

文章编号:1674-2974(2019)04-0055-10

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2019.04.008

含 DGs 的配网多阶段故障恢复

汪沨¹, 丁阳^{1†}, 陈春¹, 宾峰¹, 吕建红²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 国家电网公司湖南省电力科学研究院, 湖南长沙 410013)

摘要: 针对含分布式电源(DGs)的配网快速故障恢复问题, 提出了一种多阶段故障恢复方法。该故障恢复方法有机融合了故障拓扑识别、孤岛划分、含 DGs 主网连通性恢复和网络重构、切负荷操作四个阶段。当配电网发生故障时, 采用故障拓扑识别法分析故障区域, 确定下一步故障恢复执行阶段并更新失电区的拓扑参数; 孤岛配置阶段, 提出了深度优先搜索算法的孤岛划分方法, 以优先恢复关键负荷和最大化负荷恢复量为目标, 并提高 DGs 利用率; 采用启发式规则优选联络开关迅速恢复失电区与主网的连通性; 网络重构阶段基于父子链表规则避免了不可行解的产生, 潮流计算验证是否执行下一阶段; 切负荷阶段切除非关键负荷以保证系统稳定运行。算例表明: 该方法适用于含 DGs 的配电网发生大面积停电、多重故障、连锁故障等情况, 能根据实际情况制定有效恢复策略, 提高了复杂故障恢复的效率, 具有很强的适用性。

关键词: 配电网; 故障恢复; 分布式电源; 孤岛划分; 网络优化

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

Multi-stage Service Restoration for Distribution Network with DGs

WANG Feng¹, DING Yang^{1†}, CHEN Chun¹, BIN Feng¹, LÜ Jianhong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. State Grid Electric Research Institute of Hunan Province, Changsha 410013, China)

Abstract: In order to solve the problem of fast service restoration in distribution network with distributed generators (DGs), a multi-stage service restoration method is proposed. The service restoration method organically combines the four phases of service topological identification, islanding, connectivity restoration with main network of DGs and network reconfiguration, and load shedding operation. Once the distribution network is faulty, the service area is identified by the service topology identification method to determine the next stage of service restoration execution and to update the topology parameters. During the island configuration phase, the islanding method based on depth-first search algorithm is proposed, which gives the priority to restore the key load and maximum loads as the goal and to improve the utilization of DGs. Heuristic rules to optimize the tie switch quickly restore the out-of-service areas and main network connectivity. Network reconfiguration phase based on the parent-child list rules avoids infeasible solution. The flow calculation is used to verify whether or not the next phase is executed. The load shed-

* 收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677061, 51507058), National Natural Science Foundation of China(51677061, 51507058)

作者简介: 汪沨(1972—), 男, 辽宁抚顺人, 湖南大学教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: mrdlingyang@hnu.edu.cn

ding stage removes the non-critical load to ensure the stable work of the system. The example shows that this method is suitable for the case of large-scale out-of-service, multiple failures, and cascading failures in the distribution network with DGs. It can make an effective restoration strategy according to the actual situation and improve the efficiency of complex fault restoration with strong applicability.

Key words: distribution network; service restoration; distributed generators; intentional islanding; network optimization

配电网系统中分布式电源 (distributed generators, DGs) 渗透率日益提高, 利用 DGs 对配网中重要负荷短期供电, 构建计划孤岛, 使关键负荷不间断供电, 对提高配网可靠性具有重要意义^[1]. 但大量 DGs 接入配电网后, 网络从单电源供电变成多点电源供电系统, 使得网络结构更加复杂.

随着冰雹、大雪和暴雨等极端天气的增多, 配电网出现故障的几率大大增加, 因而建立合理有效的故障恢复方案对于提高系统稳定性尤为重要^[2]. 配网故障恢复是一个多目标、多组合、多约束的非线性寻优问题^[3]. 在故障恢复方法中, 非故障失电区可闭合联络开关恢复与主网的连通性并进行重构恢复负荷供电, 或通过 DGs 黑启动形成孤岛恢复供电, 或两者相结合, 但传统的故障恢复方法如最优流法^[4]、支路交换法^[5]等启发式算法和蚁群算法^[6]、粒子群算法^[7]等群体智能优化算法较难处理这类问题.

根据 IEEE std.1547—2003 要求^[8], 在含 DGs 的非转供失电区可采用孤岛效应恢复供电. 目前国内外学者已对孤岛划分提出诸如基于图论的 Prim^[9]、Sollin^[10] 和 Kruskal^[11] 算法, 以及基于树背包理论的分支定界算法^[12]和动态规划算法^[13]等多种孤岛划分方法, 但这些方法只适用于树状网络. 一些学者将故障恢复问题转化为故障重构问题, 但未考虑到与主网无联络开关相连的非转供失电区恢复问题^[14-15]. 文献[16]提出了移动多代理动态联盟解决配网故障恢复问题, 但由于多代理方法在处理多重故障时需反复获取信息设置代理, 延长了恢复时间. 文献[17]采用孤岛效应和网络优化相结合的方法选取合理故障恢复方案, 但未就网络优化后线路负荷仍过载、节点电压仍越限等情况讨论分析, 故障恢复后的主网和孤岛存在失稳的可能.

本文提出了融合计划孤岛运行和网络重构的多阶段故障恢复方法. 故障发生后, 首先基于父子链表进行故障拓扑识别, 确定下一阶段恢复方式并更

新网络拓扑参数; 在孤岛运行阶段, 采用深度优先搜索算法对孤岛进行划分, 将可作为平衡节点的 DG 作为搜索的起点, 构建优先恢复关键负荷和最大化负荷恢复量的孤岛方案; 采用启发式规则选取最优联络开关恢复网络连通性、潮流指标判断是否网络重构; 网络重构时基于父子链表对支路组优化选择以避免不可行解, 提高算法寻优效率; 网络重构后系统电压和容量仍越限, 则执行切负荷阶段, 切除非关键负荷, 以保证系统安全稳定运行. 算例分析表明, 针对含 DGs 配电网多种故障类型, 多阶段故障恢复方法能合理地选取恢复方案, 优先恢复关键负荷, 最大化负荷恢复量, 相较于其他恢复方法, 该方法实现了故障恢复最优化和快速性有效平衡.

