第 39 卷 第 14 期 2015 年 7 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20141017002
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.39 No.14 July 25，2015

计及分布式电源出力和负荷不确定性的配电网孤岛划分

李 飞[1]，徐 弢[1]，林济铿[2]，刘阳升[2]，孙义豪[3]

（1. 智能电网教育部重点实验室（天津大学），天津市 300072；2. 同济大学电子与信息工程学院，上海市 201804；3. 国网河南省电力公司经济技术研究院，河南省郑州市 450052）

摘要：针对计及分布式电源（DG）出力波动性及负荷需求不确定性的配电网孤岛划分问题，提出了一种基于树背包理论的最优孤岛划分新模型及相应求解方法。所述方法的基本思路为：首先，构造了 DG 出力波动性和负荷需求不确定性基于树背包理论的随机最优孤岛划分新模型；进而，基于拉丁超立方超样方法、确定性树背包算法、数理统计方法，确定各初始孤岛的组成，包括 DG 及相应负荷节点；最后，对每个初始孤岛在考虑孤岛重构的基础上采用基于随机最优潮流的优化调整，通过优化调整而保证 DG 孤岛运行的最优性、安全性和经济性。所述方法实现了计及分布式发电及负荷出力不确定性情况下最佳孤岛的系统形成方法，能根据实时情况确定最大可能出现的孤岛，相对于在确定性条件下的孤岛具有更强的可信度。含有多个 DG 的 PG&E 69 节点系统的算例验证了所述模型及算法的有效性。

关键词：分布式电源；不确定性；拉丁超立方抽样；树背包理论；优化调整

0 引言

随着节能减排工作力度的加大，以可再生能源为主的各类分布式发电在配电网中的渗透率越来越高。由于分布式电源（DG）具有独立供电的能力，在配电网因故障而停电之后，若能充分利用 DG 独立、快速的供电能力（即孤岛运行能力），实现停电区域中非故障网络及重要负荷的快速恢复供电，对于提高配电网的供电可靠性，以及减少停电损失具有重要意义[1]。

对于含 DG 的配电网故障后，如何充分利用 DG 的孤岛运行来实现系统的故障恢复，首先值得说明的是该文章所涉及的 DG 具有独立运行能力[2]（即可以独立带负荷运行），各界学者提出了不同的配电网孤岛划分方法，其方法大致可分成两类。

第一类不计 DG 出力的波动性及负荷需求的不确定性。此类方法通常先根据故障后失电区内的 DG 分布形成初始孤岛划分方案，之后再对方案中的每个孤岛进行安全性校验，进而确定最终的孤岛划分方案。文献[3]以功率最大的 DG 为根节点建立功率树，结合连通性约束和放射性约束，用隐枚举法在不考虑网损的情况下进行优化求解获得初始划分方案，然后在计及网损条件下通过对每个孤岛进行静态生存性约束校验来修正恢复供电的负荷量，从而得到最终的孤岛划分方案。文献[4]分别以 DG 为中心，通过功率圆遍历的方法确定恢复等值有效负荷最大的孤岛方案。但当 DG 较多时，以不同 DG 为中心的功率圆会存在相互重叠的可能，相交区域内负荷的不同归属判定将会得到不同的孤岛划分方案。文献[5-6]分别利用基于树背包理论的分支定界算法和深度优先动态规划算法，并采用“搜索＋校核”策略，实现了最优孤岛的划分，其孤岛划分的最优性具有较强的理论支撑。文献[7]从 DG 最优源点开始，根据节点电压约束、支路潮流约束与无电磁环网约束，逐条线路扩展供电范围，当约束条件不能满足时即完成一个源点的扩展，当所有的源点扩展结束时即完成了孤岛划分。文献[8]将含有 DG 的配电网故障恢复分为三个阶段，一是 DG 网络孤岛的形成，主要通过分支定界的方法来搜索形成最优孤岛，然后在孤岛形成的基础上将剩余网络进行扩张合并，最后将扩张后的孤岛与大电网进行同步来实现最优恢复，偏重于大电网的整体恢复，效果好但所需时间长；文献[9]将孤岛恢复分为两阶段，第 1 阶段利用分支定界的方法求解以 DG 为根节点的树背包问题，第 2 阶段对孤岛安全进行校验。该类方法由于未考虑 DG 出力的波动性和负荷需求的不确定性，采用该类方法所得到的孤岛划分方案无法兼顾供电的可靠性和经济性，只是近似方案。

收稿日期：2014-10-17；修回日期：2015-02-09。
国家自然科学基金资助项目（51177107）。

由于实际运行过程中，DG 出力和负荷变化会改变系统节点的电压和系统的网损。当然在故障系统恢复过程中，由于 DG 出力和负荷固有的不确定性给故障系统的恢复和孤岛的安全运行问题带来了很多不确定性的问题，如果不考虑这些不确定性因素而仅仅以确定值或者均值的形式来处理显然只是近似结果，在故障系统恢复结果中往往存在很大误差。考虑 DG 和负荷的不确定因素目的是为了在故障时刻能按最大概率的最优孤岛进行恢复，从而可以大大减少系统失电负荷量，提高系统的安全稳定运行能力。由此引出了第 2 类方法，即计及 DG 出力的波动性及负荷需求的不确定性的故障恢复。

目前该类方法的研究处于起步阶段，相关文献相对比较少。文献[10]提出了一种孤岛划分方法。该方法的具体过程是将 DG 出力和负荷需求功率用区间函数描述，并通过馈线分区和待恢复树的最优切割来实现故障停电网络的快速恢复供电。该方法计及了分布式发电的波动性及负荷需求的不确性，其所得的最优方案更符合实际；但由于馈线分区和待恢复树的最优切割操作相对比较繁琐，有待进一步提高其效率。文献[11]只考虑了风电这一种分布式发电，并根据统计分析将风电出力划分为 3 种状态并根据每一出力状态的概率，得到风电出力期望，进而基于风电出力期望，构造以系统有功网损期望值最小为目标的优化模型，确定最佳孤岛。该文虽考虑了风电出力的随机性，但并未考虑负荷需求的不确定性及网络结构的优化，模型过于简单。

基于以上综述，本文提出了计及 DG 出力波动性和负荷需求不确定性基于树背包理论的最优孤岛划分新模型及相应求解方法。本文方法的基本思路为：本文首先构造了 DG 出力波动性和负荷需求不确定性基于树背包理论的最优孤岛划分新模型；进而，针对模型中含有的 DG 出力和负荷需求的不确定性，采用拉丁超立方抽样方法[12]对 DG 出力和负荷需求进行 N 次抽样，从而将不确定性的树背包模型转换为一系列的确定性树背包模型，并采用“搜索＋调节”的策略对相应确定性模型进行求解，得到一系列的孤岛划分方案；然后通过 2 个阶段的操作及统计计算获得初始孤岛方案：第 1 阶段采用统计方法确定每一 DG 的 DG 组合归属，即孤岛归属；第 2 阶段根据第 1 阶段所确定的每一 DG 归属孤岛，确定每一孤岛中最有可能的负荷；从而得到初始的孤岛划分；最后，对每个初始孤岛在考虑孤岛重构的基础上采用基于随机最优潮流的优化调整，通过优化调整而保证 DG 孤岛运行的最优性、安全性和经济性[13-19]。

