www.scichina.com

tech.scichina.com



# 含分布式发电配电系统的孤岛划分

王旭东, 林济铿\*

天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072

\* E-mail: mejklin@126.com

收稿日期: 2010-05-18; 接受日期: 2010-08-16

摘要 提出了一种基于树背包问题(tree knapsack problem, TKP)的含分布式发电(distributed generation, DG)配电系统最优孤岛划分新模型;并利用深度优先动态规划算法(depth-first dynamic programming algorithm,简记为 DPA)进行求解. 该模型计及了负荷的优先级、可控性/不可控性,以及功率平衡、电压、设备载流量约束,符合实际工程要求. 所提的算法将含多 DG的配电系统孤岛划分问题分解成多个 TKP, 然后利用 DPA 逐个对这些问题进行求解,并经过孤岛合并过程而找到最优孤岛划分的初始方案;最后通过可行性校验和调节而得到最终的孤岛划分方案. 本文算法具有较强的理论基础,计算时间复杂度低,能够在有限的时间内找到近似最优解. 算例的计算结果验证了本文算法的有效性.

**关键词** 岛统 发 间 岛 统 发 问 别 统 发 问 划 动 态 发 问 划

孤岛运行是配电系统在引入分布式发电(distributed generation, DG)之后的一种新的运行方式.在这种运行方式下,配电系统的部分用户仅由 DG 进行供电,包含这部分用户及 DG 的系统被称为配电系统中的电力孤岛,简称之孤岛[1].在故障发生之后,系统失电期间的孤岛划分所遵循的原则是在满足各种约束的前提下,重要负荷优先得到供电恢复,同时使尽可能多的负荷供电得到恢复.制定最优的孤岛划分方案可以充分发挥 DG 的优势,提高系统可靠性,因此是配电系统孤岛运行方式研究的关键课题之一.

现有的配电系统计划孤岛方面的文献大致可以 分为以下三类.

第一类研究孤岛运行的可行性和控制模式.文献[2]通过仿真证实了智能配网环境下孤岛运行的可行性.文献[3]研究了分布式电源的并网和孤岛运行状态,并提供了有效的控制策略以保证孤岛内部电压和频率的稳定.

第二类研究孤岛运行对配电系统可靠性的影响. 文献[4~8]研究了计及孤岛运行方式的配电系统可靠 性评估方法. 这些文献的结论均表明合理的孤岛运 行方式可以显著提高配电系统可靠性.

第三类研究如何进行合理孤岛划分. 文献[9]提出了利用 DG 和负荷的状态实现自适应孤岛运行的基本框架;但该文并没有给出孤岛划分的具体算法. 文献[10]提出了以功率平衡为约束,以所恢复的等值有效负荷最大为目标函数的最优孤岛划分模型;但该文的孤岛划分策略没有考虑到故障发生后网络结构的改变. 文献[11]给出了以 DG 为中心,按负荷等级由高到低依次向电源周围负荷供电的有效算法;文献[12]提出了不考虑负荷优先级,并基于树模型的孤岛划分算法,树模型的根节点为故障点;该方法按照深度优先搜索顺序自上而下依次断开支路(相应地去掉该支路所带的负荷),直到剩余的负荷及 DG 满足功率平衡和设备容量约束. 文献[11, 12]方法均未

英文版发表信息: Wang X D, Lin J K. Island partition of the distribution system with distributed generation. Sci China Tech Sci, 2010, 53(11): 3061-3071, doi: 10.1007/s11431-010-4138-6

考虑对可控负荷(可控负荷:可以对此类负荷进行直 接控制,即可以部分恢复供电:与之相对的是不可控 负荷: 在母线通电的同时得到全部供电恢复, 否则, 完全不能恢复供电[13])的处理. 文献[13]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;该方法在减负荷过程中首先削减可控负荷,增负 荷过程中首先增加不可控负荷. 不难看出, 该策略只 能形成一个孤岛,即使在网络中电气距离相距较远 的 DG 依然会被划分在一个孤岛中, 孤岛的规模较大, 网损较重,有限的DG出力将很大程度地被系统网损 所消耗. 从优化的角度考虑, 最优的孤岛划分方案可 能把多个DG分别划入不同的孤岛之中,即包含多个 孤岛.

本文提出了一种基于树背包问题(tree knapsack problem, TKP)的含多 DG 配电系统的最优孤岛划分新模型,并提出了求解该模型的有效算法. 该模型考虑了孤岛内的功率平衡、负荷优先级、"可控负荷"和"不可控负荷"对最优孤岛划分的影响;所提出算法的计算时间复杂度是工程可接受的;算例的计算结果及与其他方法的对比表明了本文模型及算法的有效性.

#### 1 含 DG 配电系统孤岛划分图模型

#### 1.1 配电系统拓扑构建

放射状方式运行的实际配电系统设备繁多,接线复杂,网络节点数目庞大.为了减小系统规模,本文对配电系统的拓扑结构进行如下简化:主馈线和分支馈线构成配网的网架.如果系统中两个节点之间的线路上不存在可控开关,如断路器、隔离开关,这两个节点必然同时得到供电或者同时失去供电,所以,可将这两个节点进行合并,合并后节点的负荷为这两个节点负荷之和,从而减少网络节点数目.对配网中的众多T接线即可按上述过程进行处理,减化系统结构.

考虑到负荷的可控性和不可控性,对负荷节点进行如下处理: 假设负荷节点所连接的负荷  $P_L$  中可控和不可控负荷所占比例分别为 a 和  $b(a+b=1; a \ge 0,$ 

 $b \ge 0$ ). 若 a > 0,设置一个附加节点将 L 所连可控负荷引出,该附加节点通过一条含开关的虚拟线路与原节点相连接,其负荷为  $a * P_L$ ;原负荷节点所连负荷变为单纯的不可控负荷  $b * P_L$ .