1 故障恢复问题模型

故障恢复方案的目标是优先保证关键负荷恢复供电和最大化负荷恢复量. 目标函数为:

$$\max \sum_{i \in L} k_i w_i \frac{S_{Li}}{S_{L\text{sum}}} \quad (1)$$

式中: k_i 为负荷 i 的投入状态, 0 表示未投入, 1 表示投入; w_i 为故障区负荷的重要等级; S_{Li} 为负荷 i 的视在功率; $S_{L\text{sum}}$ 为非故障失电区内负荷视在功率之和; L 为所有未恢复供电的负荷集合.

孤岛划分时应优先将一、二级负荷划入孤岛内, 并在分布式电源尚有功率余量的情况下, 尽可能地包含三级负荷.

孤岛稳定运行的约束条件:

1) 孤岛功率平衡约束

由于配网的无功在负荷端进行集中补偿, 因此孤岛内主要考虑有功功率的平衡.

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} \geq \sum_{j=1}^{N_d} P_{Dj} \quad (2)$$

式中: P_{Gi} 为孤岛内第 i 个 DG 的有功功率; P_{Dj} 为负

荷 j 的有功功率; N_g 为接入孤岛DGs的总数目; N_d 为并入孤岛总负荷数目。

2) DG类型和出力约束

孤岛黑启动需能作为平衡节点的DGs,即孤岛内应含有下垂控制模式或V/f控制模式的DGs。

$$0 \leq P_{Gj} \leq P_{Gimax} \quad (3)$$

式中: P_{Gimax} 为第 i 个DG有功出力上限。

3) 电压和容量约束

节点电压不越限,线路容量不过载。

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (4)$$

$$S_j \leq S_{jmax} \quad (5)$$

式中: U_i 为母线 i 的电压; U_{imax}, U_{imin} 分别为节点 i 的电压上、下限; S_j 为线路 j 的容量; S_{jmax} 为线路 j 的上限容量。

4) 网络拓扑约束

系统正常运行下,网络拓扑结构为辐射状。

2 故障拓扑识别与分析

2.1 拓扑简化

图 $G=(V,E)$ 中,与节点 v 相连边的数目称为节点 v 的度,记为 $d(v)$,其中以 v 作为起点的边数目称为出度,记为 $d^+(v)$;以 v 作为终点的边数目称为入度,记为 $d^-(v)$.简化规则如下:

1) 不被包含在任何环网的支路不被编码。

2) 首先闭合网络中的所有开关,将相互连接且 $d^+(v)$ 与 $d^-(v)$ 之和不大于2的节点间的支路合并成一条支路,其解环效果相同。

IEEE33节点系统简化图如图1所示。

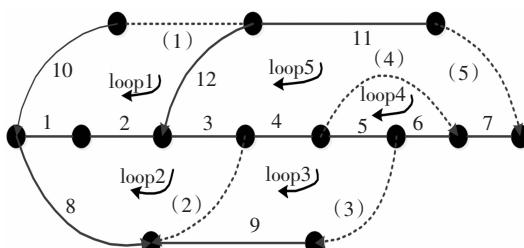


图1 33节点简化图

Fig.1 Simplified diagram of 33-bus system

2.2 父子链表

在简化图的基础上,利用深度优先搜索(depth-first search, DFS)^[18]方法形成父子链表(parent-child linked list, PCLL).某辐射状网络如图2所示,图中以 N 为头节点, N_i 为分支节点,经过DFS形成父子链

表,如表1所示。

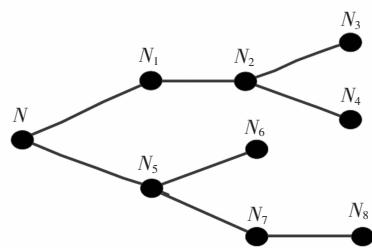


图2 某辐射状网络

Fig.2 The radial network

表1 父子链表

Tab.1 Parent-child linked list

父节点	N	N_1	N_2	N_3	N	N_5	N_6	N_7
子节点	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8

2.3 恢复阶段的选择

通过对网络进行拓扑简化和DFS形成PCLL,判断隔离故障所需切断支路 L_f 的两节点是否全部在PCLL中,若支路 L_f 两节点全是PCLL中的元素,则说明该故障可由网络重构恢复,即不考虑孤岛运行(由于孤岛运行相较于并网运行更脆弱,故能网络重构时不考虑孤岛运行);若支路 L_f 两节点不全是PCLL中的元素,则说明故障不可由网络重构恢复,考虑通过孤岛效应恢复供电。

3 含DGs的多阶段故障恢复

3.1 多阶段恢复流程说明

网络发生故障后,首先采用故障拓扑识别法(第一阶段)确定下阶段故障恢复策略,并更新失电区拓扑参数。

若含有DGs的失电区由孤岛效应(第二阶段)恢复供电,则孤岛内DGs应首先进行黑启动,即具有自启动能力的DGs向无自启动能力的DGs提供启动能源.具体实施步骤如下:

1)选取具有自启动能力且出力最大的DG作为平衡节点先启动,保证黑启动初期有足够的出力裕量;

2)确定已启动的DGs和未启动的DGs的连通路径,要求此路径上DGs出力之和与路径上负荷功率之和的差最大,打开分段开关切除与路径之外负荷连接关系,以启动其他备选DGs;

3)根据2)中方法启动其他未启动DGs;依次并入未与DGs相连的其他负荷,直至 $\sum P_D \geq \sum P_G$.