需要指出的是，由于以光伏及小风电为代表的分布式发电的出力具有很强的不确定性，再加上负荷需求本身也具有很强的不确定性，因此，若不考虑其不确定性，很显然所得到的孤岛至多是一近似孤岛，在这种情况下所得到的孤岛发电出力及负荷需求之间的平衡不易达到，或者平衡时间很短，故其实际上无法进行正常运行；而在孤岛划分时，若计及分布式发电出力及负荷需求的不确定性，孤岛的实时功率平衡问题就相应容易解决的多，相应地孤岛也更有实际意义。

1　计及 DG 出力和负荷不确定性的树背包孤岛划分模型

本文的负荷模型考虑如下特性：①负荷重要性，即分一级负荷、二级负荷、三级负荷，并对每一级负荷附以不同的权重系数 w_i；②负荷的可控性，若节点 L 所连负荷 P_L 中可控和不可控负荷所占比例分别为 a 和 b（$a+b=1$；$a\geqslant 0$，$b\geqslant 0$），若 $a>0$，设置一个附加节点通过带开关的支路与节点 L 相连，其负荷值为 aP_L，其负荷重要性等级与节点 L 的相同，而节点 L 所直接带的负荷变为单纯的不可控负荷 bP_L。

在计及 DG 出力波动性及负荷需求不确定性的前提下，含 DG 的配电网孤岛划分的目标是在满足相关约束条件下使岛内所包含负荷点的等值有效负荷之和最大，为一随机优化问题，在文献[5-6]不计及 DG 出力不确定的有根树孤岛最优划分模型的基础上，本文建立计及 DG 出力波动性及负荷需求不确定性的最佳孤岛划分模型为：

$$\begin{cases} \max \sum_{v=0}^{n} \tilde{c}_v x_v \\ \text{s.t.} \quad \sum_{v\in I_i} \tilde{d}_v + \tilde{P}_{\text{loss}i} \leqslant \sum_{v\in G} \tilde{P}_v \qquad i=1,2,\cdots,z \\ \quad x_v = 1 \qquad v\in G \\ \quad x_v = \{0,1\} \qquad v\in V\backslash G \\ \quad x_{a_v} \geqslant x_v \qquad i\in l_{v,g},\forall v\in V\backslash G \\ \quad P_{\text{A}} \geqslant \gamma P_L \\ \quad V_v^{\min} \leqslant \tilde{V}_v \leqslant V_v^{\max} \qquad v\in I_i, i=1,2,\cdots,z \\ \quad \tilde{I}_{a_v-v} \leqslant I_{a_v-v}^{\max} \qquad v\in I_i, i=1,2,\cdots,z \end{cases} \tag{1}$$

式中：n 为树模型中节点的最大编号，根节点的编号为 0；V 为系统所有节点的集合；G 为系统中所有 DG 节点的集合；I_i 为第 i 个独立孤岛的节点集合，独立孤岛的总数为 z；$\tilde{d}_v$ 为配电网中节点 v 的随机负荷

需求；$\tilde{c}_v$ 为树中节点 v 的等效负荷值，对于负荷节点 $\tilde{c}_v = w_v \tilde{d}_v$（$w_v$ 为节点 v 的负荷优先级权重），对于 DG 节点和网络中连接节点 $w_v = 0$，相应的 $\tilde{c}_v = 0$；$\tilde{P}_{\mathrm{loss}i}$ 为第 i 个独立孤岛内的线路损耗；x_v 表示树中的节点 v 是否被选入最优孤岛方案中，若节点 v 被选中，则 $x_v = 1$，反之，则 $x_v = 0$；P_{A} 为孤岛中 DG 的备用容量，$P_{\mathrm{A}} = P_{\mathrm{G}} - P_L$，其中 $P_{\mathrm{G}} = \sum_{d \in S_{\mathrm{NR}}} P_d^{\mathrm{Rated}} + \sum_{r \in S_{\mathrm{R}}} P_r^{\mathrm{E}}$ 为孤岛的最大容量，P_d^{Rated} 为非可再生能源 DG（即其一次能源不是可再生能源，比如天然气等）的额定功率，P_r^{E} 为可再生能源 DG 出力的期望值，S_{NR} 和 S_{R} 分别为孤岛内非可再生能源 DG、可再生能源 DG 的集合，$P_L = \sum_{v \in I_i} x_v \bar{d}_v$ 为孤岛 I_i 中所有负荷期望值的和，$\bar{d}_v$ 为配电网中节点 v 的负荷需求的期望值；γ 为孤岛中备用容量占负荷总量的比例；$V_v^{\min}$，$V_v^{\max}$，$\tilde{V}_v$ 分别为节点 v 的电压幅值允许下限、上限及当前电压值（为随机数）；下标 a_v 为节点 v 的父节点；$\tilde{I}_{a_v\text{-}v}$ 和 $I_{a_v\text{-}v}^{\max}$ 分别为支路 a_v-v 电流值（为随机数）及该线路允许最大电流值。

式(1)该模型以流出节点功率为正，目标函数表示孤岛中供电等效负荷最大；第 1 个约束保证孤岛内总负荷和线路损耗之和不大于孤岛内所有 DG 平均输出功率的总和，即为背包约束；第 2 个约束说明所有的 DG 节点都被选中，即归属于某一孤岛；第 3 和第 4 个约束表示对于任意非 DG 节点 v，如果 v 被选入相应孤岛中，则 v 必与至少一个 DG 节点 g 相连接，且 v 与 g 之间链上的所有节点都将被选中；第 5 个约束表示系统的备用容量不小于总负荷的一定比例；最后两个约束表示任一孤岛中网络节点电压及支路电流约束。

若式(1)中的 DG 出力及负荷需求为确定值时，该模型即为确定性树背包模型，文献[5-6]提出了有效求解策略。对于式(1)的不确定随机优化模型，类比于确定性树背包优化模型，本文称之为“不确定树背包孤岛划分优化模型”。

