

基于图论和 OBDD 的含分布式电源配电网故障恢复算法

缪 辉¹, 丁晓群¹, 叶晨晖¹, 张小龙²
(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098;
2. 国网江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 为快速确定含分布式电源(DG)配电网故障恢复的最优方案,首先,提出了基于改进 Bellman-Ford 算法的含多 DG 配电网孤岛划分图论模型,该模型综合考虑 DG 发电成本、网损及负荷优先级确定孤岛范围,转换为孤岛运行以提高重要负荷的供电可靠性。然后将 DG 孤岛外故障恢复问题转化为约束满足的布尔型决策问题的三步法:①根据节点类型将节点按位编码分区枚举生成初始解空间;②定义电源约束、负荷损失约束和辐射状约束的布尔函数,合成为 OBDD 模型减少解空间中解数量;③对解空间中的解逐一进行校验、寻优切负荷及排序,稳定获得系统故障恢复的全局最优解。最后通过 IEEE33 节点系统和某地区实际配电网验证了该算法的有效性。

关键词: 分布式电源;故障恢复;孤岛划分;OBDD;配电网

DOI: 10.12067/ATEEE1711018 **文章编号:** 1003-3076(2018)09-0059-08 **中图分类号:** TM732

1 引言

含分布式电源(Distributed Generation, DG)的复杂配电网故障快速恢复是实现智能配电网自愈控制的重要手段^[1,2]。其目标是在系统安全运行约束和允许的操作条件下,通过网络重构尽可能多地使非故障停电区恢复供电,同时还要使得恢复后系统的负荷损失、开关操作次数以及系统网损尽可能小。因此,它是一个多目标、多约束的非线性优化问题,其解为一组开关动作序列^[3]。

目前,含 DG 的配电网故障恢复问题的求解方法主要有数学优化算法^[4-6]、启发式算法^[7,8]以及人工智能优化算法^[9-12]。数学优化算法的基本原理是将配电网故障恢复问题转化为数学模型,再通过一定的算法进行求解。文献[4]采用基于最小生成树和动态规划算法的分布式电源孤岛划分方法;文献[5]将分支定界理论应用于含分布式电源的配电网孤岛划分。虽然数学优化算法能稳定获得全局最优解,但其存在严重“维数灾”带来的计算时间长问题,很难应用于复杂的大规模电力系统,因此难以满足故障恢复快速性的要求。启发式算法是指根据调

度员的实际经验建立启发式规则来指导搜索的优化算法,其快速性得到业界的广泛认可。文献[7]提出了基于区间潮流分析的联络开关最优割点计算方法,通过简单的启发式规则进行最优切割以快速形成故障恢复方案。但启发式算法不够稳定,算法的最终效果很大程度上取决于具体的系统网络结构。人工智能优化算法近年来广泛应用于配电网自动化系统中。文献[9]将二进制粒子群优化算法应用于配电网故障恢复;文献[10]建立了多目标的含 DG 配电网故障恢复模型,并利用 NSGA-II 算法对其进行了求解;文献[12]将多智能体方法与遗传算法结合,解决含 DG 的配电网大面积断电供电恢复问题。虽然理论上人工智能优化算法能求得全局最优解,但是一般参数难以确定,且计算量较大、计算效率不高,有时也会陷入局部最优解。

根据分析可知,三种方法各有优缺点。为了满足配电网故障恢复实用、快速的要求,本文首先提出了基于图论的含分布式电源孤岛划分方法。该方法先根据深度优先搜索算法(Depth First Search,DFS)确定 DG 的最大供电范围,再通过引入虚拟源点,综合考虑 DG 发电成本、网损及负荷优先级,并根据改

收稿日期: 2017-11-07
基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(5206021400NP)
作者简介: 缪 辉(1995-),男,江西籍,硕士研究生,研究方向为主动配电网故障抢修与恢复;
丁晓群(1956-),男,江苏籍,教授,博士,研究方向为电力系统运行与控制、电力设备故障诊断。