4)若失电区由网络重构(第三阶段)恢复供电,则应先恢复含 DGs 的主网连通性,此阶段通过启发式规则选取合适的联络开关,迅速恢复失电区与主网的连通性,潮流指标验证并判断是否执行切负荷操作(第四阶段).故障恢复流程如图 3 所示.

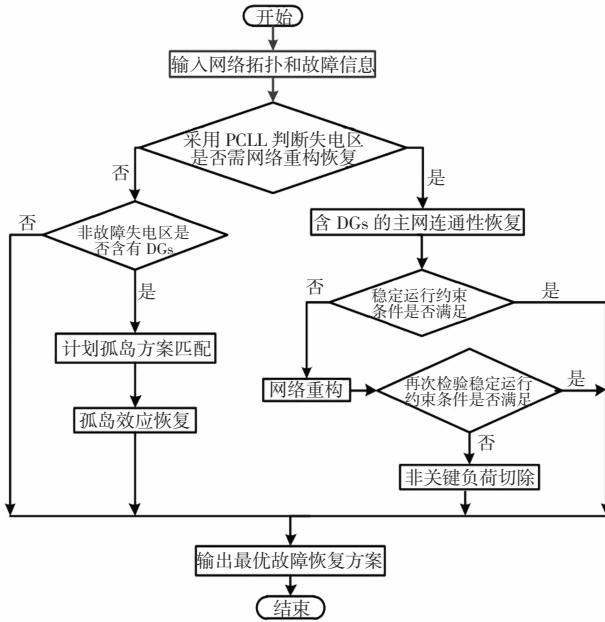


图 3 故障恢复流程图

Fig.3 Flow chart of multi-stage restoration method

3.2 计划孤岛恢复区域

配电网故障隔离后,遍历非故障失电区中开关线路,若不存在与主网连接通路,但失电区有具备黑启动能力 DGs,则采用孤岛效应恢复负荷供电.拟定计划孤岛运行方案前,需确定其恢复区域.确定计划孤岛恢复区域的具体步骤如下:

- 1)首先根据预先设定的故障 f ,确定需断开的支路 L_f 以隔离该故障;
- 2)从故障支路 L_f 向末端支路开始全局遍历,遍历方向由节点支路关联矩阵 A 确定,获得非故障失电区所包含的全部支路和节点.

3.3 计划孤岛划分方案

计划孤岛划分的关键是找到可作为平衡节点的 DGs,将其作为搜索的起点.在搜索过程中,遇到已划分好的单 DG 孤岛和不满足孤岛约束的负荷,进行相应存储和标记,并将具有连接通路的两个或多个单 DG 孤岛合并.本文孤岛划分采取深度优先搜索算法寻优,虽启发式方法只能得到可行解,不是最优解,但相较智能算法具有更快寻优速度.由于本文考虑的是网络重构和孤岛效应相结合的多阶

段故障恢复方法,并不是只考虑孤岛划分方案最优,故在孤岛划分方法上只考虑其快速性.

孤岛划分具体步骤如图 4 所示.

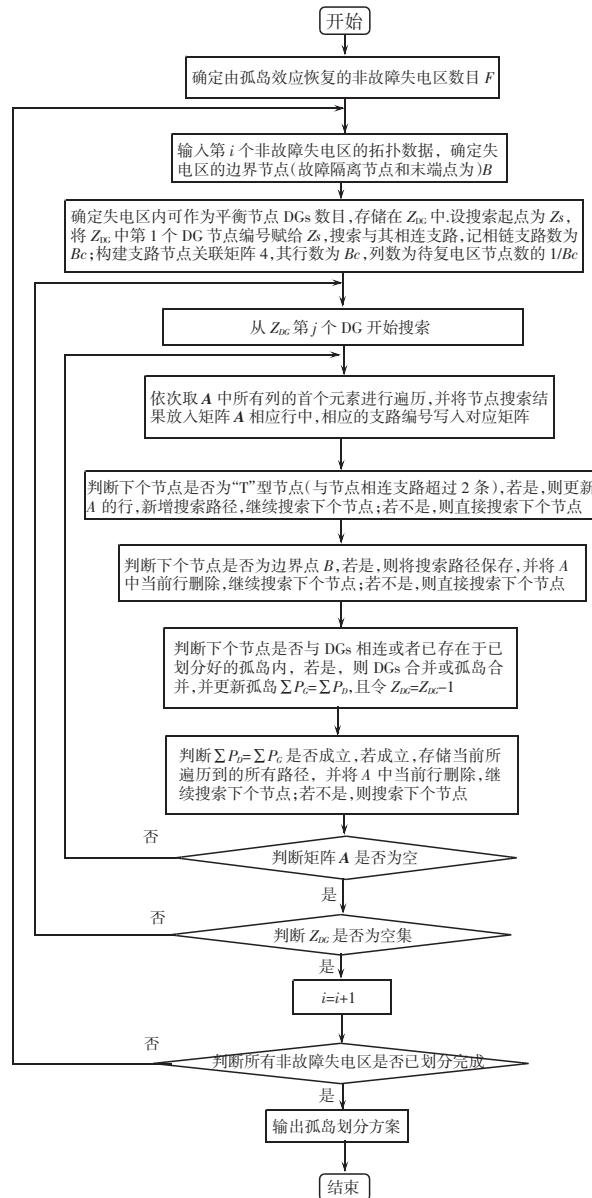


图 4 孤岛划分流程图

Fig.4 Flow chart of island separation

3.4 含 DGs 主网连通性恢复

若故障支路 L_f 两节点全是 PCLL 中元素, 则该故障由网络重构恢复供电.首先采用启发式规则来选取最合适联络开关,以恢复非故障失电区与主网的连通性.

