003, 13(3): 789-795.
- [16] 李可,马孝义,甘学涛. 配电网架结构和馈线截面同步优化模型与算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1):13-19.  
LI KE, MA XIAO-YI, GAN XUE-TAO, et al. Electricity distribution structure and conductor cross sections simultaneous optimization method [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 13-19.

(编辑 王维朗)