进的 Bellman-Ford 算法确定孤岛范围;其次将 DG 孤岛外故障恢复问题转化为约束满足的布尔型决策问题的三步法:①根据节点类型将节点按位编码分区枚举生成初始解空间;②定义电源约束、负荷损失约束和辐射状约束的布尔函数^[14],合成为有序二元决策图模型减少解空间中解的数量;③对解空间中的解逐一进行校验、寻优切负荷及排序,稳定获得系统故障恢复的全局最优解,快速可靠地恢复非故障失电区的供电。

2 配电网供电恢复的目标函数与约束条件

根据第 1 节对配电网故障恢复问题的描述可知,负荷损失量、开关操作次数和经济性三个方面是配电网故障恢复的目标函数需考虑的问题,其表达式如下。

(1) 尽可能减少停电负荷

$$\min F_1 = \sum_{i \in \Omega_L} \lambda_i P_{Li} (1 - \varepsilon_i) \quad (1)$$

式中, Ω_L 为参与故障恢复的节点集合; λ_i 为节点 i 负荷的重要程度; P_{Li} 为节点 i 的有功负荷; ε_i 为节点 i 的负荷状态,0 表示切除状态,1 表示正常工作状态。本文负荷等级按照负荷的重要性由高至低分为 I、II、III 级,其相应的权重系数为 1、0.5、0.1。

(2) 尽可能减少开关操作次数

$$\min F_2 = \sum_{i \in S} (1 - x_i) + \sum_{j \in L} y_j + \sum_{k \in C} (1 - z_k) \quad (2)$$

式中, S 、 L 、 C 分别代表系统中的分段开关集合、联络开关集合以及可控负荷开关集合; x_i 、 y_j 、 z_k 分别代表上述开关的工作状态,0 表示断开,1 表示闭合。

(3) 尽可能减小经济成本

$$\min F_3 = \sum_{i \in G} \alpha_i P_{Gi} + \sum_{(i,j) \in T} \beta_{ij} P_{Tij} \quad (3)$$

式中, F_3 为系统运行总费用; P_{Gi} 和 P_{Tij} 分别为各 DG 发出的有功功率和线路传输有功功率; G 和 T 分别为各 DG 和线路的集合; α_i 和 β_{ij} 分别为第 i 个 DG 的发电成本和线路 $i-j$ 的传输成本,本文 β_{ij} 用线路 $i-j$ 单位潮流的有功损耗替代用以考虑系统网损。

本文给目标函数设定优先顺序比较,以停电负荷最小为主要目标函数,以开关操作次数最小为次要目标函数,以经济成本最小为再次要目标函数。

故障恢复的约束条件如下。

(1) 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 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压下限、电压幅值和电压上限。

(2) 辐射状运行约束

$$t \in \Gamma \quad (5)$$

式中, t 为故障恢复后系统的拓扑结构; Γ 为系统辐射状拓扑结构集合。

(3) 支路潮流约束

$$|S_{(i,j)}| \leq S_{(i,j),\max} \quad (6)$$

式中, $S_{(i,j)}$ 和 $S_{(i,j),\max}$ 分别为支路 $i-j$ 的潮流以及潮流上限。

3 DG 孤岛故障恢复策略

含 DG 配电网故障下的孤岛运行能极大地提高系统的供电可靠性,充分发挥 DG 的优势,并且能保证重要负荷的供电^[14]。在孤岛划分时,主要考虑以下原则^[15]:①在孤岛内的负荷总量和总损耗之和小于 DG 总发电容量的条件下,孤岛包含尽可能多的负荷;②在孤岛划分时,应保证重要负荷优先供电。

3.1 孤岛划分的数学模型

根据上述孤岛划分的原则,可建立目标函数:

$$f = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j \in H_i} |\lambda_j P_j| \quad (7)$$

