

DOI: 10.7667/PSPC171098

## 基于有序二元决策图的分布式电源组网重构及其 对配电网风险水平的影响

董新<sup>1</sup>, 李莉<sup>1</sup>, 李嫣然<sup>1</sup>, 于光波<sup>1</sup>, 巩晓静<sup>1</sup>, 沈倩<sup>1</sup>, 潘杰<sup>2</sup>

(1. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012; 2. 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

**摘要:** 配电网主网发生故障后微网将转入孤岛运行模式而脱离主网支撑。为了保证负荷有最大程度的功率支持进而降低整个配电网的失电风险水平, 将有序二元决策图(OBDD)应用到分布式电源组网及重构策略的搜索过程中。提出了基于有序二元决策图(OBDD)的分布式电源组网重构的四阶段方法, 将含分布式电源的配电网故障后的组网、重构策略搜索问题等效为配电网中所有传输线路的通断问题。构建配电网的 OBDD 模型和目标函数, 建立各约束条件的布尔表达式并求解, 从而获得组网重构策略。针对配电网元件数目多、故障率高的特征, 采用改进状态抽样法评估配电网风险水平, 提高评估速度。实验证明, 所提出的方法能够快速获得可行以及最优的组网和重构策略, 并降低配电网的失电风险。

**关键词:** 配电网; 风险; 有序二元决策图; DG 组网; 重构

### Islanding and reconstruction strategies of distribution network with microsources based on the ordered binary decision diagrams and their effect on the risk level of the network

DONG Xin<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, LI Yanran<sup>1</sup>, YU Guangbo<sup>1</sup>, GONG Xiaojing<sup>1</sup>, SHEN Qian<sup>1</sup>, PAN Jie<sup>2</sup>

(1. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 2. School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** The microgrids will break away from the main network and turn into an island operation mode when faults occur. In order to support the load with sufficient power to reduce the risk level, the Ordered Binary Decision Diagram (OBDD) is used to search the islanding and restoration strategies of distribution network. A four-phase method is proposed, in which the strategies can be equivalent to the on-off state of lines. The OBDD models, objective function of the network and the Boolean expressions of all constraints are established and solved to obtain the islanding and restoration strategies. Because the distribution network has a large number of components and high failure rate, a modified state sampling method is used to evaluate the risk level. Experimental results show that islanding and reconfiguration strategies can be searched efficiently and the risk level of the network is reduced using the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707111).

**Key words:** distribution network; risk; ordered binary decision diagrams; islanding strategies of DGs; reconfiguration

## 0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)组网及重构是智能配电网中自愈功能建设的关键技术之一。配电网故障发生后, 可通过形成以 DG 为中心的电力孤岛, 并切换通向其他馈线的联络开关的状

态, 尽可能多地恢复重要负荷的供电。此举可有效降低配电网运行的风险水平, 一并提高 DG 利用率。

很多学者提出利用高速通信网络和广域信息构成实时的解列系统实时监测系统状态, 动态确定解列点和动作时序<sup>[1-4]</sup>。文献[5]提出智能配电网可以根据自动网络重构来使停电的时间和区域最小, 即系统故障时 DG 可根据其发电容量带起相邻匹配负荷动态形成孤岛, 以最大限度地降低系统的实时风

险水平。其实现需实时获得系统拓扑结构、DG 发电容量、发电特性以及负荷水平实时变化曲线等，并需借助高速通信网络。

文献[6]原创性地提出了利用有序二元决策图(Ordered Binary Decision Diagram, OBDD)解决发输电电网主动解列分区问题的方法。主要原理是将发输电电网解列策略等效成用布尔变量表示的各支路的通断问题，将多约束问题用布尔函数描述，生成布尔函数的有序二元决策图并搜索可行解。随着 DG 渗透率的提高，配电网正逐步具备与输电网类似的结构和运行特性，使得 OBDD 方法有应用到搜索 DG 组网重构策略的可能性。但在应用中，与输电网解列分区相比，配网的 DG 组网重构有以下不同：

1) 输电网解列之前需要事先指定同调机群，配电网中的 DG 无同调要求。

2) 输电网解列之前根据事先指定的同调机群已经事先确定了孤岛个数以及各个孤岛内的电源组合；而含 DG 的配电网不考虑同调要求，解列方式更灵活，无法事先确定孤岛个数以及孤岛内的电源组合。

3) 输电网解列要求尽量保证所有负荷点与其中某个孤岛相连；而配网故障停电后，DG 一般不能负担所有负荷点的供电，会有负荷在孤岛之外，但需要尽可能保证 DG 能给更大范围的负荷供电。配电网孤岛组网需计及负荷节点的重要性权重，尽量降低整个配电网的失电风险指标。