经上述处理,网络中每一条支路均包括一个开关;相对于电源方向而言,子节点得到供电的前提是 其父节点得到供电.对原始网络的处理如图 1 所示.

原系统如图 1 中(a)所示, 节点 v 和  $s_v$  之间的支路上没有开关. 原系统经节点合并和负荷节点处理之后如图 1(b)所示,  $v_1$ ,  $v_2$  为附加节点, 引出可控负荷.

### 1.2 含 DG 配电系统的树模型

DG 主要通过两种方式接入电力系统<sup>[11]</sup>: 1)通过变电站母线接入; 2)通过馈线接入. 如图 2 所示.

图 2 是一个典型的三馈线配电系统, 其中, DG1 通过母线 12 接入系统; DG2 接到了馈线 23 的中间,接入点如图 2 中 *C* 所示.

若以任一DG为根节点,其余DG、负荷节点、连

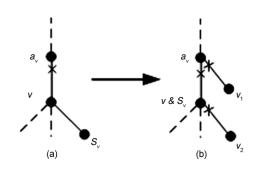


图 1 对原始网络的处理

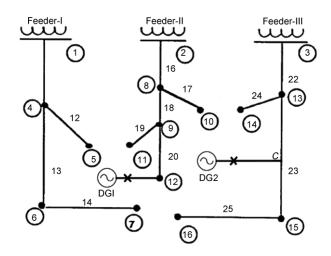


图 2 含分布式发电的配电系统

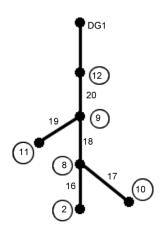


图 3 以 DG1 为根的 FeederⅡ 树模型

接节点为分枝节点,则含 DG 的配电网络形成了一个有根树.对于图 2 所示配网,若以接到母线 12 上的 DG1 为根节点,则图 2 中 Feeder Π 的树模型如图 3 所示.

若以图 2 中接到馈线 23 上的 DG2 为根节点,则 FeederIII 的树模型如图 4 所示. 其中馈线 23 被分成两部分: 23-1 和 23-2.

#### 1.3 含 DG 配电系统孤岛划分模型

在系统发生故障且故障隔离之后,故障下游系统 DG 的孤岛运行应使得重要负荷优先、快速地得到供电恢复.为了充分发挥 DG 的供电能力,减少用户的总体停电时间,在使重要负荷优先得到供电的同时,也应使尽可能多的受故障影响负荷的供电得到恢复.为实现这些目的,基于上述有根树,本文给出了如下含 DG 配电系统孤岛划分新模型.

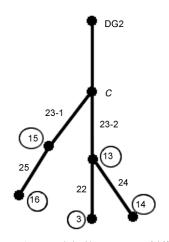


图 4 以 DG2 为根的 FeederIII 树模型

相关说明.

- 1) 本文以流出节点功率为正.
- 2) 树中各节点 v 的需求  $d_v$  为配网中对应节点 v 的功率, 若 v 为连接点(即 v 节点没有负荷), 则  $d_v = 0$ .
- 3) 树中各节点 v 的权值  $c_v$ : 对于负荷节点, $c_v=W_vd_v$ ,  $W_v$ 为节点v的负荷权重,负荷的优先级越高,其  $W_v$ 越大; 对于 DG 节点和连接节点, $W_v=0$ ,相应的  $c_v=0$ .
- 4) 变量  $x_v$ 表示树中的节点 v 是否被选入到最优 孤岛方案中: 若节点 v 被选中,则  $x_v$ =1; 反之,则  $x_v$ =0.

基于上述 4 点说明, 考虑功率平衡约束, 含 DG 配电系统最优孤岛划分问题可以表示为

$$\max \sum_{v=0}^{n} c_{v} x_{v},$$
s.t. 
$$\sum_{v \in S_{i} \setminus (S_{i} \cup G)} d_{v} + P_{loss}^{i} \leq \sum_{v \in S_{i} \cup G} \left| d_{v} \right|, i = 1, 2, \dots, k,$$

$$x_{v} = \{0, 1\},$$

$$x_{v} = 1, v \in G,$$

$$x_{i} \geq x_{v}, i \in l[v, g], \forall v \in V \setminus G, \exists g \in G.$$

$$(1)$$

(1)式的目标函数表示在满足功率平衡的基础上实现总供电收益最大:由于高优先级的负荷权值较高,故会优先得到供电恢复;同时,由于优先级低的负荷也包括在目标函数中,故也体现了让尽可能多的负荷恢复供电的目的.

(1)式中,n 为树中节点的最大编号,根节点的编号为 0. V 为树中节点的集合,G 为树中 DG 节点的集合; $S_i$  为孤岛方案中第i 个独立孤岛的节点集合,独立孤岛的总数为 k,  $P_{loss}^i$  为此独立孤岛内的线路损耗;I[v,g]表示节点v 和节点g 之间链上的所有节点,下文中出现的 I[\*,\*]也是同样的含义.第 1 个约束保证各个独立孤岛内负荷总量和线路损耗之和小于等于孤岛内所有 DG 平均输出功率的总量.第 3 个约束说明所有的 DG 节点都被选中;第 4 个约束表示,对于任意非电源节点v, 如果v 被选入到最终的孤岛中,则v 必与至少一个 DG 节点g 相连接,且v 与g 之间的链上的所有节点都将被选中.