式中, n 为孤岛个数; H_i 为第 i 个孤岛内的负荷集合; λ_j 和 P_j 分别为 H_i 内第 j 个负荷的权值和有功功率。

孤岛的形成还需满足一定的约束条件,除式(4)~式(6)所表示的约束条件外,还需满足:

(1) 孤岛容量约束:孤岛内 DG 的总发电容量应大于孤岛内总负荷和网络损耗之和。

(2) 连通性约束:孤岛至少含有一个 DG,并且 DG 和孤岛负荷节点之间保持连通性。

3.2 DG 动态孤岛划分方法

图 1 为含多 DG 的配电系统。本文以图 1 为例说明动态孤岛划分方法。图 1 中, P_c^{\max} 表示 DG 有功功率上限, P_L 为负荷有功功率, α 、 β 、 γ 、 μ 分别表示 DG 发电成本(元/(10kW))、负荷等级、线路传输成本(元/(10kW))及线路容量上限(kV·A)。

(1) 故障发生后,首先快速定位故障并隔离故障,然后确定非故障失电区、故障支路下游 DG 及其容量,再根据 DFS 算法确定 DG 在非故障失电区中各无分支供电路径上的最大供电范围^[16],以缩小搜索空间,提高算法效率。假设图 1 中所有节点都处于非故障失电区,表 1 为各 DG 无分支供电路径

DG 孤岛外故障恢复的有序二元决策图模型。

4.1 OBDD 建模

4.1.1 图论模型

用含有 n 个节点的简单无向图 $G = (V, E)$ 来表示配电网,其中图 G 的节点集合用 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示,连接节点边的集合用 E 表示。

定义1: G 的邻接矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 为 n 阶方阵,若 v_i 和 v_j 之间有闭合开关,则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$, 否则为 0。

定义2: G 的可达矩阵 $P = [\rho_{ij}]_{n \times n}$ 为 n 阶方阵,若存在从节点 v_i 到节点 v_j 的路径,则 $\rho_{ij} = 1$, 否则为 0。

其中 a_{ij} 和 ρ_{ij} 均为布尔决策变量,为提高算法效率,本文可达矩阵采用 Warshall 算法^[17]计算。

4.1.2 布尔函数约束模型

(1) 电源约束 C_1

$$\rho_{ij} = 0 \quad i, j \in \Omega_{PS} \quad (8)$$

式中, Ω_{PS} 为系统电源节点集合。该布尔函数表示系统电源之间不存在联系,也就是每个负荷至多仅由一个电源供电。

(2) 负荷损失约束 C_2

$$\bigotimes_{i \in \Omega_{PS}, k \in \Omega_{Li}} \rho_{i-k} = 1 \quad (9)$$

式中, Ω_{Li} 为在故障定位及隔离后,闭合所有联络开关的情况下,与网供电源节点 i 所连通的所有负荷节点集合; \otimes 为逻辑与运算。该布尔函数的含义为使能恢复供电的负荷节点恢复供电。

(3) 辐射状约束 C_3

$$\bigotimes_{i, j \in \Omega_{ck}} a_{ij} = 0 \quad (10)$$

式中, Ω_{ck} 为环路集 Ω_c 的第 k 个环路; i, j 为第 k 个环路上的支路。该布尔函数的含义为供电区域保持辐射状。本文采用基环变换方法^[18]形成环路集 Ω_c 。

综上所述,故障恢复应满足的布尔函数约束条件为, $\exists \Omega_i \in \Omega$ (Ω_i 为解空间 Ω 的第 i 个恢复策略),使得:

$$C_{SRC} = C_1 \otimes C_2 \otimes C_3 = 1 \quad (11)$$

4.2 故障恢复步骤

将 DG 孤岛外故障恢复问题转化为约束满足的布尔型决策问题,用以求解 DG 孤岛外故障恢复的最优方案,具体步骤如下:

(1) 对失电区剩余网络负荷节点的数量和大小、一级联络开关^[19]和分段开关的数量进行统计,

并计算一级联络开关的转供容量(联络开关的转供容量等于支路 i, j 的容量裕度,其中支路 i, j 为从联络开关回溯到电源节点容量裕度最小的支路);对失电区剩余网络对外进行等效形成有序二元决策图的邻接矩阵 A 和可达矩阵 P ,并且基于基环变换方法获得环路集^[18]。

(2) 判断失电区剩余网络总负荷是否小于一级联络开关的转供容量之和,若不小于,则搜索失电区域的二级联络开关^[19]。

(3) 将失电区剩余网络负荷节点按位编码分为联络开关节点、末尾节点和分支节点,并将其两两组合对支路进行分区,其中包含末尾节点的分区不进行枚举组合,其余分区均任选一个本区中支路上的分段开关,再与联络开关进行枚举组合形成初始解空间。连通区域图如图3所示。节点1、8、11为末尾节点,节点3为分支节点,节点5、9为联络开关节点;支路1、2为A区,支路3、4为B区,支路5、6、7为C区,支路8为D区,支路9、10为E区,其中B、D区不包含末尾节点,因此从B、D区各任取一个分段开关,其余分段开关的开关保持不变,与联络开关11、12进行枚举组合生成初试解空间。

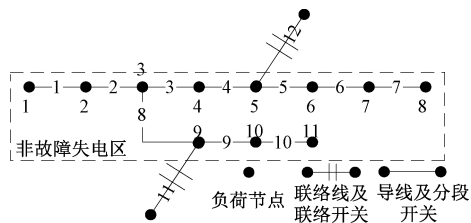


图3 失电区剩余网络连通区域图

Fig.3 Residual network connectivity area of power loss area

(4) 根据式(11)的约束条件大幅收缩解空间,并对解空间中的解逐个计算其潮流,判断节点电压和支路潮流是否越限,若越限,则进行寻优切负荷^[20],最后根据各故障恢复方案的目标函数大小进行排序,以此确定 DG 孤岛外故障恢复的最优方案。

5 算例分析

本文采用 IEEE33 节点配电系统和某地区 10kV 实际配电系统为例进行算例分析。

5.1 算例一

IEEE33 节点配电系统如图4所示,DG 的接入位置及容量等数据如表2所示。设节点 i 负荷按可控性分为可中断负荷和不可中断负荷,其中可中断负荷比例为 60%;按负荷的重要性分为一、二、三级

负荷,其相应的权重系数为 1、0.5、0.1,负荷等级及其特性数据如表 3 所示。节点负荷、支路阻抗等其他数据见文献[20]。

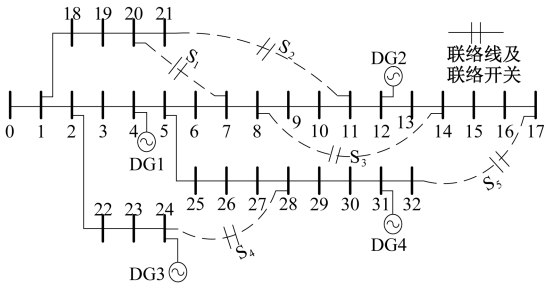


图4 接入 DG 的 IEEE33 节点系统图
Fig.4 IEEE33 node system diagram of accessing DG

表 2 IEEE33 节点 DG 的接入情况

Tab.2 DG access data for IEEE33 node				
DG 编号	DG 接入节点	有功功率/kW	功率因数	发电成本/(元/kW)
1	4	400	0.8	0.9
2	12	320	0.9	0.6
3	24	1000	0.85	0.8
4	31	500	0.8	0.5

表 3 负荷等级及其特性

Tab.3 Load levels and its characteristics	
负荷等级	节点编号
一级负荷	1,5,13,29,31
二级负荷	2,6,8,10,11,15,21,24,25,27,30
三级负荷	3,4,7,9,12,14,16~20,22,23,26,28,32
60%可中断负荷	3,4,9,12,15,21,25,27,32