2　不确定树背包孤岛划分优化模型的求解

对于式(1)模型的求解，迄今并没有相应求解算法，本文基于拉丁超立方抽样方法[10,12]与确定性树背包求解方法[6]的结合，提出了计及不确定性的树背包问题的求解方法。其大致思想为：首先针对模型中 DG 和负荷随机变量的概率分布，采用拉丁超立方抽样方法对其进行 N 次抽样，将不确定性的树背包模型转换为确定性树背包模型，并采用确定性树背包孤岛划分求解策略[6]对模型进行求解，从而得到每次抽样对应的孤岛划分方案；然后根据每个孤岛所包含的 DG 组合，构成非重复性 DG 组合集合（每一 DG 仅属于一个 DG 组合，这些 DG 组合的并集等于配电网中所有 DG 所组成的集合），并统计每个 DG 组合在所有孤岛中出现的次数，其出现次数最多者即为每一 DG 的归属孤岛；统计每一负荷在各个初始孤岛中的出现次数，其出现次数最多的初始孤岛即为该负荷的归属孤岛，从而完成了初始孤岛划分；最后，对每个初始孤岛在考虑孤岛重构的基础上采用基于随机最优潮流的策略进行优化调整，实现孤岛运行的最优性、安全性和经济性。本文求解思想如图 1 所示。

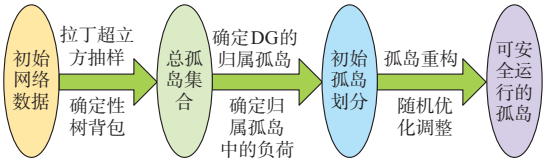

图 1　计及不确定性的孤岛划分求解思想
Fig.1　Solution idea for island partition considering uncertainty

2.1　初始孤岛的划分

计及 DG 出力和负荷不确定性的初始孤岛的划分涉及随机变量的拉丁超立方抽样、初始总孤岛集合的确定、N 次抽样非重复性 DG 组合的确定、DG 归属孤岛的确定、孤岛中负荷的确定等过程，其具体过程如下。

1）DG 出力和负荷功率组成 K 个随机变量序列 $\{X_1, X_2, \cdots, X_K\}$，其中前 K_1 个随机变量表示 K_1 个 DG 的出力，剩余的 K_2 个随机变量表示 K_2 个负荷节点的负荷需求。

2）对 K 个随机变量 $\{X_1, X_2, \cdots, X_K\}$，分别根据其各自服从的分布函数用拉丁超立方采样方法进行 N 次分层采样，从而得到各自的 N 个采样值，具体过程为：若 X_k 为其中任一个随机变量，且其累积概率分布函数为 $Y_k = F_k(X_k)$，将曲线 $Y_k = F_k(X_k)$ 的纵轴分成 N 个等间距不重叠的区间，对于第 i 个区间，把其中点 $y_{k,i}$ 作为曲线 Y_k 的第 i 个采样值点，然后用函数 $Y_k = F_k(X_k)$ 的反函数来计算该采样值点的横坐标 $x_{k,i}$，即 $x_{k,i} = F_k^{-1}((i - 0.5)/N)$，$X_k$ 的 N 个采样值形成一个 N 维行向量 $[x_{k,1}, x_{k,2}, \cdots x_{k,N}]$。当 K 个随机变量采样结束之后，可得到 K 个由采样值组成的 N 维行向量，这 K 个行向量形成初始采样矩阵如下：

$$\boldsymbol{Z}_0=\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{K,1} & x_{K,2} & \cdots & x_{K,N} \end{bmatrix} \tag{2}$$

3)为了消除各随机变量采样值之间的相关性，对初始采样矩阵 $\boldsymbol{Z}_0$ 重新排列而得到有效的采样矩阵 $\boldsymbol{Z}$，其操作过程为：形成 $K\times N$ 阶随机顺序矩阵 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}=[\boldsymbol{S}_{\mathrm{E1}},\boldsymbol{S}_{\mathrm{E2}},\cdots,\boldsymbol{S}_{\mathrm{EK}}]^{\mathrm{T}}$（其中 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}k}$（$k\in\{1,2,\cdots,K\}$）为由 1～$N$ 的 N 个不重复随机整数组成的行向量）；然后对矩阵 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}$ 的行向量进行 Gram-Schmidt 序列正交变换，以消除其相关性，变换之后的顺序矩阵仍记为 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}$，Gram-Schmidt 序列正交变换的具体过程见附录 A；按照顺序矩阵 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}$ 的行向量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}k}$（$k=1,2,\cdots,K$）中的元素对初始采样矩阵 $\boldsymbol{Z}_0$ 的相应第 k 行元素进行重新排列；$\boldsymbol{Z}_0$ 的所有行向量中的元素均重排之后即得到采样矩阵 $\boldsymbol{Z}$，其过程如下。

步骤 1：初始化行号 $k=1$，列号 $i=1$。

步骤 2：依据 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}$ 的行向量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}k}$ 中的第 i 列对应的元素 $S_{\mathrm{E}k,i}$，将初始采样矩阵 $\boldsymbol{Z}_0$ 中第 k 行第 i 列的元素 $x_{k,i}$ 置于矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的第 k 行第 $S_{\mathrm{E}k,i}$ 列的位置。

步骤 3：$i\to i+1$，重复步骤 2 直到将矩阵 $\boldsymbol{Z}_0$ 第 k 行的所有元素完成其位置的重新排序。

步骤 4：$k\to k+1$，重复步骤 2 和 3，直到 $k=K+1$，即已完成 $\boldsymbol{Z}_0$ 中所有元素的重新排列，并把得到的采样矩阵记为矩阵 $\boldsymbol{Z}$。

4)把 $\boldsymbol{Z}$ 的每一列元素（共 N 列）分别作为 DG 出力及负荷需求，并进行相应的孤岛划分计算，得到 N 个孤岛集合 I_{Si}（$i=\{1,2,\cdots,N\}$），即 $I_{Si}=\{S_{i1},S_{i2},\cdots,S_{iL_i}\}$，集合中的元素孤岛 S_{il} 由 DG 和负荷组成，即 $S_{il}=\{\mathrm{DG}_{n_1},\cdots,\mathrm{DG}_{n_j},\cdots,\mathrm{DG}_{n_B},\mathrm{PL}_{m_1},\cdots,\mathrm{PL}_{m_k},\cdots,\mathrm{PL}_{m_D}\}$（其中 DG_{n_j} 为故障后失电区网络中编号为 n_j 的 DG 的标识；n_j（$j=1,2,\cdots,B$）为失电区 DG 的编号；$B=i_{\mathrm{g}}^{l}$ 为孤岛 S_{il} 所包含的 DG 个数；其中的 PL_{m_k} 为故障后失电区系统中编号为 m_k 的负荷节点的标识；m_k（$k=j=1,2,\cdots,D$）为失电区网络中负荷节点的编号；$D=i_{\mathrm{d}}^{l}$ 为孤岛 S_{il} 所包含的负荷节点的总个数）；这 N 个孤岛集合 I_{Si}（$i=\{1,2,\cdots,N\}$）组成初始总孤岛集合 U_0。其形成过程如下。