可行的孤岛方案中各个孤岛内部所有节点的电压幅值均应在允许范围内,线路和变压器不过载. (1) 式是 0-1 线性整数规划问题. 但是,若把节点电压及设备载流量约束直接加入(1)式中进行联立求解,该问题由 0-1 线性整数规划问题变成非线性整数规划问

题,而非线性整数规划相对于线性整数规划要复杂的多,这也是文献[12,13]都采用"搜索加调节"思路的直接原因.这里的搜索加调节是指根据搜索策略形成初始孤岛,然后采取合理的调节措施实现孤岛的合理运行.本文也采取类似的措施对上述两类约束进行处理,从而简化孤岛搜索过程.

# 2 含单个 DG 配电系统的孤岛划分

#### 2.1 含单个 DG 配电系统的孤岛划分模型

若故障下游的配电系统中仅含有一个 DG,且根据"搜索加调节"的思路,暂不考虑电压约束、设备载流量约束,另外暂时忽略网损对于最优孤岛方案制定的影响(这一因素将在对方案进行校验调节时一并加以考虑),公式(1)可进一步简化为

$$\max \sum_{v=0}^{n} c_{v} x_{v},$$
s.t. 
$$\sum_{v=1}^{n} d_{v} x_{v} \leq H,$$

$$x_{v} = \{0,1\},$$

$$x_{a,v} \geq x_{v}, v = 1,2,\dots,n.$$
(2)

(2)式中,  $a_v$ 表示树中节点 v 的父节点, 下文中出现的  $a_*$ 也是同样的含义.  $H=|d_0|$ 为根节点 DG 的平均输出功率. 其中, 第 3 个约束表示如果节点 v 被选入到最终的孤岛中,则 v 与根节点之间的链上的所有节点都将被选中,这是一个连通约束.

由(2)式所描述的含单个 DG 配电系统的最优孤岛划分问题的实质为:在一个有根树中找到一个满足需求约束、包含根节点且节点权值和最大的连通子树,即树背包问题(tree knapsack problem, TKP)<sup>[14]</sup>, TKP 是一个 NP-完全问题<sup>[15]</sup>.本文将 TKP 的最优解称为最优孤岛.

文献[15]给出了(2)式中  $d_n$ 和 H 均为整数时的 TKP 深度优先动态规划算法(depth-first dynamic programming algorithm for tree knapsack problem, 简记为 DPA);该算法的计算时间复杂度是 O(nH). 如果配电系统各节点的注入功率都可化为整数,则可利用此动态规划算法求解仅考虑功率平衡约束含单个 DG 配电系统的最优孤岛划分问题. 由于分布式电源的功率一般较小,即 H 值较小,在系统规模不太大时(n 不太大),此算法的计算速度可以满足工程需要.

#### 2.2 求解树背包问题的动态规划算法

对于一个根节点编号为 0 的树 T=(V, E),假设树中各个节点的编号遵照深度优先遍历的顺序从 0 到 n排列,各个节点的权值和需求分别为  $c_v$  和非负整数  $d_v$ . DPA 的具体过程如下.

DPA 包括两个阶段: 评价函数计算和最优孤岛搜索,即:(I)按照深度优先遍历顺序计算各个节点的评价函数值;(II)然后利用各个节点的评价函数值,按照深度优先遍历的逆过程逐个判断各个节点是否会被选入到最优孤岛.

定义评价函数  $F_{L_{\iota}}(v,h)$  为

$$\begin{split} F_{L_k}\left(v,h\right) &= \max\left\{ \sum_{i=0}^k c_i x_i \mid x_{a_i} \ge x_i, 0 < i \le k, \sum_{i=1}^k d_i x_i \le h, \\ \text{and } x_v &= 1 \right\}, \end{split}$$
 (3)

其中,  $L_k$ ={0, 1, 2, ···, k}为 V 的一个节点子集(下文中的  $L_*$ 也是同样的含义).  $T_{L_k} = (L_k, E_{L_k})$  是由这些节点生成的 T 的子树,  $E_{L_k}$  是这个子树弧的集合. 对于给定的容量限制 h 和某个节点  $v \in L_k$ , 公式(3)中的 $F_{L_k}(v,h)$  为对应树  $T_{L_k} = (L_k, E_{L_k})$  包含 v 且以 h 为需求约束的 TKP 的目标函数值. 如果对应树  $T_{L_k} = (L_k, E_{L_k})$  包含 v 的所有孤岛方案都不能满足需求约束,令  $F_{L_k}(v,h) = -\infty$ ,这说明链 l(0,v]上所有节点的需求之和大于 h. l(0,v]表示除去根节点的链 l[0,v], 在下文出现的 l(0,\*] 也是同样的含义. 因此, $\max\{F_{L_n}(0,H),0\}$ 即为对应树 T=(V,E)以 H 为需求约束的 TKP 目标函数值.

节点 v 是否被选入到最优孤岛取决于下式是否成立

$$F_{L_{v-1}}\!\left(a_{v}, H - \sum_{i \in V \setminus J} d_{i}x_{i}\right) < F_{J}\!\left(v, H - \sum_{i \in V \setminus J} d_{i}x_{i}\right), \quad (4)$$

(4)式中, $a_v$ 为 v 节点的父节点, $J = L_{v-1} \cup T(v)$ ,其中,T(v)表示以节点 v 为根的子树,通过移去树 T 中的弧( $a_v$ , v)得到,(下文出现的 T(\*)也是同样的含义),V **V** 为原树节点集合除去 J 的部分.令  $h = H - \sum_{i \in V \cup J} d_i x_i$ ,不等式(4)的左、右两部分分别为对应树  $T_J = (J, E_J)$  当需求约束为 h 时,v 不被选中和被选中时对应的 TKP 目标函数最优值.因事先并不知道 V J

集合中哪些节点被选入最优方案中,公式(4)中的  $\sum\limits_{i\in V\setminus J}d_ix_i$  是未知的,即  $h=H-\sum\limits_{i\in V\setminus J}d_ix_i$  可能是[0, H] 集合内的任何整数,所以需要计算对应所有 h=0, 1, 2,…,H 时的 $F_{L_k}(v,h)$ ,从而为之后的最优孤岛搜索过程做准备.