4) 输电网的网络结构为网状结构，配电网的网络结构为树状结构。因此，输电网解列和配电网组网在连通性方面的约束不同。

在此，本文根据配网的结构特征以及 DG 组网重构的约束要求，以尽可能降低配电网风险水平为目标，将有序二元决策图(OBDD)应用于配网故障后 DG 组网重构最优策略的搜索中去，采用能够快速量化配网安全性的改进状态抽样法<sup>[7-8]</sup>评价配网系统风险水平，考察本文组网重构策略对风险指标的改善程度。

## 1 配电网风险评估方法及指标

配电网的风险评估过程包含四部分<sup>[9-11]</sup>：确定元件停运模型、选择系统状态、分析状态后果<sup>[12-15]</sup>、计算风险指标。其中，元件停运模型采用马尔科夫模型<sup>[16-17]</sup>，系统状态选择方法采用考虑系统时序特性且占用内存小、计算速度快的改进状态抽样法，采用停电电量风险指标评价配电网风险水平。

### 1.1 改进状态抽样法的步骤

Step1 采用非序贯蒙特卡洛模拟法对系统状态进行抽样，获得容量为  $N$  的样本空间  $S=[X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N]$ 。假定对配电网进行 24 h 风险评估。

Step2 在时间轴 $[0, 24]$ 上随机抽样  $N$  个随机数  $T=[t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_N]$ ，视为各个样本发生的起始时刻。

Step3 将有元件故障的状态样本统称为有效样本，有效样本集合记作  $S_Y$ ；其余样本容量记做  $N_Y$ ，其指标测试函数为 0。

Step4 某一系统样本  $X_k \in S_Y$ ，此时该样本的状态单一，该状态记为样本的中心状态  $X_{k,center}$ 。  $t_k$  为中心状态的起始时刻。采用状态转移法从中心状态开始向左向右抽样，直至抽到系统正常状态为止。将时间轴上这些连续的故障状态集合称为该样本的故障状态序列。样本  $X_k$  的持续时间变成扩展序列中各子状态持续时间之和。

该方法省去了模拟过程中对系统正常运行时间的累计，不用分别累计和储存各元件的无故障时间和故障时间，可以节省内存提高效率。

### 1.2 配电网风险评估的步骤

1) 确定元件停运模型。

2) 采用改进状态抽样法，抽取系统状态并将其扩展成故障状态序列。

3) 按式(1)计算故障状态序列  $i$  的概率  $P_{sequence,i}$ 。

$$P_{sequence,i} = p_{center,i} \times \prod_{j=1}^r p_j = \frac{n_i}{N} \times \sum_{j=1}^r p_j \quad (1)$$

式中： $p_{center,i}$  是采用非序贯蒙特卡洛法抽样所得系统状态  $X_i$  的概率； $p_j(j=1, 2, \dots, r)$  为该序列由系统状态  $X_i$  向左向右共  $r$  次状态转移的转移率。

4) 采用最小时段分割法<sup>[7]</sup>求各个负荷点停电时间、停电电量。

5) 按式(2)计算系统停电电量风险指标(System Energy Not Supplied, SENS)。

$$SENS = \sum_{k=1}^n \lambda_k \times \left( \sum_{i=1}^{N_Y} P_{sequence,i} \times W_{i,k} \right) \quad (2)$$

式中： $n$  为系统负荷节点总数； $\lambda_k$  为负荷节点  $k$  的权重； $W_{i,k}$  为负荷节点  $k$  在状态序列  $i$  期间的停电电量。

## 2 利用有序二元决策图(OBDD)求解多约束问题原理

### 2.1 二元决策图(BDD)

有 0-1 两种逻辑状态的变量称为布尔变量，布尔变量通过“与”、“或”等运算复合而成的函数称

为布尔函数。如式(3)所示,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  为布尔变量,  $F$  为布尔函数。

$$F = x_1 \otimes x_2 \otimes x_3 \otimes x_4 \quad (3)$$

二元决策图(Binary Decision Diagram, BDD)是一种描述布尔函数的有向非循环图。给定一个布尔函数  $F$ , 按照一定的变量顺序, 如指定变量顺序为  $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$ , 可以画出它的树状取值结构图, 如图 1 所示。代表  $F$  取值的 1 和 0 称为“1 端节点”和“0 端节点”; 只有一个变量节点的入度为 0, 称其为“根节点”; 其他节点称为“变量节点”。

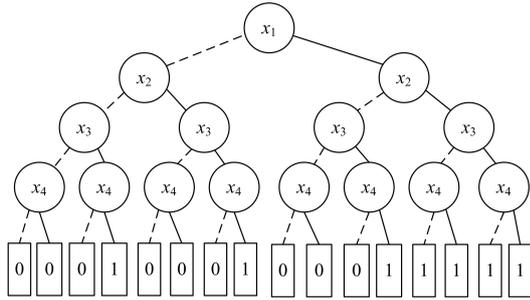


图 1  $F = x_1 \otimes x_2 \oplus x_3 \otimes x_4$  的 OBDD  
Fig. 1 OBDD of  $F = x_1 \otimes x_2 \oplus x_3 \otimes x_4$