采用 Matlab R2010a 编写故障恢复模型及求解算法,以下算例仿真均在 CPU 为 AMD A8-4555M、内存为 4GB 的 PC 机上进行。本文所提故障恢复模型假设配电网可实现实时监控、开关远程控制、DG 完全可控、用户参与互动等。

为验证本算法的有效性,本文模拟一个单重故障和一个双重故障进行故障恢复计算:①故障一:节点 3 附近发生永久性故障,分段开关 2-3、3-4 隔离故障;②故障二:节点 9 和 18 附近发生永久性故障,分段开关 8-9、9-10 和 17-18、18-19 隔离故障。

(1)DG 孤岛划分

采用本文动态 DG 孤岛划分算法得到的孤岛划分结果如表 4 所示(算法 I)。

不考虑负荷等级、DG 发电成本和线路传输成本,以负荷总量最大为目标的孤岛划分结果如表 5 所示(算法 II)。

表 4 DG 孤岛划分结果

Tab.4 Results of DG island partition				
DG 孤岛编号	孤岛内负荷节点编号	负载恢复量/kW	恢复负载总权值	运行成本/元
DG1	4,5,6,25	380	196	367.92
DG2	10,11,12,13	285	178.5	194.5
DG4	30,31,32	420	291	234.61

表 5 以负荷总量最大为目标的 DG 孤岛划分结果

Tab.5 Results of DG islanding with maximum load				
DG 孤岛编号	孤岛内负荷节点编号	负载恢复量/kW	恢复负载总权值	运行成本/元
DG1	4,5,6,25	380	196	367.92
DG2	11,12,13,14	300	162	197.13
DG4	15,16,17,31,32	480	267	256.04

由表 4 可见,采用算法 I 所得 DG 孤岛的负载恢复量均在 DG 容量范围内,说明本文的 DG 动态孤岛划分算法是可行的。比较表 4 和表 5 可知,算法 I 的负载恢复量小于算法 II,但是算法 I 的恢复负载总权值大于算法 II 并且运行成本小于算法 II,说明算法 I 能够保证重要负荷的供电,得到一个兼顾负荷等级和经济成本的全局最优解。

(2)整体故障恢复方案

故障一和故障二采用本文所述故障恢复算法所得故障恢复方案分别如表 6 和表 7 所示。

表 6 故障一恢复方案

Tab.6 Service restoration schemes of fault one					
序号	闭合的联络开关	打开的分段开关和可控负荷开关	F_1 /kW	F_2	F_3 /元
L ₁	S ₁ ,S ₃ ,S ₄	6-7,9-10,13-14,15-16,25-26,26-27,29-30,15,27	42.6	12	915.50

表 7 故障二恢复方案

Tab.7 Service restoration schemes of fault two					
序号	闭合的联络开关	打开的分段开关和可控负荷开关	F_1 /kW	F_2	F_3 /元
L ₂	S ₁ ,S ₃	13-14	0	3	490.52
L ₃	S ₁ ,S ₃ ,S ₅	13-14,16-17	0	5	475.46
L ₄	S ₁ ,S ₃ ,S ₅	13-14,15-16	0	5	478.00

为验证本文所提故障恢复算法的有效性,以文献[14]中的传统有序二元决策图(Order Binary Decision Diagram,OBDD)算法和文献[21]中的 NSGA-II 算法作为比较,其中传统 OBDD 算法采用本文所述的孤岛划分方法,NSGA-II 算法的参数设置如下:种群大小 $pop=40$,迭代次数 $gen=30$,交叉概率 $c_r=0.9$,变异概率 $mut=1/n$, n 为编码个数,模拟二进制