DPA 的两个阶段如下.

第一阶段: 评价函数值的计算.

根节点是唯一肯定会被选入最优孤岛中的,基于深度优先遍历顺序递推求解  $F_{L_{\nu}}(v,h)$  的过程为

1)初始化

$$F_{L_0}(0,h) = c_0, \quad 0 \le h \le H, \tag{5}$$

此处,  $L_0=\{0\}$ .

2)前推计算. 计算当前所遍历节点的评价函数. 依据深度优先搜索的顺序对树中节点进行遍历, 将遍历过的节点收录到集合  $L_k$ 中, 其中, k 为当前遍历的节点, 对于  $k \neq 0$  以及所有 h=0, 1, 2,…, H, 计算  $F_{L_k}(k,h)$ 如下:

$$F_{L_{k}}\left(k,h\right) = \begin{cases} F_{L_{k-1}}\left(a_{k},h-d_{k}\right) + c_{k}, & \sum_{j \in I(0,k]} d_{j} \leq h, \\ -\infty, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
 (6)

前推过程计算了在  $L_k$ ={0, 1, 2, ···, k}的情况下对应树  $T_{L_k} = (L_k, E_{L_k})$ 包含节点 k 且以 h 为需求约束的TKP 的目标函数值.

3)回溯计算. 计算当前所遍历节点 k 的父节点  $a_k$  对应  $J = L_{k-1} \cup T(k)$  的评价函数  $F_J(a_k,h)$ . 如果遍历过程中遇到的当前节点 k 是树叶节点或者 k 的所有子节点都已经被遍历,则回溯到 k 的父节点  $a_k$ . (否则,从 k 的第一个未被遍历的子节点开始继续前推计算)对于所有  $h=0,1,2,\cdots,H$ ,计算  $F_J(a_k,h)$  如下

$$F_{J}(a_{k},h) = \max\{F_{L_{k-1}}(a_{k},h), F_{J}(k,h)\}.$$
 (7)

(7)式中所有符号的含义与(3)及(4)式同.

当所有节点都已经至少遍历一次,则从节点 n 回 溯到根节点,得到  $F_L$  (0,H),其中,  $L_n$  =  $\{0,1,2,\cdots,n\}$ .

关于上述算法, 文献[15]证明了如下命题的正确性.

#### 命師 1

对于 $T_{L_n} = (L_n, E_{L_n}), L_n = \{0, 1, 2, \dots, n\},$ 由上述递

推 计 算 得 到 的  $F_{L_n}(v,h) = \text{m a} \sum_{i=0}^n [c_i x_i \ x_{a_i} \geqslant x_i, 0 < i]$  $\leq n, \sum_{i=1}^n d_i x_i \leq h, \text{ and } x_v = 1\}, \text{ 其中 } v \in l[0,n], h=0, 1, 2, \cdots, H$ 

命题 1 保证了第一阶段计算所得到的maxFL( MO) 为该问题的最优目标函数值.

第二阶段:最优孤岛搜索.

由上述的前推及回溯计算,得到了用于判断所有节点在最大容量到 0 容量区间各个容量约束下是否被选入到最优孤岛的所有评价函数  $F_{L_k}(v,h)(v \in L_k,h)$  在此过程中节点 v 是否最后被选中并没有做出判断.因此,利用深度优先遍历的逆过程确定上述最优目标函数值所对应的最优孤岛.

为了叙述方便,设变量  $I_{L_k}(v,h)$  与  $F_{L_k}(v,h)$  相对应: 若  $I_{L_k}(v,h)$ =1,表示树  $T_{L_k}=(L_k,E_{L_k})$  在 h 约束下的最优子树包含 v 节点;反之则说明  $T_{L_k}=(L_k,E_{L_k})$  在 h 约束下的最优子树不包含 v 节点.对于根节点, $I_{L_0}(0,h)$  的取值为

$$I_{I_0}(0,h) = 1, \quad 0 \le h \le H.$$
 (8)

对于非根节点  $\nu$ ,根据公式(4)及其说明,令  $J = L_{\nu-1} \cup T(\nu)$ ,则相应 $I_J(\nu,h)$ 的取值如下

$$I_{J}\left(v,h\right) = \begin{cases} 1, & F_{L_{v-1}}\left(a_{v},h\right) < F_{J}\left(v,h\right), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{9}$$

最优孤岛所包含节点的确定过程为

- 1)初始 v=n, h=H;
- 2)判断对于所有  $v_k \in l[0,v], I_{J_k}(v_k,h)=1$  是否成立,其中,  $J_k = L_{v_k-1} \cup T(v_k)$ . 若是则将 v 节点进行标记,同时令  $v=v-1, h=h-d_v$ ; 否则 v=v-1;
- 3)如果 v>0 同时 h>0,则转到第 2)步;否则程序结束,被标记的节点生成最优孤岛.

#### 2.3 含单个 DG 的配电系统孤岛划分策略

基于TKP,本文给出含单个DG配电系统的孤岛划分策略如下.