通过从端节点 1 自下而上的搜索, 便可得到所有使布尔函数取值为 1 的可满足性解, 也就是布尔表达式成立的布尔变量的取值组合。

随着变量个数的增多, BDD 图中变量节点的数目会成指数型增长, 图的规模爆炸性扩大, 对可满足性解进行搜索的工作量随之变得庞大。

## 2.2 有序二元决策图(OBDD)

对 BDD 进行最大程度的化简, 可得有序二元决策图(OBDD)。与 BDD 相比, OBDD 没有重复节点和冗余节点, 当布尔变量顺序确定时, OBDD 图的规模被最大程度地简化且是唯一的, 且 OBDD 图的规模随变量节点数目呈线性增长, 搜索布尔函数可满足性解所费时间仅为布尔变量个数的多项式。

对于给定的布尔函数, 形成相应的有序二元决策图(OBDD)的步骤如下。

- 1) 确定所有布尔变量的顺序;
- 2) 根据布尔函数的真值表和布尔变量顺序画出二元决策图(BDD);
- 3) 化简重复的树叶(端节点 1 和 0 为树叶): 仅保留两个树叶, 将原来连在同一类树叶上的所有边重新连在被保留的同一类树叶上;
- 4) 简化重复的变量节点: 如果变量节点  $v$  和  $u$  是重复的节点, 则去掉其中一个, 比如去掉  $u$ , 并将原来连在  $u$  上的所有边均连至  $v$  上, 重复这一操作, 直至不存在重复的变量节点为止;

5) 简化冗余节点: 如果变量节点  $v$  是冗余节点, 则去掉  $v$ , 并将原先连在  $v$  上的所有边均连至  $v$  原先所连的节点上, 重复这一操作, 直至不存在冗余的变量节点为止。

对图 1 的 BDD 进行简化, 经图 2(a)最终获得最简 OBDD 如图 2(b)所示。

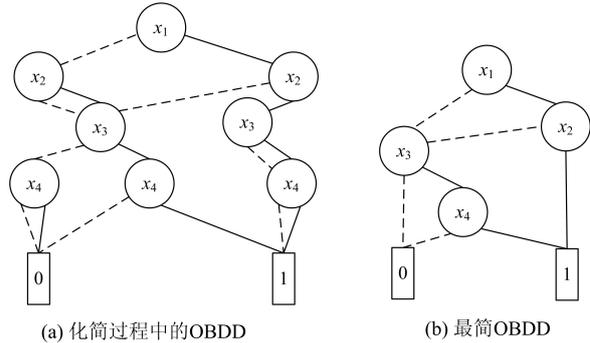


图 2  $F = x_1 \otimes x_2 \oplus x_3 \otimes x_4$  OBDD 的简化  
Fig. 2 Simplification and OBDD of Fig. 1

因而在利用二元决策图求解约束条件满足性问题时, 可先将布尔函数化简成 OBDD, 再自下而上搜索使布尔函数等于 1 的解。应用 OBDD 求解布尔函数可通过 BuDDy 软件包实现。

## 2.3 BuDDy 软件包简介

BuDDy 是一个可以在 C 语言环境下使用的 BDD 软件包, 支持几乎所有标准的 BDD 运算和操作。可在 C 环境下编写程序实现 BDD 运算。编程时, 根据编程需要, 结合 C 语言语句并参照 BuDDy 软件包指令录, 定义布尔变量, 利用指令生成布尔函数的 OBDD 并求解, 就可以高效快速地实现很多复杂的 BDD 运算。

该软件包采用深度优先算法, 可实现最简有序二元决策图运算, 之前所说的 OBDD 实际上就指最简有序二元决策图。运算过程中利用动态规划, 避免重复 BDD 节点之间的运算, 能够自动低耗地完成垃圾回收。

## 3 基于 OBDD 的配电网故障后 DG 组网重构策略

将配电网故障后微网的组网和重构问题用布尔函数描述, 并生成该布尔函数的 OBDD。将含 DG 的配电网故障后组网策略的搜索问题等效为配电网中所有传输线的通断问题, 将各开关支路的通断各用一个布尔变量表示, 将组网的约束条件用布尔函数表示, 搜索使布尔函数取值为 1 的所有布尔变量的解, 即为各支路的通断状态, 取值为 0 的布尔变量所代表的支路就是配网故障后需要开断的支路, 由

此可以得到所有满足约束条件的 DG 组网或重构策略。

### 3.1 配电网故障后 DG 组网重构的目标函数及约束条件

故障导致整个配电馈线停电后, DG 组网和重构的目的在于降低整个配电网的失电风险, 因而 DG 组网和重构的目标函数即为使整条馈线的失电风险指标值最小。对于某一故障状态, 指标中的概率值已确定, 目标函数变成使整个配网负荷点停电电量权重和最小, 如式(4)。

$$F = \min \sum_{k=1}^{n_{Load}} \lambda_k W_k \quad (4)$$

式中:  $n_{Load}$  为配网负荷节点总数;  $\lambda_k$  是节点  $k$  的重要性权重;  $W_k$  是节点  $k$  的停电电量。

