

基于启发式规则与改进和声算法的配网快速故障恢复网络重构

李小文¹, 安义², 刘娟², 陈春³, 粟志刚⁴, 戴国军⁴

(1. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330012; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 4. 益阳电力勘测设计院有限公司, 湖南 益阳 413002)

摘要:网络重构是改变配电网运行状态最重要的手段之一, 可有效提高配电网经济、安全以及供电可靠性。为此, 提出融合启发式规则与网络重构的配电网故障快速恢复方法, 采用宽度优先遍历的思想, 确定故障隔离后非故障失电区, 据此利用提出的启发式规则确定非故障失电区的故障恢复方式, 以及实现非故障失电区与非故障带电区的连通; 对接入了非故障失电区且除去了主动孤岛恢复部分的配电网, 构建以网络损耗最小为目标, 以满足配电网安全运行为约束条件的网络重构模型, 利用所提出改进和声算法对模型进行求解。通过 69 节点系统仿真, 表明所提方法相比其他方法具有优越性, 同时验证了所提出的配电网故障恢复网络重构模型的有效性。

关键词:配电网重构; 故障恢复; 启发式规则; 改进和声算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.012 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2021)04-0091-09

Fast service restoration of distribution network based on combination of heuristic rules and improved harmony search algorithm

LI Xiaowen¹, AN Yi², LIU Juan², CHEN Chun³, SU Zhigang⁴, DAI Guojun⁴

(1. Nanchang Power Supply Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330012, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4. Yiyang Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Yiyang 413002, China)

Abstract: Network reconfiguration is one of the most important measures to improve the economical operation, security and reliability of distribution networks. A fast service restoration method for distribution network is proposed in this paper by combining the heuristic rules with network reconfiguration theory. Breadth first traversal is utilized to find the out-of-service area first. Subsequently, heuristic rules are employed to determine the service restoration strategy, whose aims at connecting the out-of-service area to the energized area. For the network without the intending islanding part, a network reconfiguration model, whose objective is minimization of the network loss and constraints are the safety operation of the distribution network, is constructed for the rest network, and the improved harmony search algorithm is used to solve the model. The simulation results of 69 bus system show that the proposed method is superior to other methods, and the effectiveness of the proposed network reconfiguration model is verified.

Key words: network reconfiguration; service restoration; heuristic rules; improved harmony search algorithm

配电网是连接输电网与用户的桥梁,其安全性与可靠性直接关乎人民的生活及财产安全。配电系统故障后快速恢复非故障失电区供电是保证配电网系统供电可靠性的关键手段之一。

配电网故障恢复主要是通过改变联络开关与分段开关的状态实现非故障失电区供电,本质上是求解开关最优组合的多目标非线性不可微的整数优化问题。从求解方法来看,现有的故障恢复网络重构的求解方法大致分为4类:①启发式规则,包括专家系统^[1]、拓扑遍历^[2]、规则库与综合评价相结合^[3]以及多代理^[4-6]等,这类方法的总体特征是方法模型阶段,容易理解,但是难以确保所求解为满足约束条件的最优解;②采用人工智能算法进行迭代遍历求解,如遗传算法^[7]、和声算法^[8]以及粒子群算法^[9-10]等,这类方法的特征是利用智能算法进行遍历,算法模型简单,也能找到全局最优解,最大缺点是耗时较长;③通过数学建模将故障恢复这个非凸问题转化为凸问题进行求解,如转化为二阶锥凸优化^[11-12],这类方法的特征是通过非凸向凸等效,使得数学模型可以直接利用拉格朗日方法进行求解,可保证解的唯一性,但是经过等效后求得最优解存在不满足未松弛前的约束条件;④将故障恢复模型转化为动态规划问题,也就是将问题人为引入时间关系,转换为多个阶段的子问题,如双层规划算法^[13]、多阶段优化^[14]等,这类方法的特点是故障恢复过程清晰,易于理解,但是难以得到全局最优解。

随着分布式电源接入,国内外已有一些关于基于分布式电源孤岛运行进行故障恢复的研究^[15-16]。文献^[17]根据点赋权根数和边赋权根树的结构进行层层删除,在满足一定的约束条件下,利用深度优先搜索,划分出尽可能大且靠近电网末端的功率平衡的孤岛;文献^[18]以每个DG为中心,在满足功率平衡条件下逐渐扩大其供电范围,对相交孤岛进行融合,并且尽可能地融入第一、二类负荷;文献^[19]提出了计及负荷可控性和负荷优先等级的孤岛划分策略:首先形成连接各个DG和重要负荷(优先等级高)的网络,即初始孤岛。如果这个孤岛中的负荷总量大于所有DG的平均输出功率的总和则采取减负荷策略;否则在满足功率平衡约束的前提下向该网络逐个增加负荷。