步骤 1：初始化 $i=0$。

步骤 2：$i\to i+1$。

步骤 3：从矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 抽取第 i 列中的元素组成序列，即 $\{x_{1,i},x_{2,i},\cdots x_{K,i}\}$，把该序列中的前 K_1 个元素分别作为 K_1 个 DG 的出力，剩余的元素分别作为相应负荷节点的负荷需求。

步骤 4：在 DG 出力及负荷需求均为确定性情况下，式(1)随机优化模型转化为如式(3)所示的确定性优化模型。其中：c_v，I_{a_v-v} 均为确定性变量，表示一个定值，即将不确定性的背包问题转化为确定性的含多 DG 的配电系统孤岛划分问题。

$$\begin{cases} \max \ \sum\limits_{v=0}^{n} c_v x_v \\ \text{s.t.} \quad \sum\limits_{v\in I_i} d_v + P_{\mathrm{loss}i} \leqslant \sum\limits_{v\in G} P_v \qquad i=1,2,\cdots,z \\ \qquad x_v=1 \qquad v\in G \\ \qquad x_v=\{0,1\} \qquad v\in V\backslash G \\ \qquad x_{a_v}\geqslant x_v \qquad i\in l_{v,g},\forall v\in V\backslash G \\ \qquad P_{\mathrm{A}}\geqslant \gamma P_{\mathrm{L}} \\ \qquad V_v^{\min}\leqslant V_v\leqslant V_v^{\max} \qquad v\in I_i,i=1,2,\cdots,z \\ \qquad I_{a_v-v}\leqslant I_{a_v-v}^{\max} \qquad v\in I_i,i=1,2,\cdots,z \end{cases} \tag{3}$$

采用文献[6]所提出的两阶段“搜索＋调节”的策略来求解含多 DG 的确定性最优孤岛划分问题，其具体过程请见附录 B 和 C；从而得到第 i 次抽样形成的 L_i 个孤岛 S_{i1}～S_{iL_i}，这 L_i 个孤岛组成了第 i 个孤岛集合 I_{Si}；孤岛 S_{i1}～S_{iL_i} 中的各个 DG 组合分别组成集合 $G_{i1},G_{i2},\cdots,G_{iL_i}$（即 $G_{il}=\{\mathrm{DG}_{n_1},\cdots,\mathrm{DG}_{n_j},\cdots,\mathrm{DG}_{n_B}\}$（$l=1,2,\cdots,L_i$；$i=1,2,\cdots,N$））。

步骤 5：若 i 等于 N，则 N 次抽样孤岛划分结束；N 个孤岛集合 $I_{S1},I_{S2},\cdots,I_{SN}$ 组成初始总孤岛集合 U_0，即 $U_0=\{I_{S1},I_{S2},\cdots,I_{SN}\}$，转向 5)；否则，转向步骤 2。

5)确定 N 次抽样所形成的初始总孤岛集合中所有非重复性 DG 组合的集合 $G_0=(G_1,G_2,\cdots,G_F)$。其中 F 为 N 次抽样所形成的所有非重复性 DG 组合的数量。

步骤 1：将第 1 次抽样所形成的孤岛集合 I_{S1} 中的各个孤岛所包括 DG 组合作为初始 DG 组合集合，即 $G_0=(G_{11},G_{12},\cdots,G_{1L_1})$，并令 $G_k=G_{1k}$（$k=1,2,\cdots,L_1$），得到 $G_0=(G_1,G_2,\cdots,G_{L_1})$；令表示第 m 个 DG 组合出现次数的计数变量 $q_m=1$（$m=1,2,\cdots,L_1$）及 $F=L_1$，$i=1$。

步骤 2：$i\to i+1$；若 i 大于 N，则转步骤 5；否则，转步骤 3。

步骤 3：$l=1$。

步骤 4：若 $G_{il}\in G_0$，把 G_{il} 在集合 G_0 中的所在顺序位置不妨记为 j（从第 1 个元素算起，其位于第 j（$j=1,2,\cdots,F$）个元素），则 $q_j\to q_j+1$；否则，$F\to F+1$，$G_F=G_{il}$，$q_F=1$。$l\to l+1$，如果 $l>L_i$，则转步骤 2，否则返回步骤 4。

步骤 5：得到了 N 次抽样所形成的所有非重复

性 DG 组合集合 $G_0=(G_1,G_2,\cdots,G_F)$ 及其中每个 DG 组合 $G_j(j=1,2,\cdots,F)$ 在 N 次抽样中的出现次数 $q_j(j=1,2,\cdots,F)$，转向 6)。

6)按 N 次抽样中各个孤岛所包括的 DG 组合出现的次数来确定最有可能的 DG 组合，而每一最有可能 DG 组合也就相应确定了所有 DG 的初始归属孤岛集合 U_G。集合 U_G 满足条件：$\forall n_j$，DG_{n_j} 属于唯一的集合 $U_{Gt}(t=1,2,\cdots,T)$。集合 U_G 的形成过程如下。

步骤 1：将 $G_0=(G_1,G_2,\cdots,G_F)$ 中的元素按其在 N 次抽样中的出现次数 $q_j(j=1,2,\cdots,F)$（如果次数相同则按 G_0 中的顺序）降序排列形成新的 DG 集合，并仍记为集合 $G_0=(G_1,G_2,\cdots,G_F)$；由于在 G_0 的所有元素中，G_1 的出现次数 q_1 值最大，相应地集合 $U_{G1}=G_1$，$j=1$，$T=1$。

步骤 2：$j\rightarrow j+1$，如果 G_0 中第 j 个元素 G_j 所含 DG 都未在 $U_{G1}\sim U_{GT}$ 集合中出现过，则 $T\rightarrow T+1$，且 $U_{GT}=G_j$；否则，$T\rightarrow T+1$。如果 $j<F$ 转步骤 2；否则，转步骤 3。

步骤 3：判断系统所有的 DG 是否均已经包含在集合 $U_{G1}\sim U_{GT}$ 中。如果是，则转步骤 4；否则转步骤 2。

步骤 4：得到集合 $U_G=(U_{G1},U_{G2},\cdots,U_{GT})$，其中的每一元素所包括的 DG 即为最有可能出现的初始孤岛中所包括的 DG，相应地每一 DG 的初始孤岛归属即已确定。

7)进一步确定 N 次抽样中负荷节点最有可能的归属孤岛。令 $U_t=U_{Gt}$，同时令累计负荷出现次数初始值 $q_{t,m_k}=0(t=1,2,\cdots,T;m_k=1,2,\cdots,K_2)$；所有负荷归属孤岛的确定过程如下。

步骤 1：令 $i=1$，$l=1$。

步骤 2：若孤岛 S_{il} 中所包括的 DG 组合 G_{il} 等于 DG 归属集合 U_G 中的某一元素 $U_{Gt}(t=1,2,\cdots,T)$，即各自所含 DG 完全一致，则将 S_{il} 包含的所有负荷 $PL_{m_k}(\forall PL_{m_k}\in S_{il},k\in\{1,2,\cdots,D\})$ 各自对应的 $q_{t,m_k}\rightarrow q_{t,m_k}+1$；然后 $l\rightarrow l+1$；如果 $l>L_i$，转向步骤 3；否则，返回步骤 2。