DG 组网和重构时必须满足一定的约束条件, 这些约束条件总结如下。

1) 必然性约束(Defined Result Constraint, DRC): 要求某些支路必须断开或连接。

2) 功率平衡约束(Power Balance Constraint, PBC): 保证所形成的某一个孤岛内的净功率满足式(5)和式(6)。

$$d_1 < \sum_{i=1}^{n_G} P_{Gi} + P_C - \sum_{j=1}^{n_L} P_{Lj} < d_2 \quad (5)$$

$$d_1 = 5\% \times \sum_{i=1}^{n_L} P_{Li} \quad (6)$$

$$d_2 = 10\% \times \sum_{i=1}^{n_L} P_{Li} \quad (7)$$

式中:  $n_G$  代表该孤岛内的 DG 节点数目;  $n_L$  代表该孤岛内负荷节点数目。如果孤岛内的净功率小于  $d_1$ , 说明故障内 DG 功率不足则孤岛的范围必须缩小, 如果孤岛内净功率大于  $d_2$ , 说明孤岛内 DG 功率过剩较多, 孤岛的范围需要扩大, 尽可能保证更多负荷的供电。

3) 孤岛外约束(Outside the Island Constraint, OIC): 有些负荷点因被排除在所有孤岛之外而处于停电状态, 这些负荷点之间的支路开关断开与否无影响, 因此没必要断开, 这在搜索可行解时可省去大量多余的无意义的解。

4) 联络线容量约束(Tie-line Capacity Constraint, TCC): DG 组网完成后, 可进一步通过合上与另一条馈线之间的联络开关实现重构, 联络开关所在联络支路有容量约束要求, 可将支持馈线等效成一个节点, 该节点通过联络开关与故障馈线相连, 该节点的等效输出功率等于该联络线的最大容量约束。在式(5)中岛内净功率里加上等效节点的输出功率  $P_C$ 。

$$d_1 < \sum_{i=1}^{n_G} P_{Gi} + P_C - \sum_{j=1}^{n_L} P_{Lj} < d_2 \quad (8)$$

5) 形成的孤岛应尽量位于馈线或分支馈线末端: 不会影响孤岛外负荷点经过重合闸等方式恢复供电。这一约束可以通过提高馈线末端负荷点的节点重要性权重实现, 即越靠近馈线末端负荷点越优先纳入孤岛。

采用 OBDD 进行多约束问题可行解的搜索, 对搜索到的可行解分别进行目标函数计算, 按从小到大排序, 使目标函数最小的解即为满足约束条件且能使整个配电网失电风险水平降到最低的 DG 组网策略, 该组网策略能最有效地降低配电网风险水平, 最大限度地提高 DG 的利用效率。

### 3.2 基于 OBDD 的配电网故障后 DG 组网重构的四阶段方法

以图 3 所示系统为例, 假设配网中馈线 F1 中元件 1 发生永久性故障, 故障发生后馈线 F1 内 DG 进行组网转为孤岛运行, 1 h 后故障隔离同时通过手动合上联络开关(14)实现一级支持馈线 F2 对孤岛的供电支持, 因功率平衡改变各孤岛范围将随之变化, 即实现重构。从重构到故障修复期间, 通过实时减载和切机装置维持孤岛内功率平衡。

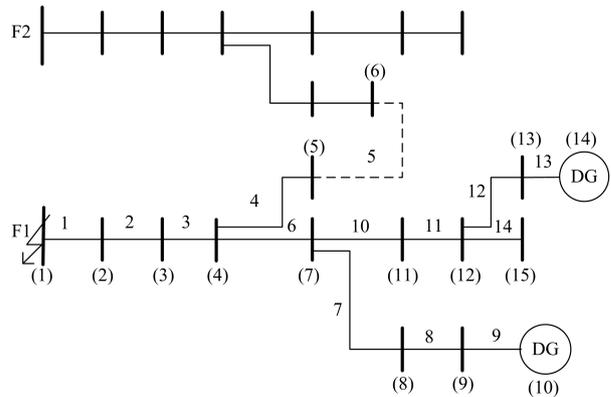


图 3 含 DG 的某配电网馈线结构图

Fig. 3 An example of a distribution network

基于 OBDD 的配网故障后 DG 组网重构策略搜索分为以下四个阶段。

#### 3.2.1 第一阶段: 初始化含 DG 配网的 OBDD 模型

1) 获取系统状态。包括节点总数  $N_n$ 、各开关支路的通断状态、各节点负荷功率、DG 功率、各负荷节点权重等。敏感负荷即不可间断供电的负荷节点、接有 DG 的馈线末端的负荷节点以及其他对供电可靠性要求高负荷节点, 权重赋值大。例如图 3 中, 加括号的数字代表节点编号, 不加括号的数字代表布尔变量编号, 包含联络开关支路在内的布