故障定位和隔离后,将故障断开支路所在环路的联络开关合即可恢复网络连通性.但会出现断开支路被多个环路包围,或者出现多个断开支路存在于多个环路等情况.针对上述情况,提出 3 条启发

式规则.具体规则如下:

规则 1: 若断开的支路存在于两个及以上环网中时,按环网所含的分段开关数目进行排序,选取环路所含支路数较少的联络开关闭合.

以图 1 为例,若支路 6 发生故障,支路 6 上的分段开关断开,进行故障隔离.支路 6 为环路(4)和环路(5)的公共支路,根据规则 1,选取较小环路(4)中的联络开关(4)进行闭合.

规则 2:若存在断开的 m 条支路,且 m 条支路所在的环路为同一个,则只需要闭合此环中的联络开关.

以图 1 为例,若支路 1、2 同时发生故障,由图可知,支路 1、2 都存在于联络开关(1)、(2)对应的 2 个环路中.根据规则 2、3,闭合最优先的联络开关.反之,若同时闭合 2 个环路的联络开关,则会形成一个新的大环网,不满足拓扑约束要求.

规则 3:若故障隔离断开多条支路在多个环中,优先选取闭合后首段馈线段负载率最小联络开关闭合.

采用启发式规则恢复网络连通性,在保证网络故障恢复前后始终为辐射状的前提下,迅速恢复了非故障失电区与主网的连通性.

3.5 网络重构

若网络连通性恢复后,网络运行状态满足约束条件,则输出故障恢复方案.若潮流指标验证后节点电压仍越限或线路负荷仍过载,则触发网络重构.通过改变开关开合状态,改善潮流分布、提高电压质量和均衡线路负荷.网络重构目标函数(负荷均衡度)为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S_i^{\max}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{(S_i^{\max})^2} \quad (6)$$

式中: S_i 为支路 i 复功率; S_i^{\max} 为支路 i 最大功率.网络重构约束条件同孤岛稳定运行的约束条件 2)、3)、4).

利用智能算法能以较大概率得到全局最优解,但由于配电网辐射状拓扑要求,使得在搜索过程中产生众多不可行解,大幅度降低了搜索效率.因此,快速避免不可行解已成为智能算法网络重构所要解决的重点.

基于 PCLL 提出两条规则以避免不可行解:1)保证重构网络呈辐射状,要求 PCLL 中,除头节点外,每个节点只对应一个父节点.2)保证重构网络无孤岛,要求对于有 N 个节点的网络,PCLL 中有且只有 $N-1$ 个节点.

以二进制数 0 和 1 来对联络开关的开闭状态编码,0 表示断开,1 表示闭合;以十进制数来编码断开的分段开关.编码长度是联络开关数的 2 倍.

粒子的编码形式如图 5 所示,图中:1/0 表示取 1 或 0; S_{ij} 表示 i 环网中的第 j 个分段开关断开.1/0 取 1 时,则表示第 i 环网中联络开关闭合,1/0 取 0 时, S_{ij} 中 j 取随机数,表示 i 环网中联络开关断开,分段开关闭合.

1/0	S_{ij}	...	1/0	S_{ij}	...	1/0	S_{mj}
-----	----------	-----	-----	----------	-----	-----	----------

图 5 粒子的编码形式

Fig.5 Encoding of the particle

本文选取萤火虫算法^[19]求解网络重构模型.萤火虫算法具有原理简单、参数较少等优点,但存在容易早熟、过度依赖控制参数和收敛速度较慢等缺点.为克服上述缺点,引入混沌理论^[20],提出改进萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA).算法实现流程图具体步骤如图 6 所示.

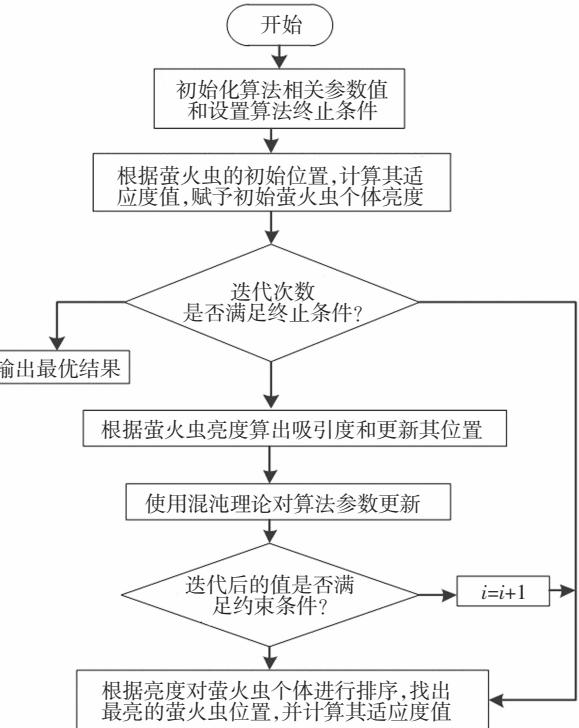


图 6 算法实现流程图

Fig.6 Flow chart of algorithm implementation

3.6 切负荷操作

若通过网络重构仍无法达到节点电压不越限和线路不过载,则在网络重构最优解的基础上,执行切除负荷操作,达到网络稳定运行.切负荷操作需满足以下 3 条要求:1)为减少网损,需选网络末端

负荷进行切除;2)应优先切除三级负荷,保证关键负荷正常供电;3)从恢复负荷量最大原则出发,切除的负荷量应尽可能小.

切负荷操作具体步骤如下:

1)将网络重构后的网络拓扑进行分层处理,从电源点出发将支路进行分层,靠近电源点的支路为第一层.根据层次关联矩阵C,沿辐射状网络搜索到末层支路,依次得到各层支路.

2)从末层支路开始向上遍历,搜索各层中的过载支路,确定过载功率 ΔS .