基于以上研究现状,为了加快故障恢复模型的求解速度,该文提出基于启发式规则与网络重构相结合的故障恢复方法。首先,根据启发式规则确定非故障失电区与主电网的连接关系,然后,利用改进和声算法求解重构模型,加快故障恢复模型的求解速度,减小系统损耗,改善节点电压分布。

1 故障恢复网络重构模型

配电网故障恢复以尽可能多地恢复关键负荷为目标,并兼顾系统的损耗与电压分布。目标函数与约束条件如下。

1) 目标函数。

$$\max \sum_{i \in D} \mu_i P_i \quad (1)$$

式中 P_i 为失电负荷 i 的大小; μ_i 为失电负荷 i 的权重系数,表示负荷的优先等级。

2) 以节点电压、线路容量约束满足安全运行要求等为约束条件。

①潮流约束。

$$\dot{U}_i \sum_{j \neq i} Y_{ij}^* \dot{U}_j^* = P_i + jQ_i \quad (2)$$

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; Y_{ij} 为节点 i 、 j 间的互导纳。

②支路容量约束。

$$|P_l| \leq P_{l_{\max}} \quad (3)$$

式中 P_l 为流过支路 l 的有功功率; $P_{l_{\max}}$ 为支路 l 的最大容量。

③节点电压约束。

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (4)$$

式中 $U_{i, \min}$ 、 $U_{i, \max}$ 分别为节点 i 电压幅值的上、下限。

④网络辐射状约束。

$$g_u \in G_R \quad (5)$$

式中 g_u 为已恢复供电的区域; G_R 为保证网络辐射状拓扑结构的集合。

以图1所示系统为例,配电网故障后的故障恢复场景包括3种情况:①在故障失电区不包含分布式电源的情况下,闭合与非故障失电区的联络开关,并通过交换剩余未动作的联络开关与分段开关的状态,以优化系统潮流,得到满足安全约束的最优故障

恢复方案;②非故障失电区不存在与带电区域相连接的联络开关,但失电区域内包含可稳定输出功率的可控分布式电源,此时可以利用 DG 形成稳定孤岛保障部分关键负荷的供电;③非故障失电区既存在与带电区域相连接的联络开关,又包含可稳定输出功率的可控分布式电源,此时优先考虑闭合联络开关进行网络重构,实在不行形成孤岛运行,最终将可以并网的分布式电源进行并网。

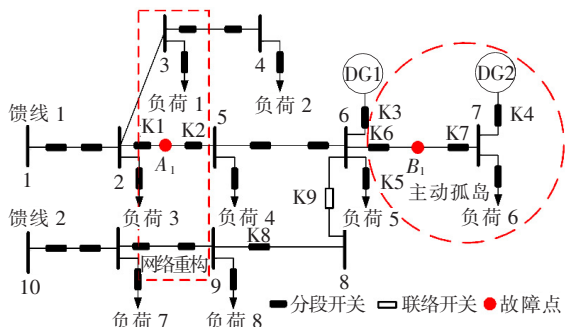


图 1 故障条件下的网络重构示意

Figure 1 Diagram of the network reconfiguration with fault

2 模型求解

2.1 求解故障恢复网络重构的总体思路

1) 启发式规则。

规则 1 如果非故障失电区内存在节点属于联络支路的一个端点,且联络支路的另外一个端点不位于非故障失电区内,则非故障失电区可通过网络重构恢复。

规则 2 如果非故障失电区不存在节点属于联络支路的端点,但存在可靠供电分布式电源(比如储能、燃气轮机以及柴油发电机等),则可通过分布式电源主动孤岛恢复^[14],否则,非故障失电区不能恢复供电。

规则 3 对于可以通过网络重构实现故障恢复的非故障失电区,首先闭合与故障隔离支路最近的联络开关,然后恢复非故障失电区与非故障带电区的连通。

2) 网络重构恢复。

以图 1 为例,以变电站出线端为第 1 层,对系统拓扑进行分层,假设 A_1 点发生故障,则开关 K_1 、 K_2 断开后实现故障隔离(故障隔离后非故障失电区内的分布式电源因反孤岛保护脱离电网),形成非故障