步骤 3：$i\rightarrow i+1$；如果 $i>N$，则转向步骤 4，统计负荷节点在孤岛中的出现次数；否则，令 $l=1$ 返回步骤 2。

步骤 4：$m_k=1$。

步骤 5：计算负荷 PL_{m_k} 在 N 次抽样中没有被任何孤岛包含的总次数 $q_n=N-\sum_{t=1}^{T}q_{t,m_k}$；令 $q_{t,m_k}=\max\{q_{1,m_k},q_{2,m_k},\cdots,q_{T,m_k}\}$，如果负荷 PL_{m_k} 在第 t 号孤岛出现的次数大于其未被任何孤岛包含的总次数，并且占抽样次数 N 的 40% 以上，即 $q_{t,m_k}>q_n$ 且 $q_{t,m_k}>0.4N$，则将负荷 PL_{m_k} 加入集合 U_t 中，即 $U_t=\{PL_{m_k}\}\cup U_t$；否则，负荷 PL_{m_k} 不能被任一孤岛恢复。

步骤 6：$m_k\rightarrow m_k+1$；若 $m_k>K_2$（负荷总数），则转步骤 7；否则转步骤 5。

步骤 7：得到包含 DG 和负荷节点的初始孤岛集合 $U=\{U_1,U_2,\cdots,U_T\}$。

8)初始孤岛集合的合并及调整：合并所有相邻一个支路的孤岛，即两个孤岛可以通过一条支路直接连接，以及包含同一负荷节点的孤岛，使之成为一个大的孤岛。对已得到的孤岛，若 DG 总出力的期望值和节点总负荷的期望值的差（即孤岛剩余出力）超过设定门槛值 Δ，则将该孤岛周围具有最高优先级的可控负荷点添加进该孤岛来，直到孤岛的剩余出力功率接近于 0。

经过上述步骤，得到了初始孤岛集合，其过程如图 2 所示。

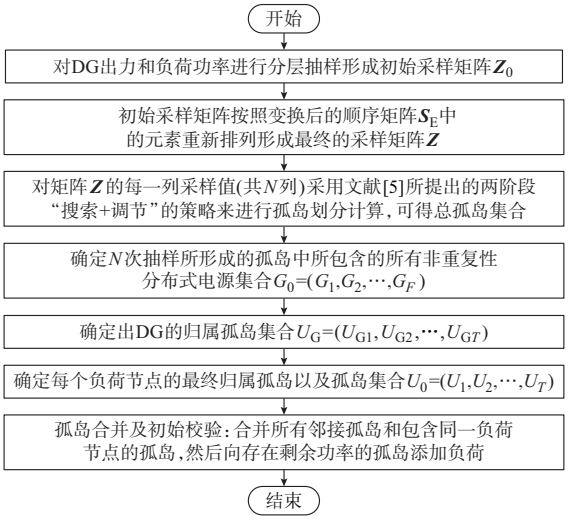

图 2　初始孤岛划分流程

Fig.2　Flow chart of initial islands partition

2.2　初始孤岛的重构、安全校验和调整

在确定了每一孤岛的 DG 集合及负荷节点集合之后，基于该孤岛中可控支路（即支路中包括有开关）的连接关系和电容器分布，本文采用优化技术进一步确定该孤岛的网络结构，及保证孤岛安全运行的每一 DG 出力，节点负荷值。孤岛 $U_t(t\in\{1,2,\cdots,T\})$ 的优化模型如式(4)所示。

式(4)的目标函数表示孤岛 U_t 内切除等值有效负荷量的期望值最小。其中的第 1 和第 2 个约束分别表示孤岛的有功、无功潮流约束；第 3 个约束表

示投切电容器大小的约束；第 4 至第 7 个约束表示孤岛 U_t 内 DG 的有功出力、无功电源的无功出力、节点电压、支路视在功率分别以不小于相应槛值的概率满足其上下限约束；第 8 至第 11 个约束是为了保证重构后孤岛的网络结构满足辐射状，第 8 个约束表示如果支路 i-j 是现状树中的树枝，则 $\gamma_{ij}=1$，同时也表示节点 i,j 中必有一个是另外一个的父节点，否则 $\gamma_{ij}=0$，第 9 和第 10 个约束表示除根节点外，每个节点都只有一个父节点对其输送功率，根节点没有父节点，第 11 个约束为保证网络为辐射约束的必要条件；第 12 个约束表示模型中的节点 i,j 都属于孤岛 U_t。

$$
\begin{cases}
\min \sum\limits_{l\in\{\mathrm{PL}_1,\mathrm{PL}_2,\cdots,\mathrm{PL}_{K_2}\}\cap U_t} (\omega_l \Delta\overline{d}_l) \\
\text{s.t.}\quad \widetilde{P}_i-\widetilde{d}_i=\widetilde{V}_i\sum\gamma_{ij}\widetilde{V}_j(g_{ij}\cos\widetilde{\delta}_{ij}+ \\
\qquad\qquad b_{ij}\sin\widetilde{\delta}_{ij}) \\
\qquad \widetilde{Q}_{\mathrm{G}i}-\widetilde{Q}_{\mathrm{D}i}=\widetilde{V}_i\sum\gamma_{ij}\widetilde{V}_j(g_{ij}\sin\widetilde{\delta}_{ij}- \\
\qquad\qquad b_{ij}\cos\widetilde{\delta}_{ij}) \\
\qquad 0\leqslant C_i\leqslant\overline{C}_i \\
\qquad \Pr(0\leqslant\widetilde{P}_i\leqslant\overline{P}_i)\geqslant p_{\mathrm{GP}} \\
\qquad \Pr(0\leqslant\widetilde{Q}_{\mathrm{G}i}\leqslant\overline{Q}_{\mathrm{G}i})\geqslant p_{\mathrm{GQ}} \\
\qquad \Pr(\underline{V}_i\leqslant\widetilde{V}_i\leqslant\overline{V}_i)\geqslant p_u \\
\qquad \Pr(0\leqslant\gamma_{ij}\widetilde{S}_{ij}^{\mathrm{Line}}\leqslant\gamma_{ij}\overline{S}_{ij}^{\mathrm{Line}})\geqslant p_S \\
\qquad \beta_{ij}+\beta_{ji}=\gamma_{ij} \\
\qquad \sum\limits_{j\in N_{\mathrm{T}}(i)}\beta_{ij}=1 \quad \beta_{ij}\in\{0,1\},i=1,2,\cdots,H_t, \\
\qquad\qquad\qquad j\in N_{\mathrm{T}}(i) \\
\qquad \beta_{0j}=0 \qquad\qquad j\in N_{\mathrm{T}}(0) \\
\qquad \gamma_{ij}\in\{0,1\} \qquad \sum\gamma_{ij}=H_t \\
\qquad i,j\in U_t
\end{cases}
\tag{4}
$$