3)从过载支路向末端支路进行搜索,首先切除末端三级负荷(一般只切除三级负荷就可满足要求),选择切除负荷的组合,保证所切负荷量最小,使其大于等于 ΔS .

4)继续按层遍历支路,若发现过载支路,则按3)中方法切除负荷.直至遍历完网络中所有支路或无过载线路.

4 算例分析

在MatlabR2014a环境下,处理器为3.2 GHz,内存为8 GB的PC上进行仿真,选取IEEE69节点配电网和某实际配网系统作为算例.设定初始化IFAC参数如下:萤火虫种群个数为50个,最大迭代次数为100,步长系数 $\alpha=0.30$,初始吸引度 $\beta=0.25$.仿真分析分别在含分布式电源和不含分布式电源两种情景下进行.将配网系统中负荷按重要等级分类:一级负荷为5、8、11、17、42、50、56;三级负荷为12、18、19、25、26、28、38~40、41、43、53~58、67~69,其余为二级负荷.表2为网络中DGs接入参数.线路负荷均衡度上限设为1.0,节点电压上下限分别设为0.9(p.u.)和1.0(p.u.).本文以配电网节点电压不越限和线路负荷均衡度不过载作为潮流验证指标.

表2 DGs参数

Tab.2 DGs parameters

编号	接入点	容量/kW	编号	接入点	容量/kW
1	15	500	4、7	6、37	500
2	23	300	5、8	44、47	700
3	30	80	6	54	200

4.1 算例1

4.1.1 不含分布式电源

不含DGs的故障恢复,由于无法形成孤岛,则

由网络重构恢复供电.网络重构前先恢复网络连通性,若潮流验证指标越限,则触发网络重构.网络重构后节点电压越限或线路过载仍存在,则触发切除负荷操作.

情况1:若故障发生在支路4~5.首先闭合联络开关39~48,恢复网络连通性.对系统潮流验证,节点电压最低值为0.775,线路负荷均衡度最高值为1.1625,均越限,触发网络重构.闭合11~66、17~20、28~54,断开18~19、27~28、64~65,进行网络重构.对重构后的网络潮流验证,节点电压最低为0.887,线路负荷均衡度最高为1.0682,两者依然存在越限,触发切负荷操作.切除负荷节点为18、19、28、41、58、69,再次进行潮流验证,节点电压最低值为0.958,线路最高负荷均衡度也降为0.9735,满足系统稳定运行约束.

故障恢复过程中节点电压和线路视在功率分布情况如图7、图8所示.在恢复网络连通性后,网络大部分节点电压和线路负荷均衡度都不满足约束条件,触发网络重构,重构后仍有少部分节点电压和线路负荷容量过载,触发切负荷操作,切除非关键负荷后,系统满足安全稳定约束条件.

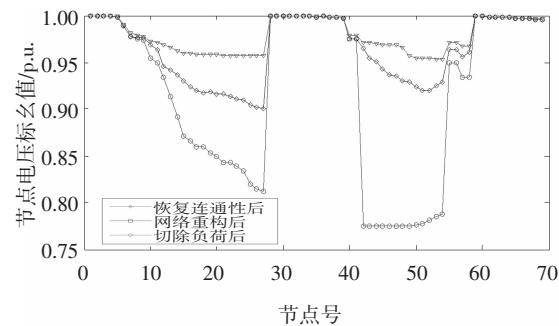


图7 情况1恢复后的节点电压分布

Fig.7 Voltage profile after service restoration situation 1

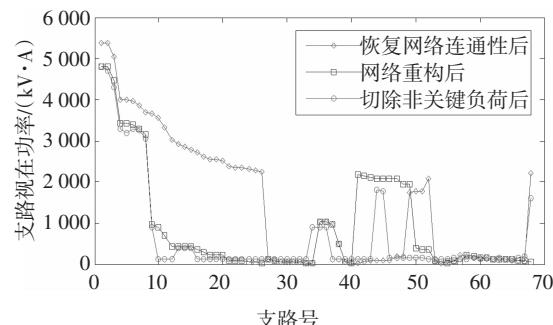


图8 情况1恢复后的线路视在功率变化

Fig.8 Branch capacity of service restoration in situation 1

选取文献[21]中方法与本文方法对故障情况1仿真分析,迭代次数为100,耗时分布曲线如图9所示。从图9中可看出,文献[21]中方法的平均耗时明显多于本文所提方法,由于文献[21]中方法在每生成一个新解时都要形成一个基本环矩阵,并对其进行遍历。可知,本文基于父子链表避免不可行解规则的网络重构方法较文献[21]基于基本环矩阵的不可行解判别方法具有更快的寻优速度。

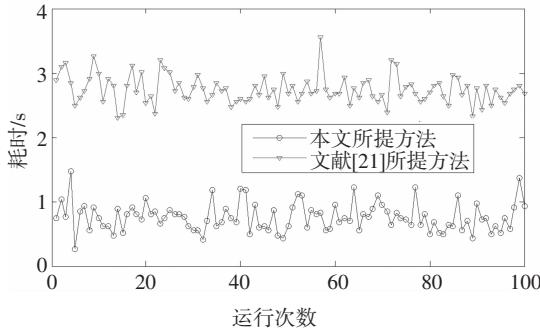


图9 情况1故障恢复耗时对比曲线

Fig.9 Comparison of service restoration in situation 1

情况2:若故障发生在支路30~31.执行第一阶段后,可判断失电负荷为31~35。由于此时系统不含DGs,则只能从网络中去除负荷31~35得到新网络。对系统进行潮流验证,节点电压最低值为0.907,线路负荷均衡度最高值为0.9872,满足约束条件,无需执行下阶段操作。可见,无DGs的配网系统PCLL外的支路发生故障后,失电负荷无法恢复供电,配电网中接入DGs可提高配网供电可靠率。