失电区。首先,根据拓扑分层可知 K_1 为 K_2 的上层,结合配电网“闭环设计,开环运行”的特征可知,位于下层节点 5 后面连接的负荷形成了非故障失电区;然后,由节点 5 为遍历起点,结合拓扑分层结果,依此向下遍历,遍历到节点 6 时,发现节点 6 为联络支路 8-6 的其中一个节点,因此,判断 A_1 点故障并实现隔离后,非故障失电区可以通过网络重构进行恢复。

3) 主动孤岛恢复。

假如 B_1 点发生故障,则故障支路隔离后节点 7 作为故障支路 6-7 的下层节点,因此是遍历的起点,同时因为是末端节点,故非故障失电区即为节点 7。但节点 7 不是联络支路的端点,因此,不能通过网络重构恢复,但节点 7 接入有可稳定供电分布式电源,因此,判断 B_1 点故障并实现隔离后,非故障失电区可以通过主动孤岛进行恢复。

4) 网络重构与主动孤岛结合。

假如 A_1 、 B_1 处同时故障,根据 A_1 、 B_1 故障支路的层级关系可确定故障 A_1 的非故障失电范围,由节点 5 开始向下层遍历,遍历完所有下层支路,到下层支路的另一端为末端节点或者故障支路的端点时,停止遍历。这样 A_1 处故障时的非故障失电区包含了节点 5、6;同理,遍历形成 B_1 处故障形成的非故障失电区。根据上述描述可知, A_1 故障形成的非故障失电区利用网络重构恢复, B_1 故障形成的非故障失电区利用主动孤岛恢复。

采用启发式规则与网络重构相结合的办法来实现快速故障恢复,整个过程可以分为 2 步:①根据故障支路的 2 个节点,利用宽度优先搜索算法对系统拓扑进行网络分层^[20],以位于下层支路的节点作为向下遍历的起点,直到遍历到所有的末端节点或者开路支路的端点(联络开关或者隔离故障断开的开关),进而遍历得到非故障失电区,而对于多点故障的情况,则根据故障隔离支路的层次关系,优先确定位于上层故障支路的非故障失电区,再确定位于下层的非故障失电区。利用启发式规则 1、2 确定非故障失电区的故障恢复方式,并对于可以通过网络重构实现故障恢复的非故障失电区利用启发式规则 3 确定故障隔离支路最近的联络支路闭合,实现非故障失电区与非故障带电区的连通。②以满足电

压、负载率等约束,利用改进的和声算法进行求解,优化网络损耗与节点电压分布,得到最优重构方案。

2.2 改进和声算法

对于可通过网络重构实现负荷转供的故障情况,利用启发式规则恢复网络连通性后,以网络损耗最小为目标函数(如式(2)),兼顾运行安全约束,包括节点电压与支路功率约束,并利用改进和声算法进行求解,提高全局寻优的能力以及计算速度。

基本和声算法新解的产生基于大概率的考虑概率(harmony memory considering rate, HMCR),扰动基于小概率的扰动概率(pitch adjusting rate, PAR),故记忆库中解也受 HMCR 与 PAR 的取值影响记忆库。鉴于以上分析,为了充分利用和声记忆库信息,利用相异度矩阵动态评价记忆库中解的多样性,动态删除近似解,自适应调整记忆库的大小以及记忆库考虑概率、扰动概率的值。

相异度矩阵(dissimilarly matrix, DM):存储所有成对的 n 个对象两两之间的近似性(邻近度),行和列代表相同的实体,即

$$X_{DM} = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ d(2,1) & 0 & & & \\ d(3,1) & d(3,2) & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ d(n,1) & d(n,2) & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$d(i,j) =$$

$$\sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \cdots + (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad (7)$$

式中 $d(i,j)$ 为对象 i,j 之间的相异度,为非负数, $d(i,j)$ 越大说明两者的差异越大, $d(i,j)$ 越接近于 0,说明两者间越接近; p 为解 X 的维数,每次生产新解后按照式(6)、(7)计算和声记忆库中已有解之间的相异度,得到相异度矩阵。若存在 $d(i,j)$ 小于 1,则删除记忆库中解 i 或解 j ,同时随机产生一个新解。

扰动概率 PAR 与扰动大小根据循环迭代数自适应调整其大小。

$$P_{PAR,k} = P_{PAR,\min} + \left(\frac{P_{PAR,\max} - P_{PAR,\min}}{P_{PAR,\max}} \right)^k \quad (8)$$

$$B_{bw,k} = B_{bw,\max} \frac{\left(\ln \left(\frac{B_{bw,\min}}{B_{bw,\max}} \right) \right)^k}{\left(B_{bw,\max} \right)} \quad (9)$$