交叉参数 $\mu = 20$, 多项式变异参数 $mum = 20$ 。传统 OBDD 算法与本文所提故障恢复算法所得结果一致;故障一和故障二采用 NSGA- II 经 30 代变异、杂交、排序,最终求得位于 Pareto 前沿的故障恢复方案分别为 L_1 和 L_2 、 L_3 。

为验证本文故障恢复算法的效率,给出故障一和故障二分别采用三种方法所需的时间,结果如表 8 所示。为减小计算误差,表 8 中总时间为计算 5 次取平均值。

表 8 故障恢复时间

Tab. 8 Time consuming of service restoration		
故障序号	故障恢复方法	总时间/ms
故障一	本文故障恢复方法	278
	传统 OBDD 方法	1833
	NSGA- II 算法	2476
故障二	本文故障恢复方法	440
	传统 OBDD 方法	1336
	NSGA- II 算法	1981

故障一和故障二参与决策的开关数分别为 11 和 8,传统 OBDD 算法的初试解空间个数分别为 2^{11} (2048) 和 2^8 (256),经约束条件将解空间个数收缩至 97 和 24;本文故障恢复算法经节点类型按位编码分区后所得初试解空间个数分别为 16 和 48,再经约束条件将解空间个数收缩至 1 和 5。由此可见本文故障恢复算法计算效率远远大于传统 OBDD 算法。而 NSGA- II 算法需要的时间分别为 2476ms 和 1981ms,这是因为 NSGA- II 算法的交叉和变异操作会产生无效解或重复解,计算这些解的适应度函数以及进行 Pareto 排序需要花费大量的时间。

5.2 算例二

某地区 10kV 配电网如图 5 所示。其中馈线 A 首端变压器额定容量为 $20MV \cdot A$,包含 67 个节点,3 个联络开关,总有功负荷 6434.3kW,总无功负荷 1252.86kVar,并将负荷节点分为工业、商业和居民,其相应的权重系数为 0.45、0.35 和 0.2,节点 53 为

某公司建有的 2.1MW 光伏发电并网项目,发电成本 0.6 元/kW,该馈线的分布式电源渗透率为 30.9%。

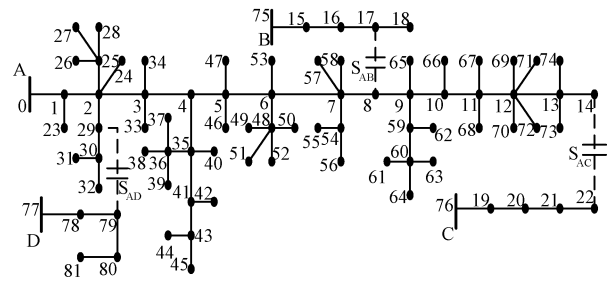


图 5 某地区 10kV 配电网网络拓扑图
Fig. 5 Regional 10kV distribution network topology

本文采用 BP 神经网络进行光伏发电出力预测^[22],神经网络进行 473 次迭代训练精度达到 0.01,平均相对误差为 4.493%,训练时间为 8.157s,光伏出力预测结果如图 6 所示。

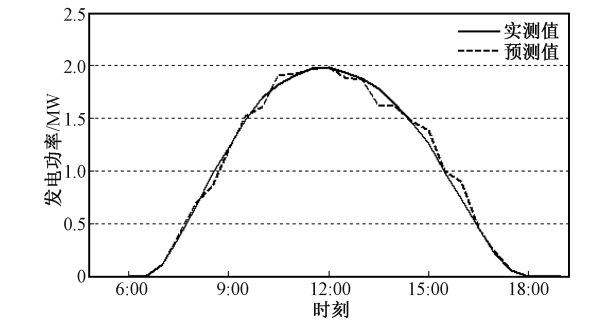


图 6 光伏出力预测结果
Fig. 6 Forecasting result of photovoltaic output

假设早上 8:00 在馈线 A 支路 0-1 发生故障,故障持续时间为 4h,断开分段开关 0-1 进行故障隔离,采用本文所提算法得到 8:00 ~ 12:00 间的故障恢复方案,结果如表 9 所示。表 9 中的恢复方案均满足故障恢复的约束条件,且平均故障恢复时间为 1.4703s,可见本文所提故障恢复算法是有效的。