4.1.2 含分布式电源

DGs的总出力为2250 kW,占网络总容量的59.18%,功率因数为0.9,且都具备稳定输出能力。

情况3:若故障发生在支路1~2。采用孤岛效应对非故障失电区恢复供电,孤岛划分方案如图10所示,共划分为5个区域,即5个孤岛:孤岛1为断开边3~4和8~9形成,孤岛总负荷量为1010.5 kW,功率裕量为-10.5 kW;孤岛2为断开边9~42形成,孤岛总负荷量为1716.8 kW,功率裕量为-316.8 kW;孤岛3为断开边8~9,孤岛总负荷量为837.6 kW,功率裕量为-37.6 kW;孤岛4为断开边3~59形成,孤岛总负荷量为185.6 kW,功率裕量为14.4 kW;孤岛5为断开边29~30形成,孤岛总负荷量为39.5 kW,功率裕量为10.5 kW。由于孤岛1、孤岛2、孤岛3的DGs出力不足,触发切负荷操作,分别切除负荷40~41、51~54和27~28后,更新孤岛1、2、3

总负荷量分别为966.4 kW、1398.8 kW和798.6 kW,功率裕量分别为33.6 kW、1.3 kW和1.4 kW。负荷总恢复量为3388.9 kW,占总负荷的比例为89.1%,恢复一级负荷所占一级综合比例为99%。

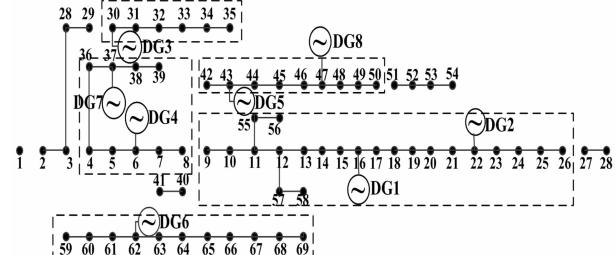


图10 本文方法处理情况3的最终结果

Fig.10 The method in this paper deals with the final result of situation 3

采用文献[22-23]的孤岛划分策略对情况3进行恢复供电,孤岛优化划分方案如图11、12所示,故障恢复结果如表3所示,文献[22-23]恢复的1级负荷占总负荷的比例分别为98.7%、89.6%,总负荷恢复量占比分别为64.8%、58.6%,可见本文孤岛划分方法对孤岛进行了合理的划分,最大限度地保障了关键负荷供电,并使得总负荷恢复量尽可能大。本文孤岛划分在故障情况2中DGs利用率为95.9%较文献[22]中DGs利用率93.7%有一定提升。

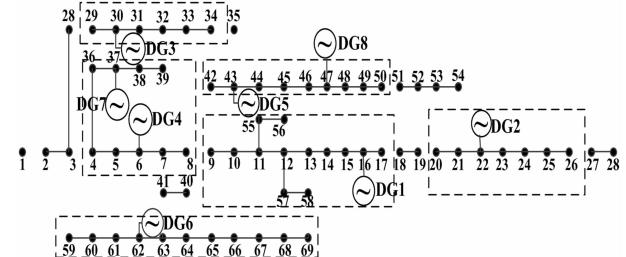


图11 文献[22]配网孤岛优化划分方案

Fig.11 Optimal island partition scheme of the distribution system by the method of ref [22].

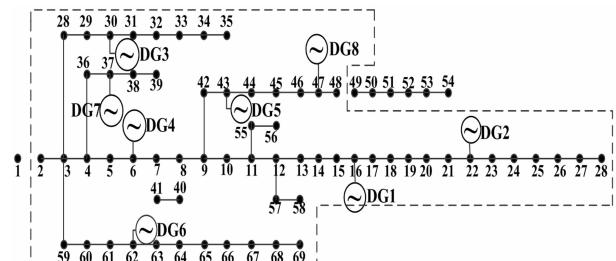


图12 文献[23]配网孤岛优化划分方案

Fig.12 Optimal island partition scheme of the distribution system by the method of ref [23].

表3 情况3的故障恢复结果

Tab.3 Service restoration result in situation 3

方法	划分孤岛数目	恢复的1级负荷占比/%	负荷恢复量/kW	恢复总量占比/%
本文方法	5	98.9	2714.8	71.4
文献[22]	6	98.7	2465.4	64.8
文献[23]	1	89.6	2228.6	58.6

情况4:若故障发生在支路5~6和3~59.故障隔离后,形成小型孤岛区59~69,孤岛总负荷量为185.6 kW,功率裕量为14.4 kW.闭合联络开关39~48,恢复网络连通性,并潮流验证,节点电压最低值为0.874,线路负荷均衡度最高值为1.143,节点电压存在越限,触发网络重构.闭合开关28~54和41~66,断开开关50~51和63~64实现网络重构,进行潮流验证,节点电压最低值为0.912,满足约束条件,线路负荷均衡度最高值为1.031,仍越限,触发切负荷操作.基于切负荷算法,切除非关键负荷68和69,最终结果满足指标约束.情况1、情况3、情况4的多阶段恢复结果如表4所示.

表4 多阶段恢复结果

Tab.4 Multi-stage service restoration results

阶段	项目	情况1	情况3	情况4
一	故障定位(支路)	4~5	1~2	5~6、3~59
	失电负荷/kW	2 676.7	3 802.2	2 862.3
	孤岛个数	0	5	1
		3~4 3~59		
二	断开开关	—	8~9 9~42	3~59
			29~30	
	恢复负荷/kW	—	3790	184.6
	恢复时间/s	—	0.24	0.08
		11~66		
		17~20	28~54	
三	闭合开关	28~54	—	39~48
		39~48		41~66
		18~19	50~51	
	断开开关	27~28	—	59~60
		64~65		63~64
	恢复负荷/kW	2 676.7	—	2 677.7
	恢复时间/s	0.83	—	1.12
		18~19、27~28		
四	切负荷序号	28、41、59、69	40~41	68、69
			51~54	
	切除负荷量/kW	156.8	402.1	78.4

若采用文献[17]的方法处理情况4,在其多阶段恢复过程中,当网络优化后系统容量和节点电压仍越限时,由于缺少最后的切负荷阶段,孤岛存在失稳的可能,恢复结果比较如表5所示.本文恢复时间虽较文献[17]有所增加,但本文方法保证了系统运行稳定性.可见,本文多阶段恢复方法兼顾了最优性和快速性.