式中 $P_{PAR,k}$ 为第 k 次迭代时微调概率; $P_{PAR,\min}$ 、 $P_{PAR,\max}$ 分别为微调概率最小、最大值; $B_{bw,k}$ 为第 k 次扰动值, $B_{bw,\min}$ 、 $B_{bw,\max}$ 分别为扰动量的最小、最大值。

2.3 计算步骤

在满足配电网安全运行约束条件下,配电网故障恢复的决策变量为故障隔离后实现非故障失电区的恢复供电需要动作的开关。利用启发式规则搜索非故障失电区,确定故障恢复方式是通过网络重构还是基于分布式电源孤岛运行。若确定是通过网络重构转供恢复供电,则利用启发式规则实现非故障失电区与主网恢复连通时输出联络开关的编号。然后,利用网络重构搜索最优联络开关与分段开关的组合。网络重构的编码为

$$H_m = \{1/0, S_{1,m}; 1/0, S_{2,m}; \cdots; 1/0, S_{\lambda-1,m}; 1/0, S_{\lambda,m}\} \quad (10)$$

式中 H_m 为和声记忆库中第 m 个解;1/0 为联络开关的状态,即闭合/断开; λ 为联络开关的数目; S 为与联络开关交换状态的分段开关。

配电网故障恢复的计算步骤:①系统发生故障后根据故障信息确定故障位置,并隔离故障。②利用启发式规则确定非故障失电区的故障恢复方式。若通过网络重构恢复,则确定与非故障失电区相连的联络开关,并任一闭合其中一个联络开关,实现非故障失电区与主电网相连。③以网络损耗最小为目标函数,利用改进和声算法进行模型求解。根据和声算法的求解步骤以此初始化记忆库,生产新解,更新和声记忆库,若满足最大循环代数,则输出结果。此时,若最优结果已然不满足安全运行的约束,则参考文献[14]进行切负荷,直到满足约束。

3 算例分析

3.1 仿真情景设定

为了验证方法的有效性,利用 69 节点配电系统作为仿真算例,系统接线如图 2 所示。仿真软件为 MatlabR 2009b,处理器为 2.2 GHz、内存为 2 GB 的 PC 机。对 69 节点系统进行改进,其中接入有分布式电源,具体情况如表 1 所示。算法参数:和声记忆库大小 HMS 为 10,考虑概率 HMCR 为 0.85,扰动概率 PAR 为 0.9,最大迭代次数取值 500。

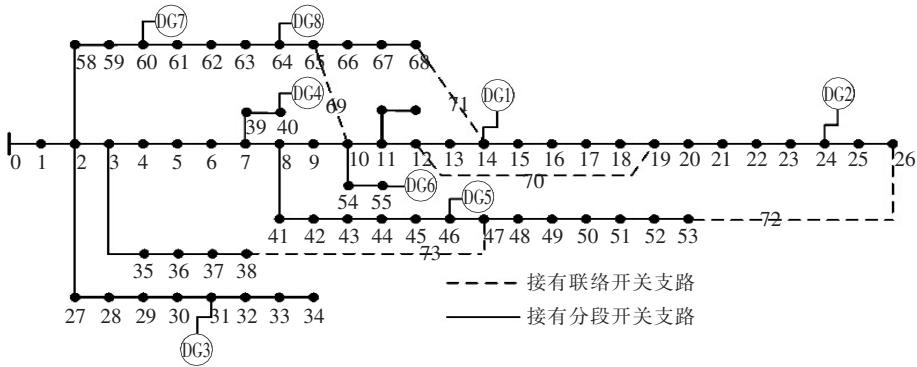


图 2 改进 69 节点仿真算例接线

Figure 2 Single line diagram of the 69-node test system with DGs

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of distributed generations

接入点	容量/kW	接入点	容量/kW
14	60	46	400
24	50	55	60
31	40	60	80
40	40	64	50

3.2 算例结果分析

场景 1 对于支路 0-1 故障,首先根据启发式规则,由节点 1 作为起始节点依次向下层遍历,得到非故障失电区内包含的所有节点。判断发现所有联络支路的 2 个端点都位于非故障失电区内,因此,判定支路 0-1 故障时不能通过网络重构进行故障恢复;但因非故障失电区内包含可稳定供电的分布式电源,故可以通过基于分布式电源出力的主动孤岛形式恢复非故障失电区内供电。故障恢复结果如图 3 所示。因为分布式电源的容量有限,故必须要切除部