尔变量个数为 14 个。由于各布尔变量之间没有相乘关系, 布尔变量顺序对 OBDD 规模影响不大, 故按深度优先设定布尔变量顺序。

2) 生成维数为  $N_n \times N_n$  系统的节点连接矩阵  $M$ 。 $M$  中的元素  $m_{ij}$  表示  $i, j$  节点之间的直接连接关系, 用 BuDDy 软件包中的 bdd 指令将节点连接矩阵  $M$  中的元素  $m_{ij}$  全部定义成布尔变量, 若取值为 1 代表两节点之间有一条支路直接连接, 为 0 代表两节点之间没有支路。

3) 由  $M$  生成系统的节点连通矩阵  $A$ 。其元素  $a_{ij}$  也定义为布尔变量, 取值为 1 代表两节点之间通过一条或几条支路有连通关系, 0 代表两节点之间不能连通。式(9)给出由  $M$  生成  $A$  的方法。对  $a_{ij}$  的值进行  $N_n$  次迭代, 初值  $a_{ij}^{(0)} = m_{ij}$ , 式(9)表示节点  $i, j$  直接相连或通过若干个节点间接相连  $a_{ij}$  的取值均为 1。

$$a_{i,j}^{(t+1)} = a_{i,j}^{(t)} \oplus a_{i,h}^{(t)} \otimes a_{h,j}^{(t)} \quad (9)$$

$$(h = 1, 2, \dots, N_n \quad t = 0, 1, \dots, N_n - 1)$$

3.2.2 第二阶段: 建立 DG 组网约束(Islanding Constraint, IC)的布尔函数并求解

1) 建立必然性约束条件(DRC)的 OBDD

组网过程中, 一级支持馈线的联络开关处于断开状态, 因此将联络开关支路集合  $A_{tie}$  中的布尔变量取值强制为 0, 即式(10)。

$$a_{p,q} = 0 (a_{p,q} \in A_{tie}) \quad (10)$$

2) 建立功率平衡约束条件(PBC)的 OBDD

$$PBC = \prod_{i \in I_G} \left\langle d_{i,1} < \sum_{j=1}^N (a_{i,j} \times P_j) < d_{i,2} \right\rangle \quad (11)$$

式中:  $I_G$  代表 DG 节点集合;  $N$  为馈线总节点个数;  $a_{ij}$  为节点连通矩阵  $A$  中的元素, 代表 DG 节点  $i$  与各节点之间的连通关系;  $P_j$  代表节点  $j$  发出的功率(负荷节点功率取负值, DG 节点功率取正值)。上式意义为, 保证与某个 DG 有连通关系的节点集合的净功率在  $d_1$  和  $d_2$  之间, 保证该集合内 DG 供电量充裕且不剩余过多。在并不知道形成几个孤岛, 各孤岛含几个 DG 的前提下, 上式可将多个 DG 可能组成的各种供电组合考虑在内, 不会漏解。

3) 建立孤岛外约束条件(OIC)的 OBDD

$$OIC = \prod_{m_{i,j} \in \{0\}} \left\langle (!PBC) \mid (m_{i,j} \rightarrow 1) \right\rangle \quad (12)$$

式中,  $m_{i,j} \in \{0\}$  代表节点连接矩阵中的值为 0 布尔变量元素(代表断开的支路),  $m_{i,j} \rightarrow 1$  表示试着将断

开的支路重新合上。OIC 成立的条件是, 如果将某一断开的支路合上能够改变其中一个 DG 所在孤岛的净功率(使 PBC 约束不满足), 那么该支路的确应该断开( $m_{i,j}=0$ ), 除此之外, 那些断开再合上并不改变所有 DG 所在孤岛净功率的支路(即被所有孤岛排除在外的负荷点)没有必要断开。换句话说, OIC=1 成立时, 所有取值为 0 的布尔变量所代表的支路均为孤岛解列时需要断开的支路, 不包含可断可不断的支路。

4) 将以上 3 个约束条件的布尔函数进行“与”运算生成 OBDD 并求解。

$$IC = DRC \otimes PBC \otimes OIC = 1 \quad (13)$$

利用 BuDDy 软件包中求解 OBDD 的指令, 求解使 DG 组网约束(IC)成立的所有可行解。求得的所有布尔变量的取值中, 取值为 0 的布尔变量对应的支路即为 DG 组网时需要断开的支路。

5) 求所有可行解的目标函数, 并从小到大排序, 获得可使整个系统失电风险最低的 DG 组网策略, 供运行人员参考。

3.2.3 第三阶段: 建立 DG 重构约束(Reconfiguration Constraint, RC)的布尔函数并求解

假设故障发生 1 h 后, 故障隔离完成。将故障馈线与支持馈线的联络开关合上进行网络重构。将必然性约束式(10)中的 0 改为 1, 根据式(8)将功率平衡约束(11)修正成联络线容量约束, 孤岛外约束的布尔函数与式(12)相同, 重新生成式(13)并搜索其可行解, 并按目标函数大小排序, 得到故障修复之前的最优重构策略, 供运行人员参考。