表 9 故障恢复方案

Tab. 9 Service restoration schemes						
时段	DG 出力/kW	闭合的联络开关	操作的分段开关	F_1 /kW	F_2	F_3 /元
8:00 ~ 9:00	935	S_{AB}, S_{AC}, S_{AD}	5-6, 6-7, 48-49, 48-51, 9-65, 9-10, 60-64, 11-12, 35-36, 35-41	342.5075	14	751.8092
9:00 ~ 10:00	1450	—	4-5, 48-49, 48-51, 5-6, 36-37, 35-36, 35-41, 5-46	241.4855	8	1173.264
10:00 ~ 11:00	1800	—	35-36, 35-41, 4-5, 5-46, 5-6, 6-7, 7-8, 7-58, 9-65, 9-10	130.5	10	1490.1471
11:00 ~ 12:00	1945	—	7-58	109.34	1	1613.9058

6 结论

本文提出了一种简单、快速、实用的含分布式电源配电网的故障恢复算法,研究表明:

(1)本文提出的含多 DG 的配电网孤岛划分方法可综合考虑 DG 发电成本、网损及负荷优先级,能保证孤岛内重要负荷的供电及功率平衡,有效提高孤岛的供电质量和供电可靠性。

(2)本文提出的 DG 孤岛外故障恢复方法通过将非故障失电区负荷节点根据节点类型按位编码进行分区,枚举生成初始解空间,再根据 OBDD 模型的约束条件进一步收缩解空间,最后对收缩后解空间的解进行校验,寻优切负荷及排序以获得全局最优解。该方法大幅缩短了故障恢复时间。

(3)本文提出的含分布式电源配电网故障恢复方法综合考虑负荷损失量、开关操作次数以及经济性三个方面,可处理单重故障和多重故障。

参考文献 (References):

[1] Selvam M M, Gnanadass R, Padhy N P. Initiatives and technical challenges in smart distribution grid [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 911-917.

[2] 杨丽君, 魏玲玲, 卢志刚, 等 (Yang Lijun, Wei Lingling, Lu Zhigang, et al.). 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复 (Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 73-80.

[3] 卢志刚, 刘照拯, 张晶, 等 (Lu Zhigang, Liu Zhaozheng, Zhang Jing, et al.). 含分布式电源的配电网灾后分阶段抢修策略 (Staged rush repair strategy of distribution networks with distributed generators after disaster) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (1): 69-74.

[4] 冯雪平, 梁英, 郭炳庆 (Feng Xueping, Liang Ying, Guo Bingqing). 基于图论的含分布式电源配电网供电恢复动态规划方法 (A dynamic programming method based on graph theory for restoration of distribution system with DGs) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (9): 24-29.

[5] 王旭东, 林济铿 (Wang Xudong, Lin Jikeng). 基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分 (Island partition of the distribution system with distributed generation based

on branch and bound algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (7): 16-20.

[6] Chen C S, Cho M Y. Determination of critical switches in distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7 (3): 1443-1449.

[7] 李志铿, 王钢, 陈志刚, 等 (Li Zhikeng, Wang Gang, Chen Zhigang, et al.). 基于区间潮流的含分布式电源配电网故障恢复算法 (An interval load flow based algorithm for service restoration in distribution network with distributed generations) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (24): 53-58.

[8] 于浩明, 江亚群, 黄纯, 等 (Yu Haoming, Jiang Yaqun, Huang Chun, et al.). 基于定位有序树和模糊集评价的配电网故障恢复 (Fixed position ordered tree and fuzzy evaluation based algorithm for fault restoration in distribution networks) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (1): 75-80.