表5 情况4恢复结果对比

Tab.5 Comparison of service restoration results in situation 4

方法	文献[17]	本文方法
$V_{\min}/\text{p.u.}$	0.912	0.954 6
$S_{\max}/\text{p.u.}$	1.031	0.987 3
断开开关	5~6 3~59 50~51 59~60 63~64	5~6 3~59 50~51 59~60 63~64
切负荷序号	—	68、69
切除负荷量/kW	—	78.4
恢复时间/s	3.52	3.78

情况5:若在故障支路5~6恢复的过程中,支路3~28发生故障.支路开关5~6断开退出网络,在执行故障拓扑识别与分析阶段后检测到新的故障信息,支路3~28被断开,回到开始重新执行第一阶段,确定下阶段的故障恢复策略.支路3~28断开形成孤岛,失电负荷28~35只能以孤岛运行方式恢复供电,在节点30处接入DG3,其最大输出功率为80 kW小于失电负荷总功率91.5 kW,则触发切负荷操作,切除负荷34、35,负荷28~33恢复供电.联络开关15~69闭合可恢复失电负荷7~28、55~58的供电,对主网进行潮流验证,负荷均衡度和节点电压均越限,触发第四阶段寻优,断开开关13~20、46~47、51~52、64~65,此时电压最低值为0.956 5,上升10.37%,负荷均衡度最高值为0.956 5,下降18.69%.如表6所示,文献[16]、[24]也考虑了此类故障,由于多代理故障恢复机制需反复获取故障信息设置故障恢复策略,得到此结果分别需耗时14.8 s和13.5 s,明显慢于本文方法.

表6 情况5恢复结果对比

Tab.6 Comparison of service restoration results in situation 5

方法	文献[16]	文献[24]	本文方法
$V_{\min}/\text{p.u.}$	0.943 1	0.943 1	0.943 1
$S_{\max}/\text{p.u.}$	0.956 5	0.956 5	0.956 5
断开开关	5~6 3~28 13~20 46~47 51~52 64~65	5~6 3~28 13~20 46~47 51~52 64~65	5~6 3~28 13~20 46~47 51~52 64~65
恢复时间/s	13.5	14.8	4.6

4.2 算例2

某实际配电网系统^[24]含有15条馈线和7个DG,具体网络节点、负荷大小数据如图13所示(括号内为相应负荷大小),其中每条馈线的最大容量为400A,每个DG的最大出力为100kW,空心圆表示分闸,实心圆表示合闸。

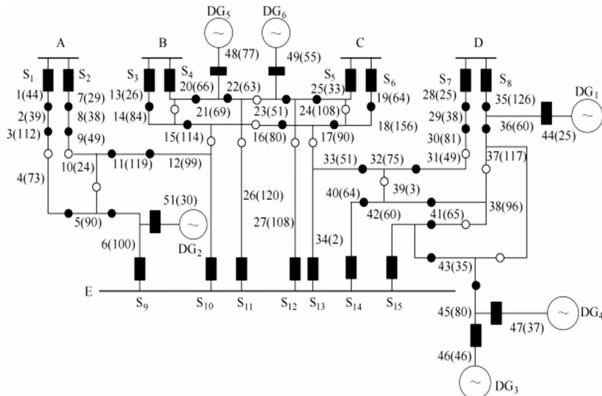


图13 某实际配电网系统

Fig.13 An actual distribution network

假设母线E发生故障,馈线F₉、F₁₀、F₁₁、F₁₂、F₁₃、F₁₄、F₁₅断开以隔离故障母线E,此时由剩余的8条馈线让失电区恢复供电。依据负荷恢复量尽可能大的原则,依据本文所述方法,经第一阶段的拓扑识别与分析和第三阶段的主网连通性恢复,DG1~DG6全都并网运行,其中馈线F1和DG2共同加载负荷1~6,馈线F8和DG1共同加载负荷35~38、41和43,系统中无孤岛产生,最后优化结果如表7所示。

表7 某配电网失电仿真结果

Tab.7 Simulation results service restoration of in a distribution network

馈线	加载负荷	
	文献[24]的方法	本文方法
F1	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5
F2	7、8、9、10、11、12	7、8、9、10、11、12
F3	13、14、15、16	13、14、15、16
F4	20、21、22、26	20、21、22、26
F5	23、24、25、27	23、24、25、27
F6	17、18、19、33、34	17、18、19、33、34
F7	28、29、30、31、32、39、40	28、29、30、31、32、39、40
F8	35、36、37、38、41、43、46	35、36、37、38、41、43、46

采用文献[24]的方法,故障发生后DG2解列为孤岛1,DG3解列为2,DG4解列为孤岛3.由于馈线

F1的容量限制,最后未恢复负荷6.采用本文方法,DG2得到充分利用,能够恢复尽可能多的负荷.因此,本文方法能合理的尽可能利用分布式电源,缩小停电区域.