1)以 DG 为根节点形成故障隔离之后故障下游配 电系统的树模型.

- 2)根据(2)式,设置树模型中各个节点的参数.
- 3)对树模型进行简化——去掉需求为零的节点.

在形成含单个 DG 配电系统的树模型之后,可以去掉其中需求为零的分支节点,进一步简化系统结构,形成简化等效树. 具体方法是: 如果 v 的需求为零,则将 v 和 v 的父节点  $a_v$  合并在一起;  $a_v$  节点的权值和需求作为新节点的权值和需求.

这样做的原因在于,在含单个 DG 的配电系统树模型中,若节点v的需求为零, $a_v$ 是v的父节点,如果 $a_v$ 没有被选入最优孤岛,根据连通约束,v也不会被选中;如果 $a_v$ 被选入最优孤岛,由于v的需求为零,将其选入最优孤岛不会增加孤岛的节点需求和以及节点权值和.换句话说,v是否被选中完全取决于 $a_v$ 是否被选中,所以从最优孤岛搜索的角度来考虑,可以将v和 $a_v$ 进行合并,从而简化系统结构.配电系统中包含众多连接节点,将这些需求为零的连接节点去掉可简化系统规模.

4)对参数  $d_v$ , H 进行整数化处理. 由于 DPA 要求  $d_v$ 和 H 都为非负整数,但实际配电系统各节点的功率 不可能都为整数,需要将其进行合理的整数化. 本文 采用的方法为: 首先选定适当的单位需求  $d_a(d_a>0)$ , 然后对所有的  $d_v$ 及 H 进行取整处理:  $d_v = \lceil d_v/d_a \rceil$ ,  $H = \lfloor H/d_a \rfloor$ ; 其中  $\lceil \rceil$  表示上取整运算, $\lfloor \rceil$  表示下取整运算. 在取整的过程中会产生舍入误差, $d_a$  的取值太大会使此类误差增加. 因此,合理的单位需求选择原则是: 在保证计算精度的前提下,选择尽可能大的  $d_v$ ,使得 H 尽可能的小从而减小计算时间.

5)利用2.2节所述 DPA 搜索简化等效树中的最优 孤岛作为初始孤岛. 如果计算得到的初始孤岛中含 有合并后的节点,则取消节点的合并,恢复节点合并 之前的节点之间的连接关系.

6)若初始孤岛的剩余功率不为零,则将其周围 具有最高优先级可控负荷点的部分负荷添加到初始 孤岛中;否则转第7)步.

7)孤岛可行性校验和相关调节.将初始孤岛中的 DG 设置为松弛节点,进行初始孤岛的潮流计算.若 DG 的出力大于其最大出力,则适当切除优先级低的部分可控负荷,直到使 DG 的出力小于等于其最大出力.如果孤岛中的某些节点电压越限或某些设备出现过载,则调节孤岛内 DG 电压、无功补偿装置、以及切除过载线路下游端的部分优先级低的可控负

荷,直到使系统能够安全运行为止.至此得到的方案即为最终的孤岛划分方案.

## 3 含多个 DG 配电系统的孤岛划分

由于(2)式所描述的含单 DG 配电系统的孤岛划分问题是 NP-完全问题,而由(1)式所描述的含多个DG(如 m 个 DG)配电系统的孤岛划分问题要比(2)式复杂的多(至少是其 m 倍),故其是一个 NP-难问题,不存在多项式时间算法.为满足工程要求,需要找到一个能在较短时间内获得近似最优方案的孤岛划分策略.

以含单个 DG 的孤岛划分方法为基础,本文进一步给出含多个 DG 的配网孤岛划分策略:建立初始孤岛,包括孤岛建立和孤岛合并两个过程;然后经过可行性校验和调节而得到最终的孤岛划分方案.

孤岛建立:分别以不同的 DG 为根节点形成有根树,然后利用 DPA 逐个求解对应这些有根树的 TKP 从而形成若干独立的孤岛,即把含多 DG 配电系统孤岛划分问题分解为多个 TKP,然后逐一进行求解.

孤岛合并: 在多个孤岛建立之后, 如果某个负荷 L 与若干 DG(由孤岛等效而成)直接相连, 说明该负荷的功率  $P_L$ 大于与之相连任一 DG 的平均输出功率. 假设与 L 相连的所有 DG 的平均输出功率之和为  $P_S$ , 在如下两种情况下, 进行孤岛合并:

L 为可控负荷;

L 为不可控负荷,  $P_L \leq P_S$ .

孤岛合并即将L和与之直接相连的DG节点合并成一个新的DG节点,即两个(或多个)孤岛合并成一个孤岛,从而实现对L的部分(L为可控负荷,且 $P_L > P_S$ )或全部( $P_L \le P_S$ )供电.

含多个 DG 配电系统的孤岛划分具体过程如下. 1)初始最优孤岛的构建.

①形成故障隔离之后的故障下游配电系统树模型. 选择其中具有最大平均输出功率的 DG 作为根节点, 其余 DG 的权值和需求都设为零, 将树中权值为零的节点与其父节点合并, 得到简化等效树模型.

②对参数 $d_v$ , H进行整数化处理. 利用 2.2 节所述 DPA 计算对应简化等效树的 TKP 从而得到一个最优孤岛, 然后恢复节点合并之前的节点之间的连接关系而得到现状树中包含根节点在内的一个孤岛; 由于①中将其他 DG 设为零需求节点, 所以这个孤岛中

可能含有不只一个 DG.