3.2.4 第四阶段: 重构微网的实时减载与实时切机

从 DG 重构到故障修复前的期间内, 采用实时减载装置, 根据重构网络内的实际功率缺额, 从节点权重最小的负荷开始切除负荷, 直至满足功率平衡为止。当有功过剩、无功不平衡时, 采用实时切机和实时投切电容器等装置, 提高重构微网的运行稳定性。

## 4 算例分析

采用图 4 所示算例测试本文方法的效果。图 4 系统有 3 条馈线, 其中馈线 F2 上配置有 9 处分布式电源, F1 和 F3 作为 F2 的支持馈线, 通过常开的联络开关与之相连。采用深度优先法对布尔变量(即支路)进行编号。负荷功率和 DG 出力采用 24 h 负荷曲线(将功率曲线以 1 h 为单位划分, 1 h 内取平均值)。设  $t=0$  时刻在馈线 F2 的支路 1 处发生故障, 假设故障隔离与负荷转带时间为 1 h。

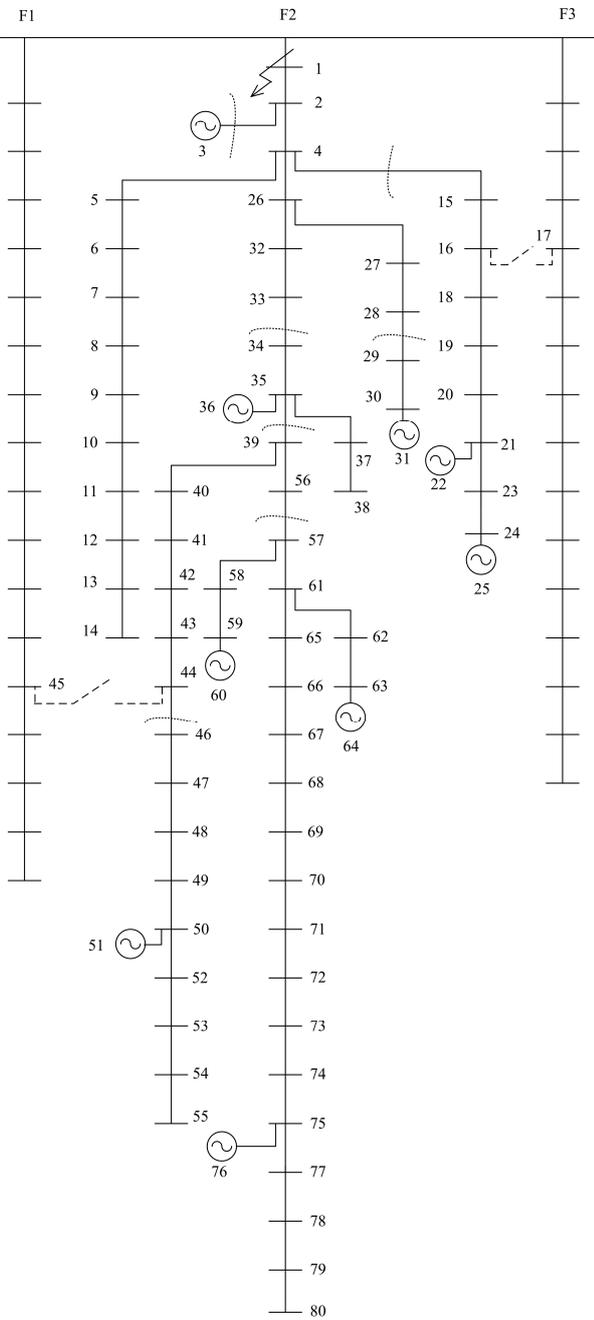


图4 测试系统结构及故障发生后最优组网策略  
 Fig. 4 Test system structure and optimum islanding strategy after fault

故障发生后立刻进行 DG 组网策略搜索，得到可行策略 54 种。表 1 给出使目标函数小的前七种组网方案，其中序号为 1 的方案作为最优组网策略，其结果在图 4 中标出，虚线为需要开断的支路。1 h 后故障隔离完成，手动合上联络开关 17、45，采用本文算法进行网络重构。表 2 给出搜索所得的目标函数最小的七种重构策略。序号 1 为最优重构策略，