分负荷,恢复总负荷为 924.69 kW,实现了部分关键负荷的供电保障。

场景 2 对于故障支路 6-7,首先以故障支路 6-7 的下层节点 7 作为遍历的起始节点,向下层遍历,得到所有的非故障失电区的节点,包括节点 8~26,其中节点 10 为联络支路 10-65 的一个端点,且另外一个端点 65 不在非故障失电区内,因此,支路 6-7 故障可以通过网络重构进行恢复。根据启发式规则闭合联络支路 10-65,恢复非故障失电区内与主电网的连接。然后以网络损耗最小为目标函数,以满足安全运行要求为约束条件,利用所提出的改进和声算法进行网络重构求解,支路 6-7 故障后经过网络重构后网络结构如图 4 所示。闭合联络支路 10-65,系统的网络损耗为 15.3 kW,通过网络重构优化后的网络损耗为 5.98 kW,系统网络损耗显著减小。当合联络支路 6-7 恢复非故障失电区内与主网连接后,通过网络重构,系统的节点电压分布情况如

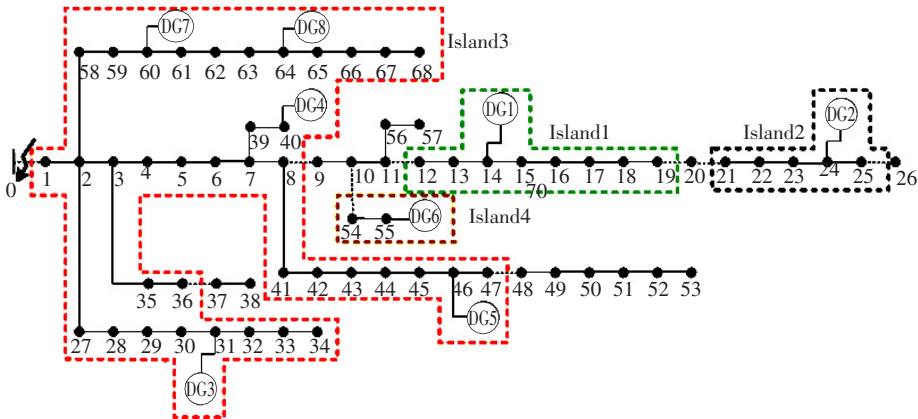


图 3 故障支路 0-1 的故障恢复结果

Figure 3 Service restoration results of faulted branch 0-1

图5所示,重构前、后各支路损耗的分布情况如图6所示。由图5、6可知,系统经过网络重构,系统的节点电压以及各支路的损耗都得到显著降低,充分证明了网络重构改善系统电压、降低网络损耗的功能。

为了验证该文所提出的改进和声算法的快速收敛性,基于故障支路6-7发生故障这一特定算例,将该文提出的改进和声算法与和声算法以及粒子群算法进行对比,其中,和声算法参数中和声记忆库大小HMS为10,最大循环代数为500;粒子群算法的种

群数目为30,最大循环代数为500。将3种算法进行多次运行求解后,取重构结果相同的情况,如图7所示,描述了3种算法在寻优遍历过程中的收敛情况,以及随着循环代数的增加算法的寻优能力。并且,在保证3种智能算法所遍历到的最优解相同的情况下,得到了3种算法遍历所时间,结果如表2所示。由图7、表2的结果可知,该文提出的改进和声算法的寻优速度更快,满足实际配电网的故障处理需求。