[9] 赵晶晶, 杨秀, 符杨 (Zhao Jingjing, Yang Xiu, Fu Yang). 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究 (Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (17): 45-49.

[10] 黄弦超 (Huang Xianchao). 含分布式电源的配电网故障恢复模型 (Model of service restoration of distribution systems with distributed generation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (19): 52-57.

[11] 黎恒烜, 孙海顺, 文劲宇 (Li Hengxuan, Sun Haishun, Wen Jinyu, et al.). 含分布式电源的配电网多代理故障自恢复系统 (A multi-agent system for reconfiguration of distribution systems with distributed generations) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (4): 49-56.

[12] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等 (Wang Zengping, Yao Yuhai, GuoKunya, et al.). 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复 (Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (20): 185-192.

[13] 王昌照 (Wang Changzhao). 含分布式电源配电网故障恢复与可靠性评估研究 (Research on service restoration and reliability evaluation of distribution network with distributed generation) [D]. 广州: 华南理工大学 (Guangzhou: South China University of Technology), 2015.

- [14] Bae I S, Kim J O. Reliability evaluation of customers in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (3): 1416-1422.
- [15] 易新, 陆于平 (Yi Xin, Lu Yuping). 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法 (Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (7): 50-54.
- [16] 孙洁, 王增平, 王英男, 等 (Sun Jie, Wang Zengping, Wang Yingnan, et al.). 含分布式电源的复杂配电网故障恢复 (Service restoration of complex distribution system with distributed generation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2014, 42 (2): 56-62.
- [17] Höfner P, Möller B. Dijkstra, Floyd and Warshall meet Kleene [J]. Formal Aspects of Computing, 2012, 24 (4-6): 459-476.
- [18] 黄弦超, 杨雨, 范闻博 (Huang Xianchao, Yang Yu, Fan Wenbo). 配电网多故障抢修与供电恢复联合优化模型 (Combined optimization model for maintenance scheduling and service restoration of distribution system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (11): 68-73.
- [19] 吴文传, 张伯明 (Wu Wenchuan, Zhang Boming). 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法 (A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration.) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27 (12): 50-54.
- [20] 陈春 (Chen Chun). 智能配电网自愈控制关键技术与方法研究 (Research on self-healing control key technologies and methods of smart distribution systems) [D]. 长沙: 湖南大学 (Changsha: Hunan University), 2016.
- [21] Sanches D S, Junior J B A L, Delbem A C B. Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 110 (5): 144-153.
- [22] 袁晓玲, 施俊华, 徐杰彦 (Yuan Xiaoling, Shi Junhua, Xu Jieyan). 基于BP神经网络的光伏发电短期出力预测 (Short-term power forecast for photovoltaic generation based on BP neural network) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2013, 31 (7): 11-16.

Service restoration algorithm for distribution network with distributed generation based on graph theory and OBDD

MIAO Hui¹, DING Xiao-qun¹, YE Chen-hui¹, ZHANG Xiao-long²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to quickly determine the optimal solution for service restoration of distribution network with distributed generation, we first propose a graph model based on improved Bellman-Ford algorithm for islanding of multi-DG distribution network, which considers DG costs, network loss and load priority to determine the island range, and then transform it into island running to improve the reliability of power supply for important loads. Then the external service restoration of DG island is converted to the three-step method of constraint satisfaction problem. Firstly, the load buses are partitioned by bit according to the bus type and the initial solution space is generated through enumeration. Secondly, the constraint functions of power source, load loss and radiation are defined as the OBDD model to substantially reduce the scale of the solution space. Thirdly, each service restoration scheme in the space is checked, load shed and prioritized, then, the optimal service restoration scheme is obtained according to the sorting result. Finally, the feasibility and effectiveness of the service restoration algorithm are verified by the calculation results of IEEE33 system and a regional 10kV distribution network.

Key words: distributed generation; service restoration; island partition; OBDD; distribution network