式中：$\Delta\overline{d}_l=\overline{d}_l^0+\overline{d}_l$ 为切除节点 l 负荷量的期望值，其中 $\overline{d}_l^0$ 为切负荷之前节点 l 原负荷量的期望值，$\overline{d}_l$ 为当前系统节点 l 负荷的期望值；ω_l 为孤岛中节点 l 的负荷权重；$\widetilde{Q}_{\mathrm{G}i}$ 和 $\widetilde{Q}_{\mathrm{D}i}$ 分别为节点 i 处的无功电源出力和无功负荷，均为随机数；g_{ij} 和 b_{ij} 分别为节点 i,j 之间互导纳的实部和虚部；$\widetilde{\delta}_{ij}$ 为线路 i-j 上相角差，为随机数；β_{ij} 表示节点 i 和 j 的关系，$\beta_{ij}=1$ 表示节点 j 是节点 i 的父节点，$\beta_{ij}=0$ 表示节点 j 不是节点 i 的父节点；$\Pr(\cdot)$ 为不等式成立的概率；$p_{\mathrm{GP}},p_{\mathrm{GQ}},p_S,p_u$ 分别为 DG 有功出力、无功电源出力、线路视在功率、节点电压位于其约束区间的置信水平；$\widetilde{S}_{ij}^{\mathrm{Line}}$ 和 $\overline{S}_{ij}^{\mathrm{Line}}$ 分别为支路 i-j 的视在功率及最大允许值；H_t 为初始孤岛 U_t 中所包含的节点总数减 1，即为其支路数。

式(4)为计及 DG 出力、节点负荷随机性和网络重构的随机最优潮流问题。对于不含有联络开关的孤岛，即孤岛中的每一支路只含有一个开关，相应孤岛网络结构无法更改否则会出现孤立网络，所以该类孤岛无需考虑孤岛的重构问题，只涉及孤岛中的机组出力及负荷需求优化问题；对于含有联络开关的孤岛，由于联络开关的不同开合，会产生不同的网络结构，相应孤岛的优化模型的求解为计及孤岛重构[20-21]的最优随机潮流计算。

2.2.1　不含联络开关的孤岛优化模型的求解

本文采用随机潮流和灵敏度校正的相结合方法进行求解。其步骤为：首先对每个初始孤岛采用文献[13]中所述的随机潮流的方法进行计算，便可得到孤岛中所有节点的有功出力、无功出力、节点电压、线路视在功率等的均值和方差。然后根据各自服从的分布，分别将其表示成置信水平为 $p_{\mathrm{GP}},p_{\mathrm{GQ}},p_u,p_p,p_q$ 的置信区间的形式，并检验它们是否满足各自对应的约束上下限，如果满足则说明孤岛能安全运行，无需进行其他操作；否则，采用灵敏度技术调整孤岛中各个 DG 的有功和无功出力、电容器投入和负荷节点的负荷值[17]，以消除相应越限。

2.2.2　含联络开关的孤岛优化模型的求解

本文采用网络结构优化＋网络状态优化的分步求解策略进行求解，其过程如下。

1)为了确定最佳网络结构，本文基于树枝交换的 Mayeda 生成树策略[18]，确定孤岛的网络结构。其过程如下(对于没有安装开关的支路无法进行相应的开断操作，则把其选为树支且不参与树支交换，此时仅对含有开关的支路进行树支交换并定义为可交换支路)。

步骤 1：该孤岛的所有开关都闭合时构成图 G，选定初始网络结构作为初始树，记为 t_0，$t_0=\{e_1,e_2,\cdots,e_{N_{\mathrm{B}}}\}$，其中 $e_1,e_2,\cdots,e_{N_{\mathrm{B}}}$ 为 N_{B} 条可交换树枝。

步骤 2：从基本树 t_0 出发，按照树支交换规则(交换规则为：对于 t_0 中的每个树枝 e_i，用 e_i 基本割集中的连枝分别进行替换，即断开选定的树枝，闭合连枝)生成互不相同的且与树 t_0 距离为 1 的所有树，进而生成与基本树 t_0 距离为 2 的所有互不相同的树，依此重复进行，直到生成与基本树 t_0 距离最大的(该距离记为 $D_{\max}$)G 的所有树，所有这些树就组成了图 G 的完整树集合 T_{all}，其元素个数不妨记

为 W_{N_B}，即对应着孤岛的 W_{N_B} 种网络结构。需要指出的是，由于配电网中联络开关不多，且由于分布式发电的出力一般均比较小，网络中的节点及支路均比较小，故 W_{N_B} 数量一般不大。

2）对每个生成树确定的网络结构（共 W_{N_B} 种），分别采用随机潮流和灵敏度校正方法（其步骤和2.2.1节中不含联络开关孤岛模型的求解步骤相同）确定相应最少负荷切除量，其最少者所对应网络即为最佳网络，相应DG出力及负荷需求即为该最佳网络安全运行所对应的出力及所供给的负荷。

3　算例分析

本文的算例系统为通过对美国PG&E 69节点配电系统的部分节点上添加DG而构成。该系统的网络参数可参考文献[22]，网络结构如图3所示，系统额定电压为12.66 kV。DG1至DG6的出力和负荷均满足正态分布；DG1至DG6出力的期望分别为120，160，400，1 300，40，150 kW，方差均为出力期望的10%；各负荷需求的期望值如附录D表D1所示（表中未列节点的负荷预测均值为0），方差为其对应负荷期望值的10%。负荷的优先级和可控类型如附录D表D2和表D3所示。1，2，3类负荷的权重分别取为100，10，1。

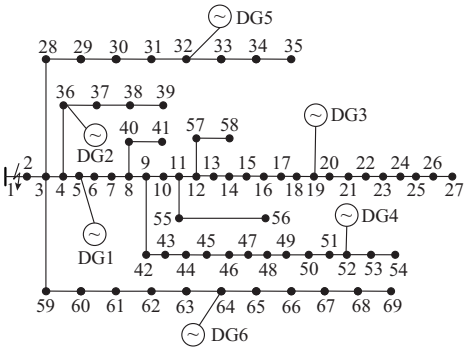

图3　含多个DG的PG&E 69节点配电系统
Fig.3　PG&E 69-bus distribution system integrated with several DGs

该系统在线路1-2处发生了三相接地故障，经故障隔离，故障下游的系统失电。利用本文方法进行失电网络的最佳孤岛划分和恢复，其具体步骤及结果如下（抽样次数 $N=100$）。