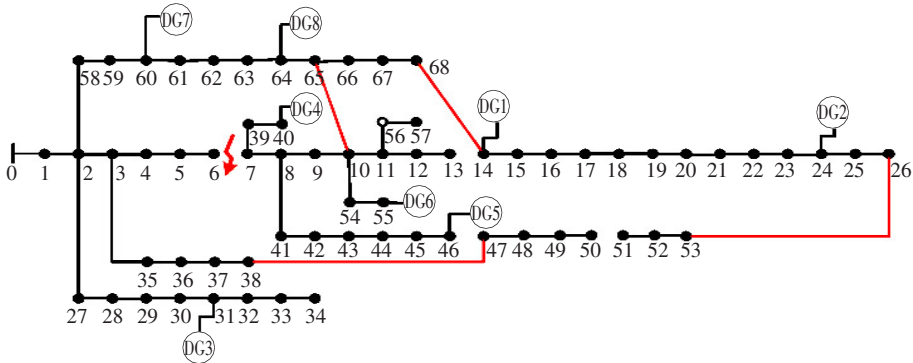


图4 支路6-7故障后的恢复结果

Figure 4 Service restoration results of faulted branch 6-7

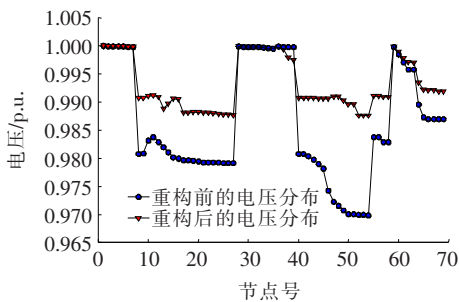


图5 故障支路6-7恢复重构前、后的节点电压分布

Figure 5 Voltage profile before and after network reconfiguration with faulted branch 6-7

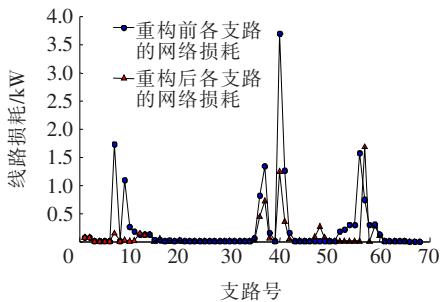


图6 故障支路6-7恢复重构前、后的网络损耗分布

Figure 6 Branches loss profile before and after network reconfiguration with faulted branch 6-7

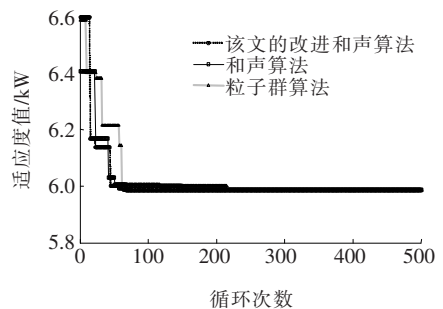


图7 不同算法的收敛情况

Figure 7 Convergence results of different algorithms

表2 故障支路6-7的故障恢复结果

Table 2 Service restoration results of faulted branch 6-7

故障恢复算法	闭合支路	断开支路	平均计算时间/s
该文方法	10-65,14-68,	—	15
	26-53,47-38		
和声算法	10-65,14-68,	—	61
	26-53,47-38		
粒子群算法	10-65,14-68,	—	87
	26-53,47-38		

场景 3 支路 18-19、29-30 同时故障。判断出故障支路 29-30 位于故障支路 18-19 的上层,因此,首先利用宽度遍历算法,由节点 30 依次向下层遍历得到支路 29-30 故障隔离后形成的非故障失电区节点 30、31、32、34,因非故障失电区内的节点不存在联络支路的端点,但非故障失电区内包含可稳定供电的分布式电源,因此,故障支路 29-30 隔离后形成的非故障失电区可以通过主动孤岛实现故障恢复。然后,对于故障支路 18-19,则利用遍历算法,由节点 19 作为遍历起点依次遍历得到非故障失电区节点 19~26,因为节点 19 为联络支路 12-19 的一个节

点,并且节点 12 不属于非故障失电区内的节点,因此,故障支路 18-19 隔离后形成的非故障失电区可以通过网络重构进行故障恢复,利用启发式规则闭合联络支路 12-19 恢复非故障失电区的连通性后,以网络损耗最小为目标函数,以满足安全运行要求为约束条件,利用改进和声算法进行网络重构。恢复结果如图 8 所示。对故障恢复前、后的网络结构进行潮流计算,其中孤岛部分(节点 30~34),以接入分布式电源的节点 31 为平衡节点,其他节点作为 PQ 节点进行潮流分析,故障恢复前、后各节点的电压分布如图 9 所示。