③如果②步得到的孤岛的节点数大于 1,则将此孤岛收缩为一个新的节点,并把其作为 DG 节点,其平均输出功率为此孤岛中的 DG 功率输出总量减去其中的负荷总量;否则,将根节点 DG 进行标记.

④如果现状树中所有 DG 均被标记,转到⑤步; 否则,从现状树中未被标记的 DG 集合中选择具有最 大输出功率的 DG 节点作为根节点形成新树模型,其 余未被标记 DG 的权值和需求都设为零,将树中权值 为零的节点与其父节点合并,得到简化等效树模型, 并返回到②步.

注: ②到④步即为孤岛建立过程, 其中含有多个TKP 求解过程.

⑤孤岛合并. 查看是否有负荷节点与数个 DG(其为孤岛收缩而成)直接相连: 若有,则进行合并操作. 如果合并后的孤岛剩余功率大于零,则将合并后的孤岛收缩为一个 DG 节点,转向④步; 否则转⑥步.

⑥如果初始孤岛方案中某些孤岛的剩余功率不为零,将其周围具有最高优先级的可控负荷点的部分负荷添加到初始孤岛方案中;否则孤岛构建过程结束,转第2)步.

2)各孤岛可行性校验和相关调节. 把各孤岛内的最大 DG 设置为各自的松弛节点, 其它 DG 节点设置为 PV 节点, 进行初始孤岛的潮流计算. 若潮流计算结果中各孤岛的松弛节点 DG 的出力大于其最大出力, 则适当切除优先级低的部分可控负荷, 直到使松弛节点 DG 的出力小等于其最大出力. 如果孤岛中的某些节点电压越限, 某些线路出现过载, 则调节孤岛内 DG 电压、无功补偿装置、以及切除部分过载线路下游端的部分优先级低的可控负荷, 直到使系统能够安全运行为止. 此方案即为最终的孤岛划分方案.

下面分析本文算法的工程实用性. 假设系统含有 k 个 DG, 在最坏的情况下, 孤岛建立需要通过计算 k 个 TKP 来完成. 第 i 个 TKP 的计算时间复杂度为  $O(nH_i)$  , 其中, i=1, 2, …, k; n 为输入规模即系统的节点总数,  $H_i = \lfloor P_i/d_a \rfloor$ ,  $P_i$  为第 i 个 DG 的平均输出功率,  $d_a$  为单位需求. 因此本文提出的含多个 DG配电系统最优孤岛搜索算法的时间复杂度为 O(nH), 其中,  $H = \sum_{i=1}^k H_i$  为系统中所有 DG 平均输出功率整数化的数值之和. 实现本文算法的 PC 机的 CPU 主频为 2 GHz, 内存为 1 GB. 在 C++编译环境下计算 2×

 $10^8$  次双精度浮点加运算的时间为 0.9 s. 利用此 PC 机,如果 n=1000,则在  $H<10^5$  的时候,本文算法可以在 1 s 内得到初始孤岛. 当然,系统规模越小,含有的 DG 就越少, H 值也就越小. 所以,当系统规模不太大的时候,本文算法可以保证在较短时间内得到近似最优孤岛划分方案.

多 DG 孤岛划分过程的流程如图 5 所示.

#### 4 应用示例

在美国 PG&E 的 69 节点配电系统的基础上构造 了含多个分布式电源的配电系统,如图 6 所示.原系

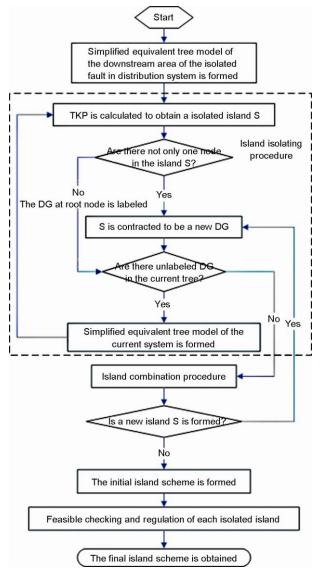


图 5 含多 DG 配电系统孤岛划分流程图

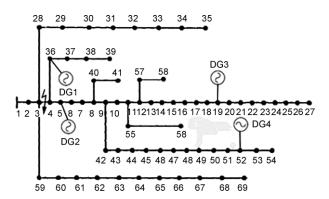


图 6 含分布式发电的美国 PG&E 的 69 节点配电系统

统的参数可参考文献[16].

将 4 个 DG, DG1~DG4, 分别连接到节点 36, 5, 19, 52 处, 其在系统失电期间的平均输出功率为 250, 50, 400, 1300 kW.

如图 6 所示,在线路 3-4 处发生了三相接地故障,保护正确动作将故障隔离,从而故障下游的系统失电.该系统中节点 {6,9,12,18,42,51,57}所接负荷为一类负荷,节点 {7,10,11,13,16,22,43~48}所接负荷为三类负荷,其余节点所接负荷均为二类负荷.一、二、三类负荷的单位权重分别取为100,10,1.系统中节点 {13,26,27,39,40,41,43,44,53~58}所连负荷均为可控负荷,节点 {11,21,38,48}所连负荷的40%为可控负荷;其余节点所连负荷均为不可控负荷.以1kW为单位需求.

利用上节所述孤岛划分策略进行故障下游系统的孤岛划分,具体步骤及结果如下.

1)以当前具有最大平均输出功率的电源 DG4 为根节点形成故障下游系统的有向树模型  $T_1$ , 其中DG1~DG3 这 3 个 DG 节点的权值和需求都设为零. 节点集合 $\{4, 5, 15, 19, 23, 25, 36, 45~47, 49, 52, DG1~DG3\}$ 中各节点的需求都为零,可以与其父节点相合并得到简化等效树. 基于简化等效树, 利用 DPA 计算得到包括 DG4 和负荷节点 $\{50~52\}$ 在内的孤岛  $S_1$ .