5 结论

本文针对含DGs的配电网故障恢复问题,提出了一种多阶段故障恢复方法.故障隔离后,通过第一阶段实现了故障类型和故障恢复阶段的匹配,然后以安全运行条件为阶段指标,实现了后三个阶段的有机融合,兼顾了故障恢复的最优性和快速性.算例仿真表明:本文提出的多阶段故障恢复方法,能够有效解决多种配电网故障问题.对于大面积失电情况,与文献[22~23]相比,本文孤岛划分方法在恢复关键负荷、总负荷恢复量以及DGs利用率上具有一定优势.对于多重故障恢复,较文献[17]中方法,切负荷阶段保证了孤岛的稳定性.针对连锁故障,与文献[16]、文献[24]相比本文方法能更加快速地恢复故障.下一步的研究将集中在计及负荷和DGs的不确定性的动态故障恢复上.

参考文献

- [1] 李振坤,周伟杰,钱啸,等.有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J].电工技术学报,2015,30(21):67—75.
LI Z K,ZHOU W J,QIAN X ,et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators [J].Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30 (21):67—75. (In Chinese)
- [2] 冯雪平,宋晓辉,梁英,等.基于最小生成树及改进遗传算法的含分布式电源配电网孤岛划分方法[J].高电压技术,2015,41 (10):3470—3478.
FENG X P,SONG X H,LIANG Y ,et al.Islanding method based on minimum spanning tree and improved genetic algorithm for distribution system with DGs [J].High Voltage Engineering,2015,41 (10):3470—3478. (In Chinese)
- [3] 周涛建,解慧利,郑柏林,等.基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J].电网技术,2015,39(1):136—142.
ZHOU Q,XIE H L,ZHENG B L,et al.Hybrid algorithm based co-ordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation [J].Power System Technology,2015,39 (1): 136—142. (In Chinese)
- [4] 刘蔚,韩祯祥.基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J].电网技术,2004,28(19):29—33.
LIU W,HAN Z X.Distribution network reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm [J].Power Sys-

- tem Technology, 2004, 28 (19): 29—33. (In Chinese)
- [5] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网络重构的快速支路交换算法 [J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82—85.
- ZHANG D, ZHANG L C, FU Z C. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks [J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82—85. (In Chinese)
- [6] SAFFAR A, HOOSHMAND R, KHODABAKHSHIAN A. A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm [J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(5): 4021—4028.
- [7] ABDELAZIZ A Y, MOHAMMED F M, MEKHAMER S F. Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(11): 1521—1530.
- [8] BASSO T S, DEBLASIO R. IEEE 1547 series of standards: Interconnection issues [J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(5): 1159—1162.
- [9] 董晓峰, 陆于平. 基于改进 Prim 算法的分布式发电孤岛划分方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 195—200.
- DONG X F, LU Y P. Islanding algorithm for distributed generators based on improved Prim algorithm [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 195—200. (In Chinese)
- [10] 曾令诚, 吕林, 曾澜钰. 基于 Sollin 算法的含分布式电源的孤岛划分方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 95—100.
- ZENG L C, LÜ L, ZENG L Y. Islanding method based on Sollin algorithm for grid with distributed generations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 95—100. (In Chinese)
- [11] 刘宗歧, 鲍巧敏, 孙春山, 等. 基于改进 Kruskal 算法的含分布式发电的配网孤岛划分算法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 164—171.
- LIU Z Q, BAO Q M, SUN C S, et al. Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved Kruskal algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 164—171. (In Chinese)
- [12] 王旭东, 林济铿. 基于分支定界的含分布式发电配网孤岛划分 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 16—20.
- WANG X D, LIN J K. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 16—20. (In Chinese)
- [13] 李红伟, 林山峰, 吴华兵, 等. 基于动态规划算法的配电网孤岛划分策略 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 47—52.
- LI H W, LIN S F, WU H B, et al. Islanding strategy based on dynamic programming algorithm for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 47—52. (In Chinese)
- [14] 王增平, 张丽, 徐玉琴, 等. 含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 8—14.
- WANG Z P, ZHANG L, XU Y Q, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 8—14. (In Chinese)
- [15] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162—167.
- ZHANG H, HE J H, BO Z Q, et al. Service restoration based on dynamic programming [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162—167. (In Chinese)
- [16] 杨丽君, 于琦, 魏玲玲. 基于移动多代理动态联盟的配电网故障恢复研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 147—154.
- YANG L J, YU Q, WEI L L. A distribution network fault recovery study on the dynamic alliance of mobile multi-agent [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 147—154. (In Chinese)
- [17] 文娟, 谭阳红, 何怡刚, 等. 含 DG 的复杂配电网多阶段故障恢复方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 33(14): 3332—3341.
- WEN J, TAN Y H, HE Y G, et al. A multi-stage service restoration method for complex distribution networks with DGs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 33(14): 3332—3341. (In Chinese)
- [18] 向小蓉, 刘涤尘, 向农, 等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构 [J]. 电网技术, 2012, 38(8): 100—105.
- XIANG X R, LIU D C, XIANG N, et al. Distribution network reconfiguration based on parallel Tabu search algorithm [J]. Power System Technology, 2012, 38(8): 100—105. (In Chinese)
- [19] TJAHHONO A, ANGGRIPAN D O, FAIZIN A K, et al. Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2575—2585.
- [20] YANG X S, DEB S. Eagle strategy using levy walk and firefly algorithms for stochastic optimization [J]. Study in Computational Intelligence, 2010, 284: 101—111.
- [21] 陈春, 汪沨, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55—60.
- CHEN C, WANG F, LIU B, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55—60. (In Chinese)
- [22] 谢夏慧, 汪沨, 陈奇朋, 等. 含分布式电源的配电网关键负荷保障方法 [J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1447—1453.
- XIE X H, WANG F, CHEN Q P, et al. A method to ensure power supply reliability for key load in distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1447—1453. (In Chinese)
- [23] 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 X, LU Y P. Islanding algorithm of distribution network with distributed generators [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 49—54. (In Chinese)
- [24] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135—141. (In Chinese)
- XU Y Q, ZHANG L, WANG Z P, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distribution generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135—141. (In Chinese)