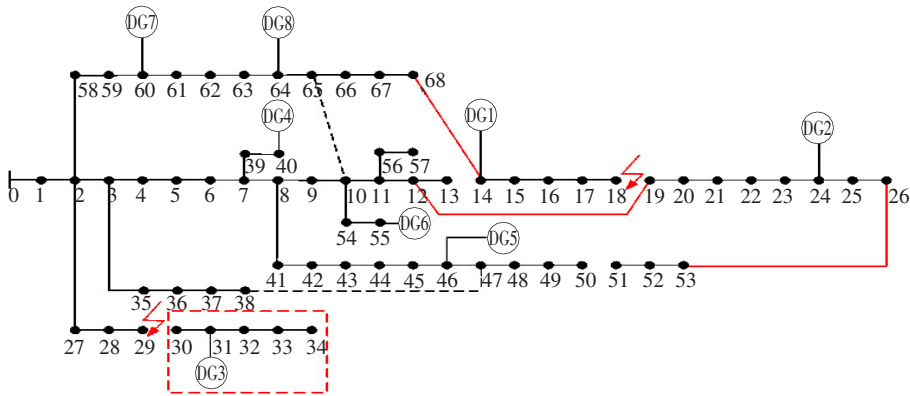


图 8 支路 18-19 与支路 29-30 同时故障时的恢复结果

Figure 8 Service restoration results of faulted branch 18-19 & 28-29

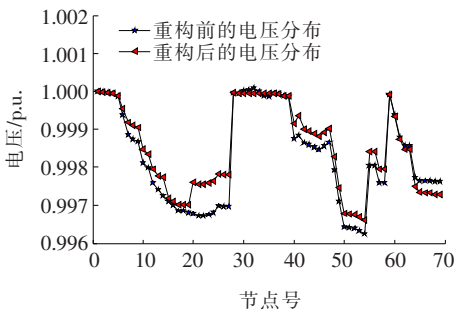


图 9 支路 18-19、29-30 同时故障时的恢复结果

Figure 9 Voltage profile before and after network reconfiguration with faulted branch 18-19 & 28-29

场景 4 支路 8-9、42-43 同时故障。判断出故障支路 8-9 位于故障支路 18-19 的上层,因此,首先利用宽度遍历算法,由节点 9 依次向下层遍历得到支路 8-9 故障隔离后形成的非故障失电区节点 9~

26,非故障失电区内首个联络支路 10-65 的节点 10 位于非故障失电区内,且该联络支路的另一节点 65 不位于非故障失电区内,因此,故障支路 8-9 故障隔离后形成的非故障失电区可以通过网络重构恢复。然后,对于故障支路 42-43,也利用遍历算法,由节点 43 作为遍历起点依次遍历得到非故障失电区节点 43~53,因为节点 47 为联络支路 47-38 的一个节点,并且节点 38 不属于非故障失电区内的节点,因此,故障支路 42-43 隔离后形成的非故障失电区也可以通过网络重构进行故障恢复。通过启发式规则闭合联络支路 10-65、47-38 后,以网络损耗最小为目标函数,以满足安全运行要求为约束条件,利用改进和声算法进行网络重构求解,恢复结果如图 10 所示。

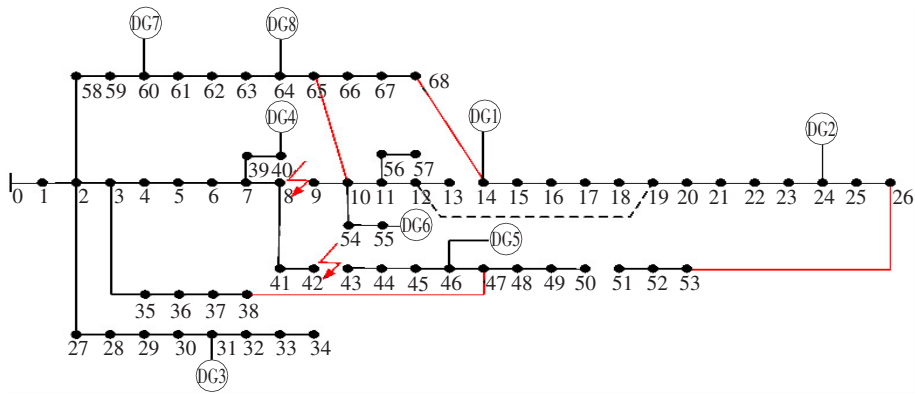


图 10 支路 18-19、29-30 同时故障时的恢复结果

Figure 10 Service restoration results of faulted branch 18-19 & 28-29

4 结语

该文在深入分析网络重构减小系统网络损耗、改善电压分布以及恢复非故障失电区功能的基础上,提出了融合启发式规则与网络重构的配电网故障快速恢复方法。根据所提出的拓扑遍历方法,可以快速地将故障支路隔离后的非故障失电区遍历得到;利用提出的启发式规则,可以判断出非故障失电区的故障恢复方式是通过网络重构恢复、主动孤岛恢复还是不能恢复;进一步,对于能够通过网络重构进行恢复的非故障失电区,利用启发式规则恢复非故障失电区与非故障带电区的连通;最后,利用改进和声算法对已恢复与非故障失电区连通且已除去主动孤岛恢复部分的网络进行网络重构求解,得到网络损耗与节点电压都已进行优化的最优网络重构方案。通过算例仿真分析并与已有方法对比,验证了算法的有效性与优越性。

参考文献:

[1] 臧天磊,钟佳辰,何正友,等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术,2012,36(5):251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology,2012,36(5):251-257.