2)将  $S_1$  收缩成一个新的 DG 节点  $G_1$ ,  $G_1$  的功率为 24 kW. 将  $S_1$  进行收缩之后的现状树如图 7 所示.

3)以当前具有最大平均输出功率的电源 DG3 为根节点得到新的树模型 T<sub>2</sub>, 其中 DG1, DG2, G<sub>1</sub> 这 3 个 DG 节点的权值和需求都设为零. 去掉需求为零的节点,得到简化等效树. 基于简化等效树,利用 DPA 计算得到包括 DG3 和负荷节点集合{12~20, 57, 58} 在内的孤岛 S<sub>7</sub>;

4)将 S<sub>2</sub> 收缩成一个新的 DG 节点 G<sub>2</sub>, G<sub>2</sub> 的功率为 16.5 kW. 将 S<sub>2</sub> 进行收缩之后的现状树如图 8 所示.

5)以当前具有最大平均输出功率的电源 DG1 为根节点形成新的有向树模型 T<sub>3</sub>,由于负荷节点 36,4,5 的权值为零,所以将这个 3 个点合并到根节点.去掉节点 36,4,5 之后,DG1 和 DG2 直接相连,所以DG2 也被合并到根节点,合并后的 DG 称之 G<sub>3</sub> 将作为根节点,G<sub>3</sub> 的平均输出功率为 DG1 和 DG2 平均输出功率的总和 300 kW.去掉其他需求为零的节点,得到简化等效树。基于简化等效树,利用 DPA 得到包含 DG1, DG2 和负荷节点{4~9,36~37,40~42}在内的孤岛 S<sub>3</sub>;

6)将  $S_3$  收缩成一个新的 DG 节点  $G_4$ ,  $G_4$  的功率为 24.55 kW. 将  $S_3$  进行收缩之后的现状树如图 9

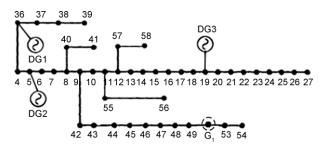


图 7 包含 G1 的现状树

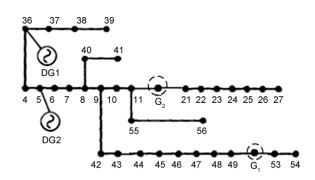


图 8 包含 G1 和 G2 的现状树

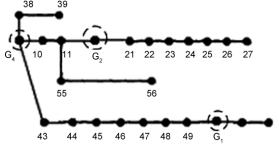


图 9 包含 G1, G2, G4 的现状树

所示.

7)依次以 G4, G2, G1 为根节点形成树模型, 搜索 到的最优孤岛都只是根节点本身, 因此, 开始孤岛合 并过程. 所有负荷节点都最多与一个 DG 直接相连, 无需进行孤岛合并, 初始孤岛构建结束.

8)初始孤岛方案中, $S_1$ 的剩余功率为 24 kW,负荷 49 和 53 与  $S_1$  紧邻,53 所连负荷为可控负荷,所以将  $S_1$ 的剩余电能 24 kW 提供给负荷点 53;  $S_2$ 的剩余功率为 16.5 kW,负荷点 11 和 21 与  $S_2$  紧邻,21 所连负荷含有可控负荷,且优先级较高,所以将  $S_2$ 的剩余电能 16.5 kW 提供给负荷点 21;  $S_3$  的剩余功率为 24.55 kW,负荷点 38, 10, 43 与  $S_3$  紧邻,负荷点 38 所连负荷含有可控负荷,且优先级较高,所以将  $S_3$  的剩余功率为 24.55 kW,提供给负荷点 38. 至此,负荷调节过程结束,3 个独立孤岛的剩余功率都为零,负荷调节之后的孤岛划分初始方案如图 10 所示.

在图 10 中,实线支路所连接的负荷点的全部负荷得到供电恢复;虚线支路的远离电源侧负荷点(节点 21, 38, 53)的部分负荷得到供电恢复.

校验图 10 所示的孤岛划分方案各孤岛中是否会出现节点电压越限、设备过载及功率平衡问题. 把各孤岛内具有最大出力的 DG 设为松弛节点, 其他 DG 设为 PV 节点, 进行相应的潮流计算; 计算结果表明,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  内没有出现节点电压越限的情况;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  的线路损耗分别为 3.67, 2.079, 0.305 kW. 由于未考虑损耗的情况下  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  的剩余功率为零, 为保证孤岛可以正常运行, 需要切除部分负荷. 负荷点 53, 13, 40 为二或三类负荷且为可控负荷, 故切除负荷点 53, 13, 40 的部分负荷, 切除的功率分别为 4, 2.1, 0.4 kW.

再次计算、 $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  的线路损耗分别为 3.665, 2.06, 0.304 kW; 计及损耗之后  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  的剩余功率 分别为 0.335, 0.04, 0.096 kW, 各节点电压及线路功

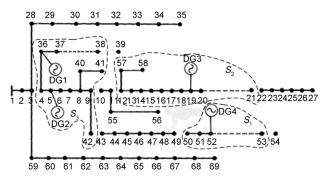


图 10 含多 DG 的配电系统最优初始孤岛划分方案

率均符合要求, 孤岛可以正常运行.