1）首先对系统中的DG1至DG6的有功出力和节点1至69的有功负荷按其服从的分布进行抽样，并经过相应变换最终形成75×100阶的有效采样矩阵 $\boldsymbol{Z}$（75表示69个负荷节点的有功负荷加6个DG的出力），进而将考虑DG和负荷不确定性的随机优化问题转化为 N 次的确定性问题的求解。

2）对以上确定性问题的求解采用附录C的树背包理论的方法，循环 N 次而得到 N 种孤岛划分方案，即 N 次抽样结果构成的初始总孤岛集合 U_0。

3）孤岛中DG集合的确定：对初始总孤岛集合 U_0 统计后可得孤岛中的非重复DG组合集合 $G_0=$（{DG1，DG2，DG5}，{DG3}，{DG4}，{DG6}，{DG1，DG2，DG6}，{DG5}，{DG1，DG2，DG5，DG6}），且每一组合在 N 次抽样中的出现次数分别为38，100，100，38，52，52，10次，同时将 G_0 中的元素按其在 N 次抽样中的出现次数降序排列形成新的DG集合 $G_0=$（{DG3}，{DG4}，{DG1，DG2，DG6}，{DG1，DG2，DG5}，{DG5}，{DG6}，{DG1，DG2，DG5，DG6}）；由于DG的归属孤岛集合 U_G 不包含重复的DG，由此可得 $U_G=$（{DG3}，{DG4}，{DG1，DG2，DG6}，{DG5}）。

4）负荷节点的确定：统计每个负荷分别在DG组合为{DG3}，{DG4}，{DG1，DG2，DG6}，{DG5}的孤岛中的出现次数以及不能通过孤岛恢复的次数，并将该负荷节点归入出现次数（该出现次数大于40次，否则负荷节点不能通过孤岛恢复）最多的孤岛；经过以上操作可得初始孤岛集合 $U=$（{DG3，12～20，57，58}，{DG4，50～52}，{DG1，DG2，DG6，2～9，40～42，36，28，59～69}，{DG5，30～35}）。同时分别将{DG3，12～20，57，58}，{DG4，50～52}，{DG1，DG2，DG6，2～9，40～42，36，28，59～69}，{DG5，30～35}所构成的孤岛命名为Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ号孤岛（集合 U 中的数字为69节点系统中负荷节点的标记）。

5）对已形成的4个孤岛检测孤岛剩余功率，可发现Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ号孤岛存在剩余功率，同时考虑负荷节点的优先级和可控性可作出如下调整：将节点21的70%的负荷（包括60%的不可控负荷和10%的可控负荷）并入{DG3，12～20，57，58}即Ⅰ号孤岛中；节点53的20 kW的可控负荷并入Ⅱ号孤岛；节点29所有负荷并入{DG1，DG2，DG6，2～9，40～42，36，28，59～69}即Ⅲ号孤岛中，经过调整阶段，节点21的部分负荷、节点53的部分负荷、节点29的全部负荷得到恢复。最终系统经孤岛的恢复情况如图4所示。

6）孤岛的重构、安全校核及调整：对已形成的4个孤岛分别构建以有功、无功潮流约束和发电机有功出力、节点电压及线路传输功率在在约束区间内的概率大于相应槛值90%的随机最优潮流模型。节点39～48，15～69，11～66，54～27之间存在联络开关，根据形成的孤岛和联络开关的位置可以确定仅有Ⅰ号孤岛存在联络开关13-20，需要考虑重构，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ号孤岛无需考虑重构。

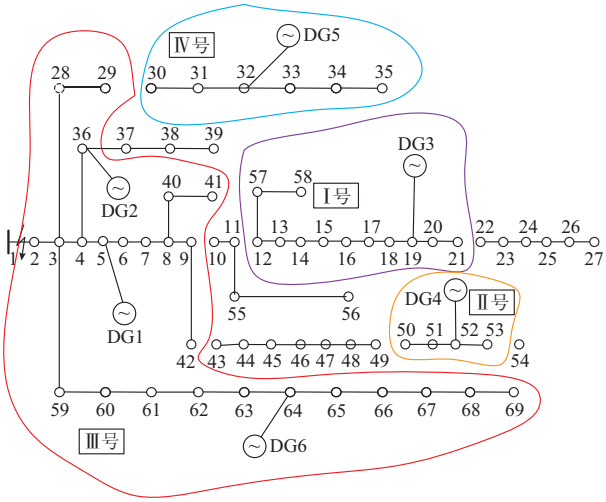

图 4　含多 DG 的配电系统最优孤岛划分方案
Fig.4　Optimal island partition scheme of distribution system integrated with DGs

对Ⅰ号孤岛模型的进行优化求解，首先形成 8 种树状结构：闭合所有分段开关，断开联络开关 13-20；闭合联络开关 13-20，分别断开线路 13-14，14-15，15-16，16-17，17-18，18-19，19-20 上的联络开关形成的生成树。通过求解可得在闭合联络开关 13-20，断开线路 13-14 的网络结构下系统状态最优，该种网络结构下的潮流计算结果见附录 D 表 D4：线路传输功率和节点电压未出现越限，但由于在孤岛划分时未考虑网损的原因，DG3 的有功出力置信水平 90% 的置信区间为[386.6 kW，423.8 kW]，实际 DG3 有功出力的约束为[0，420 kW]，可知 DG3 出力的上限越限 3.8 kW，由于节点 13 为可控的三级负荷，故切除节点 13 中 3.8 kW 的期望负荷量之后Ⅰ号孤岛便可以正常运行。

其他 3 个孤岛无需重构，直接用随机潮流计算可得：Ⅱ号孤岛的潮流计算结果如附录 D 表 D5 和表 D6 所示，其中 51-52 和 52-53 的线路传输功率越限严重，因此选择切除节点 50 的部分负荷，当期望切除负荷量为 310 kW 时，线路传输功率恢复正常；为了保证孤岛中供需平衡，DG4 的有功出力均值需下调到期望值 990 kW。Ⅲ号孤岛潮流计算结果如附录 D 表 D7 所示，其中 DG2 的出力区间的上限越限 4.089 kW，考虑到节点 40 为可控负荷负荷，故切除节点 40 中期望为 4.1 kW 的负荷，该孤岛可以安全稳定运行。Ⅳ号孤岛潮流计算结果如附录 D 表 D8 所示，其中 DG5 的出力的有功出力下限越限 0.47 kW，说明发电功率有富裕但是周围没有可控负荷可以恢复，因此需要适当降低 DG5 的出力下限使其可以运行在均值为 39.53 kW 的出力水平。

综上所述，以上孤岛恢复使重要的一级负荷全部得到重新供电，考虑负荷及 DG 出力波动性原因，系统的负荷恢复总量在[1 894.8 kW，2 025.2 kW]之间。