其结果在图 5 中标出。在该重构策略的基础上，进行实时负荷削减与切机，直到故障修复为止。

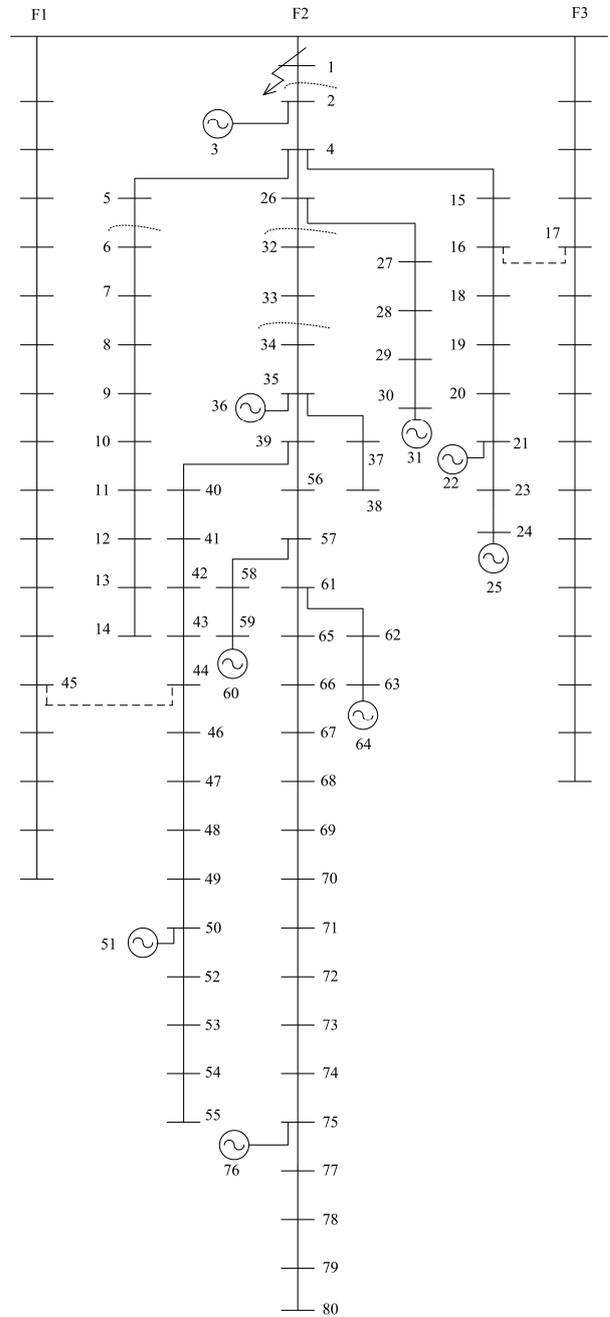


图5 测试系统故障隔离后最优重构策略  
 Fig. 5 Optimum configuration strategy after test system fault isolation

由结果可以看出，该配网支路 1 处发生故障后，可将支路 3、15、29、34、39、46、57 断开，由此形成 5 个含 DG 位于分支馈线末端的孤岛，见图 4。在故障隔离之前，这种孤岛划分能保证该系统的失电风险水平最低。待故障隔离完成后，手动合上联

络开关 17 和 45, 使 DG2、DG3 和 DG6 的可供电范围扩大, 系统重构成两个大的孤岛, 如图 5。这两个大孤岛的运行更稳定, 失电范围进一步缩小。在故障修复之前, 重构后的两大孤岛通过实时负荷削减和实时切机装置维持功率平衡。

表 1 组网可行策略部分搜索结果

Table 1 Partial searching results of feasible islanding strategies

序号	可行策略(需要断开的支路集合)	形成孤岛个数	T 目标函数值/MW	计算用时/min
1	3,15,29,34,39,46,57	5	765.23	1.905 1
2	3,15,29,35,37,41,66,68	5	769.99	
3	3,15,29,35,37,42,65,68	5	770.14	
4	3,15,29,35,38,40,66,68	5	771.76	
5	3,15,29,34,39,46,56,67,68	6	795.07	
6	3,15,29,33,38,39,46,56,67,68	6	789.44	
7	3,15,29,32,37,39,46,56,67,68	6	780.35	
⋮	⋮	⋮	⋮	

表 2 重构可行策略部分搜索结果

Table 2 Partial searching results of feasible configuration strategies

序号	可行策略(需要断开的支路集合)	形成孤岛个数	T 目标函数值/MW	计算用时/min
1	2,6,32,35,37	2	221.80	2.273 3
2	2,5,33,35,37	2	229.34	
3	2,8,26,28,35,37	2	252.51	
4	2,6,32,35,38,79	2	261.02	
5	2,6,32,35,79,55	2	263.96	
6	2,5,33,35,38,39	2	274.38	
7	2,8,26,28,35,79,55	2	275.40	
⋮	⋮	⋮	⋮	

对图 4 所示系统按 1.1 节所述, 采用改进状态抽样法获得容量为  $N$  的系统样本序列集合, 在各个故障状态序列持续期间采用本文四阶段方法进行组网和重构, 按式(14)计算系统停电电量风险指标 (SENS), 其中  $P_{di}$  为故障状态序列发生的概率, 可由式(1)计算得到。 $W_{i,k}$  为负荷节点  $k$  在系统状态  $i$  期间的停电电量。 $\lambda_k$  为负荷节点权重。在三种场景下评估系统风险水平, 对比结果如表 3 所示。