因此,将图 10 所示初始孤岛方案中负荷点 53,13,40 的负荷功率分别从 24,8,40.5 kW 调整到 20,5.9,40.1 kW 即得到最终孤岛划分方案.最终的孤岛划分方案包含了 3 个孤岛,其中,DG1 和 DG2 被划到同一个孤岛中.在重要负荷如{6,9,12,18,42,51,57}得到供电恢复的同时,大部分受故障影响的负荷得到了供电恢复.

为了比较,本文分别采用文献[11]和[13]所述的 孤岛划分策略对图 6 系统进行孤岛划分,其结果分别 如图 11,12 所示.

从恢复负荷总量方面来比较,本文算法恢复负荷总量为 1993.5 kW;而由文献[11]方法所得的如图 11 所示方案恢复负荷总量为 951.25 kW. 主要原因在于系统中节点 50 的功率需求为 1244 kW,但是由于此负荷为不可控负荷,在初始孤岛{DG4,51,52,53,54}形成之后,DG4 的剩余功率无法得到利用.从优先恢复重要负荷供电的角度考虑,本文算法恢复了重要负荷{6,9,12,18,42,51,57}的供电,而图 11 方

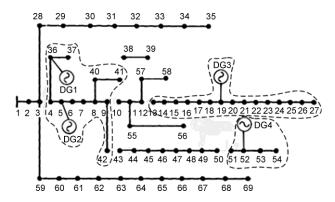


图 11 利用文献[11]方法得到的孤岛划分方案

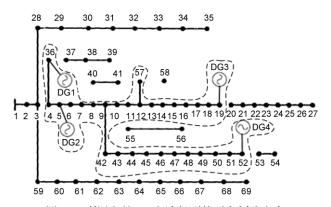


图 12 利用文献[13]方法得到的孤岛划分方案

案只恢复了重要负荷{6,9,18,42,51}的供电.

由文献[13]方法得到如图 12 所示方案,经潮流计算检验,该孤岛没有出现节点电压越限和设备过载,孤岛系统网损为 11.36 kW. 其中,为满足功率平衡,节点 13,43,44,11 所连接的全部可控负荷以及 48 所连部分可控负荷(13 kW)需要被切除. 该方案恢复负荷总量为 1986.85 kW,小于本文算法所恢复 1993.5 kW的负荷总量. 主要原因在于:本算例中DG相距较远,若将所有 DG连接成一个网络徒增孤岛规模,孤岛的网损随之变大,用于供电恢复的电能减少. 比较而言,本文给出的孤岛方案的网损仅为 6.029 kW.

上述算例的计算结果表明,相对于其他方法本文算法可以获得更为优化的孤岛方案.

#### 5 结论

本文提出了一种基于树背包问题含多个 DG 配

电系统的最优孤岛划分新模型,并提出了求解该模型的有效算法.该模型及算法具有以下特点.

1)计及了负荷优先级,可控负荷和不可控负荷; 计及了功率平衡、电压、设备载流量约束. 因此模型 及算法符合工程实际要求.

2)采用"搜索加调节"的策略把一个复杂的非线性整数规划问题分解为多个相对简单的线性整数规划问题,再经校验及调节而得到最后的方案;从而使得算法的计算复杂度为工程可接受.

3)本文算法具有较强的理论基础,能够确保找 到近似最优方案.

配网中 DG 的数量逐渐增加,孤岛运行必将成为配电系统的一种重要运行方式.由于故障、开关操作等原因系统结构时常变化,适用于各种系统结构的快速孤岛划分有助于最大程度的发挥 DG 的潜力,提高系统可靠性.因此,本文的方法有望在工程实际中得到进一步的应用.

#### 参考文献 \_

- 1 Rajamani K, Hambarde U K. Islanding and load shedding schemes for captive power plants. IEEE Trans Power Delivery, 1999, 14: 805–809
- 2 Chowdhury S P, Chowdhury S, Ten C F, et al. Operation and control of DG based power island in smart grid environment. In: 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Prague, 2009 June 8-11
- 3 Zeineidin H, El-Saadany E F, Salama M M A. Intentional islanding of distribution generation. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco. CA: IEEE, 2005. 1496–1502
- 4 Wang P, Billinton R. Time-sequential simulation technique for rural distribution system reliability cost/worth evaluation including wind generation as alternative supply. IEE Proc Gener, Transm Distrib, 2001, 148: 355–360
- 5 Bae I S, Kim J O. Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode. IEEE Trans Power Syst, 2007, 22: 785–790
- 6 Fuangfoo P, Lee W J, Kuo M T. Impact study on intentional islanding of distributed generation connected to a radial sub-transmission system in Thailand's electric power system. IEEE Trans Ind Appl, 2007, 43: 1491–1498
- 7 Atwa Y M, EI-Saadany E F. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation. IEEE Trans Power Syst, 2009, 24: 572–581
- 8 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析. 电力系统自动化, 2010, 34: 38-43
- 9 Caldon R, Stocco A, Turri R. Feasible of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation. Electr Power Syst Res. 2008, 78: 2017–2023
- 10 刘传铨, 张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性. 电力系统自动化, 2007, 31: 46-49
- 11 易新, 陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法. 电网技术, 2006, 30: 49-54
- 12 丁磊,潘贞存. 丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索. 中国电机工程学报, 2008, 28: 62-67
- 13 Mao Yiming, Miu K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution system with distributed generation. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18: 1346–1352
- 14 Johnson D S, Niemi K A. On knapsacks, partitions and a new dynamic programming technique for trees. Math Oper Res, 1983, 8: 1-14
- 15 Cho G, Shaw D X. A depth-first dynamic programming algorithm for the tree knapsack problem. Informs J C, 1997, 9: 431-438
- Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Trans Power Del, 1989, 4: 725–734