同时本算例是采用 C＋＋编程实现，通过多次运算取均值为 0.96 s，满足实际的工程需要。

4　结语

本文提出了计及 DG 出力波动性和负荷需求不确定性基于树背包理论的最优孤岛划分新模型及相应求解方法。本文首先构造了 DG 出力波动性和负荷需求不确定性基于树背包理论的随机最优孤岛划分新模型；进而，基于拉丁超立方抽样、确定性树背包算法、数理统计方法，确定各初始孤岛组成，包括 DG 及相应负荷节点；最后，对每个初始孤岛在考虑孤岛重构的基础上采用基于随机最优潮流的优化调整，通过优化调整而保证 DG 孤岛运行的最优性和安全性、经济性。本文方法实现了计及分布式发电及负荷出力不确定性情况下的最佳孤岛的系统性形成方法。由于以可再生能源为主要一次能源的高密度 DG 的并网是大势所趋，且其出力具有天生的波动性及间歇性，因此，本文的方法具有一定的工程应用前景。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参考文献

[1] 卢志刚，董玉香.含分布式电源的配电网故障恢复策略[J].电力系统自动化，2007，31(1)：89-92.
LU Zhigang，DONG Yuxiang. Service restoration strategy for the distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(1)：89-92.

[2] 谢夏慧，汪沨，卢鸣凯，等.大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案[J].电网技术，2013，37(7)：1834-1840.
XIE Xiahui，WANG Feng，LU Mingkai，et al. A distributed generation-based local self-recovery scheme for distribution network at post-blackout early stage of power grid restoration [J]. Power System Technology，2013，37(7)：1834-1840.

[3] 向月，刘俊勇，姚良忠，等.故障条件下含分布式电源配电网的孤岛划分与重构优化策略研究[J].电网技术，2013，37(4)：1025-1032.
XIANG Yue，LIU Junyong，YAO Liangzhong，et al. Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology，2013，37(4)：1025-1032.

[4] 刘传铨，张焰.计及分布式电源的配电网供电可靠性[J].电力系统自动化，2007，31(22)：46-48.
LIU Chuanquan，ZHANG Yan. Distribution network reliability

considering distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 46-48.

[5] 王旭东，林济铿.基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分[J].中国电机工程学报，2011，31(7)：16-20.
WANG Xudong, LIN Jikeng. 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.

[6] 王旭东，林济铿.含分布式发电配电系统的孤岛划分[J].中国科学：技术科学，2011，41(1)：1-10.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation [J]. Science in China: Technology Science, 2011, 41(1): 1-10.

[7] 于文鹏，刘东，翁嘉明.含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J].电力系统自动化，2013，37(24)：23-30.
YU Wenpeng, LIU Dong, WEN Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generations and improved greedy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 23-30.

[8] PHAM T T H, BÉSANGER Y, HADJSAID N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 398-406.

[9] JIKENG L, XUDONG W, PENG W, et al. Two-stage method for optimal island partition of distribution system with distributed generations[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(3): 218-225.

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

[11] 何禹清，彭建春，文明，等.含风电的配电网重构场景模型及算法[J].中国电机工程学报，2010，30(28)：12-18.
HE Yuqing, PENG Jianchun, WEN Ming, et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 12-18.

[12] 于晗，钟志勇，黄杰波，等.采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J].电力系统自动化，2009，33(21)：32-35.
YU Han, CHUNG Chiyong, WONG Kitpo, et al. A probabilistic load flow calculation method with Latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35.

[13] 李雪，李渝曾，李海英.几种概率潮流算法的比较与分析[J].电力系统及其自动化学报，2009，21(3)：12-17.
LI Xue, LI Yuzeng, LI Haiying. Comparison and analysis of several probabilistic power flow algorithms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(3): 12-17.

[14] 王成山，王守相.负荷变化不确定性的配电网络重构区间评价方法[J].中国电机工程学报，2002，22(5)：49-53.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. An interval assessment method for distribution network reconfiguration considering load uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 49-53.

[15] 白杨，汪洋，夏清，等.水-火-风协调优化的全景安全约束经济调度[J].中国电机工程学报，2013，33(13)：2-9.
BAI Yang, WANG Yang, XIA Qing, et al. A full-scenario SCED with coordinative optimization of hydro-thermal-wind power[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(13): 2-9.

[16] 赵晶晶，李新，彭怡，等.基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J].电网技术，2009，33(17)：162-166.
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. Integrated optimization based on particle swarm optimization for distribution network reconfiguration and the power injection of distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.

[17] 杨宁，文福拴.基于机会约束规划的输电系统规划方法[J].电力系统自动化，2004，28(14)：23-27.
YANG Ning, WEN Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.

[18] RAO R S, RAVINDRA K, SATISH K, et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1): 317-325.

[19] 林济铿，潘光，李云鹏，等.基于基本树的网络拓扑放射性快速判断方法及配电网重构[J].中国电机工程学报，2013，33(25)：156-166.
LIN Jikeng, PAN Guang, LI Yunpeng, et at. A fast determination method of topological radial property of distribution network based on basic-tree and distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 156-166.

[20] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.

[21] WU Y K, LEE C Y, LIU L C, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1678-1685.

[22] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

李　飞(1989—)，女，硕士，主要研究方向：电力系统解列、配电网的故障恢复。E-mail: a_lifeib@sina.com

徐　弢(1979—)，女，通信作者，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：主动配电网、分布式发电系统分析与仿真、分布式人工智能及应用等。E-mail: taoxu2011@tju.edu.cn

林济铿(1967—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：电力系统稳定性分析及控制、配电网自动化、智能电网。E-mail: mejklin@126.com

（编辑　孔丽蓓）

（下转第 132 页　continued on page 132）

(上接第 113 页　continued from page 113)

Island Partition of Distribution Network Considering Uncertainty of Distributed Generators and Loads

LI Fei[1], *XU Tao*[1], *LIN Jikeng*[2], *LIU Yangsheng*[2], *SUN Yihao*[3]

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;
2. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Electric Power Economic Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: For the island partition of distribution network considering the output fluctuation of distributed generators (DG) and load uncertainty, a new optimal island partition model and its solving method are presented based on tree knapsack problems (TKP). The basic idea of the paper is first, a new stochastic island partition model considering the uncertainty of DGs and loads is developed. Then the Latin hypercube sample method, the deterministic tree knapsack algorithm and mathematical statistics method are adopted to determine the composition of the initial island, including DGs and loads. Finally, for each initial island, the stochastic optimal power flow is used to optimize and adjust the initial island on the basis of island reconfiguration. Through the above optimization and adjustment, the security, optimization and economy for each DG island operation are ensured. The method has achieved optimal islanding under the uncertainty of DGs and loads, the islands most likely to appear according to the real-time situation, which has a stronger credibility compared with the condition of certainty. The results of an PG&E 69-bus distribution system with several DGs show the validity of the proposed model and method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177107).

Key words: distributed generator (DG); uncertainty; Latin hypercube sampling; tree knapsack problem; optimization and adjustment