表 3 三种方案下系统停电电量风险指标(SENS)值的对比

Table 3 SENS and the comparison of the three different cases

序号	三种场景	风险指标	
		SENS/kWh	降低程度
1	故障后不进行组网、不进行重构	98.228	—
2	故障后用 OBDD 算法组网, 但不进行重构	66.546	32.253%
3	故障后用 OBDD 算法组网, 并进行重构	41.305	57.950%

$$\text{SENS} = \sum_{k=1}^{n_{\text{load}}} \lambda_k \times \left( \sum_{i=1}^N P_{di} \times W_{i,k} \right) \quad (14)$$

由以上测试结果可知, 对于含有多处分布式电源的复杂配电网, 当配电网发生故障后, 采用本文所述的基于有序二元决策图(OBDD)的四阶段方法, 可以快速获得可行以及最优的组网和重构策略, 为运行人员提供参考, 尽可能地降低配电系统的失电风险水平。

## 5 结论

本文提出了基于有序二元决策图(OBDD)的配电网故障后 DG 组网重构最优策略搜索的四阶段方法, 并评估这一举措对配网整体风险水平的改善程度。以布尔变量表示开关支路的通断状态, 将配电网故障后的组网重构策略搜索问题转化成以风险指标最低为目标函数的多约束条件的 OBDD 求解问题。以此搜索能最大程度降低配网失电风险水平的最优组网重构策略。算例评估结果表明, 本文方法搜索用时短, 搜索结果合理。且本文四阶段方法使评估所得的风险指标改善程度明显。可见采用有序二元决策图搜索配网 DG 组网重构策略是降低配电网风险的行之有效的方法。采用本文方法, 还可进一步探讨计及电压稳定性、频率稳定性等约束条件的配网孤岛划分问题。

## 参考文献

- [1] VITTAL V, KLIEMANN W, NI Y, et al. Determination of generator groupings for an islanding scheme in the Manitoba Hydro system using the method of normal forms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1345-1351.
- [2] AHLNED S, SARKER C, KHAIRUDDIN B, et al. A scheme for controlled islanding to prevent subsequent blackout[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 136-143.
- [3] SENROY N. A concept framework for the controlled islanding of interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 1005-1006.
- [4] ZEINELDIN H, MAREI I, EISAADANY F, et al. Safe controlled islanding of inverter based distributed generation[C] // IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 2515-2520.
- [5] BOLLEN H, SUN Y, AULT W. Reliability of distribution networks with DER including intentional islanding[C] // International Conference on Future Power Systems, November 18-18, 2005, Amsterdam, Netherlands: 45-52.

- [6] SUN K, ZHENG D, LU Q. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 912-923.
- [7] 董新, 张波, 潘志远. 改进状态抽样法及其在含微网的配电网风险评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 39-46.  
DONG Xin, ZHANG Bo, PAN Zhiyuan. Improved state sampling method applied in the risk assessment of distribution network with configuration of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 39-46.
- [8] DONG Xin, ZHANG Bo. Risk evaluation of distribution system with microgrids[C] // TENCON, IEEE Region 10 Conference, November 1-4, 2015, Macao, China: 48-52.
- [9] 李林, 单喜斌, 宋宗勋. 基于DFIG控制方法的微电网的并网及孤岛运行方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 158-163.  
LI Lin, SHAN Xibin, SONG Zongxun. Operation mode analysis of micro-grid grid-connected and island based on DFIG control method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 158-163.
- [10] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.  
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
- [11] 田洪迅, 王宏刚, 万涛, 等. 基于BP神经网络的配电网可靠性关联因素灵敏度计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 71-77.  
TIAN Hongxun, WANG Honggang, WAN Tao, et al. A methodology of computing sensitivity of distribution system reliability with respect to driving factors based on a BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 71-77.
- [12] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-41.  
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-41.
- [13] 王宗耀, 苏浩益. 配网自动化系统可靠性成本效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 98-103.  
WANG Zongyao, SU Haoyi. Cost-benefit analysis model for reliability of distribution network automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 98-103.
- [14] 王晶, 陈骏宇, 金华锋. 含分布式电源的配电网动态孤岛划分博弈模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 14-24.  
WANG Jing, CHEN Junyu, JIN Huafeng. A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 14-24.
- [15] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 58-62.  
LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 58-62.
- [16] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-147.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-147.
- [17] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

收稿日期: 2017-07-23; 修回日期: 2017-11-26

作者简介:

董新(1990—), 女, 硕士, 研究方向为配电网风险评估; E-mail: sd\_dongxin@126.com

潘杰(1982—), 男, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统稳定控制和放电等离子体及其应用。E-mail: sdnupanjie@163.com

(编辑 周金梅)