[2] 盛四清,王峥. 基于树型结构的配电网故障处理新算法[J]. 电网技术,2008,32(8):42-46.
SHENG Siqing, WANG Zheng. A new tree structure based fault processing algorithm for distribution net-

work[J]. Power System Technology,2008,32(8):42-46.

- [3] 汤旻安,张凯越,许希元. 基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略[J],电力系统保护与控制,2020,48(14):1-8.
TANG Min'an, ZHANG Kaiyue, XU Xiyuan. Service restoration strategy of a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm[J]. Power System Protection and Control,2020,48(14):1-8.
- [4] 陈铁军,宁美凤. 基于分布式 MAS 的电网自愈控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):14-18.
CHEN Tiejun, NING Meifeng. Study on self-healing control scheme of power grid based on distributed MAS [J]. Power System Protection and Control,2012,40(19):14-18.
- [5] Sujil A, Verma J, Kumar R. Multi agent system: concepts, platforms and applications in power systems[J]. Artificial Intelligence Review,2018,49:153-182.
- [6] Leite J B, Mantovani J R S. Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2198-2206.
- [7] 易波,刘建华,周雄,等. 基于二次协作优化方法的配电网重构[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(4):46-50.
YI Bo, LIU Jiahua, ZHOU Xiong, et al. Distribution network reconfiguration based on a secondary collaborative optimization method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(4):46-50.
- [8] 邹欣,李琴,黄宇,等. 一种用于配电网重构的正反馈自适应和声算法[J],电力科学与技术学报,2018,33(1):22-29.
ZOU Xin, LI Qin, HUANG Yu, et al. Adaptive HSA

- bated on positive feedback for distribution network reconfiguration[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(1): 22-29.
- [9] 程杉,倪凯旋,苏高参,等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. *高压电器*, 2019, 55(7): 195-202.
- CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7): 195-202.
- [10] 景皓,贾伯岩,卢志刚,等. 考虑可平移负荷管理的主动配电网故障恢复方法[J]. *智慧电力*, 2020, 48(11): 48-55.
- JING Hao, JIA Boyan, LU Zhigang, et al. Fault recovery method for active distribution network considering shiftable load management[J]. *Smart Power*, 2020, 48(11): 48-55.
- [11] 葛鹏江,张树永,董晓晶,等. 基于鲁棒优化的配网重构二阶锥规划模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(4): 50-57.
- GE Pengjiang, ZHANG Shuyong, DONG Xiaojing, et al. Distribution network reconfiguration model based on robust optimization[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(4): 50-57.
- [12] 刘刚,陈莎,全进,等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(18): 50-56.
- LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(18): 50-56.
- [13] 马天祥,程肖,贾伯岩,等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 48-57.
- MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 48-57.
- [14] Wang Feng, Chen Chun, Li Canbing, et al. A multi-stage restoration algorithm for medium-voltage distribution system with DG[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2627-2636.
- [15] 黄哲洙,金鹏,王剑,等. 基于分层分区的含 DG 配网故障恢复策略[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(10): 6-16.
- HUANG Zhezhu, JIN Peng, WANG Jian, et al. Fault recovery strategy of the distribution network with DG based on hierarchical partition[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(10): 6-16.
- [16] 赵晋泉,张强,方嵩,等. 最小化用户停电损失的主动配电网黑启动分区优化策略[J]. *中国电力*, 2020, 53(7): 114-121.
- ZHAO Jinquan, ZHANG Qiang, FANG Song, et al. Optimization strategy for black-start partitioning of active distribution network to minimize customer outage cost[J]. *Electric Power*, 2020, 53(7): 114-121.
- [17] 丁磊,潘贞存,丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(25): 62-67.
- DING Lei, PAN Zhencun, CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distribution generation based on rooted tree[J]. *Proceeding of CSEE*, 2008, 28(25): 62-67.
- [18] 易新,陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. *电网技术*, 2006, 30(7): 49-54.
- YI Xin, LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generations[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(7): 49-54.
- [19] Mao Yiming, Miu K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution system with distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(4): 1346-1352.
- [20] 颜伟,刘方,王官洁,等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(8): 76-80.
- YAN Wei, LIU Fang, WANG Guanjie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(8): 76-80.