

DOI: 10.7667/PSPC162124

## 基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分

姚玉海<sup>1</sup>, 张璇<sup>2</sup>, 齐伟强<sup>1</sup>, 张岩<sup>1</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京市电力公司物资分公司, 北京 100053)

**摘要:** 针对传统孤岛划分方法存在的没有合理利用电网拓扑结构、算法搜索性能差等问题, 提出了一种基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分方法。首先, 采用 Dijkstra 算法得出 DG 到重要负荷的最短路径, 在满足孤岛划分约束条件的情况下, 将含有重要负荷的路径划分入孤岛。然后, 根据所得孤岛的邻接关系和负荷节点优先级, 在孤岛安全稳定运行的前提下, 逐步将更多的负荷划入孤岛。该方法能够充分发挥 DG 的供电能力, 并且具有较好的搜索能力, 不仅可以在最大程度上保证重要负荷的供电, 而且能够有效计及联络开关的作用。最后, 通过算例验证了算法可以有效地处理配电网孤岛划分问题。

**关键词:** 孤岛划分; Dijkstra 算法; 最短路径; 配电网; 分布式电源

### Island partition of the distribution system based on Dijkstra algorithm

YAO Yuhai<sup>1</sup>, ZHANG Xuan<sup>2</sup>, QI Weiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Research Institute, Beijing 100075, China;

2. State Grid Beijing Logistic Supply Company, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Traditional island partition method does not use network topology properly, has bad searching performance, etc. Aiming at these problems above, this paper proposes an island partition method for distribution system based on Dijkstra algorithm. Firstly, the shortest path from DG node to important load node is found out by using Dijkstra algorithm. On meeting the constraint condition of islanded partition, the paths containing important loads are preferentially incorporated into island. Secondly, under satisfying safety and stability operation of island, more loads are incorporated into island gradually based on adjacent relation and load priority of the obtained islands. The proposed method can give full play to power supply capability of DG and has a good searching ability; it not only ensures power supply of the important load to maximum extent, but also considers the function of connective switch. Finally, the example analysis shows that the proposed method can solve the problem of distribution system island partition effectively.

**Key words:** optimal island partition; Dijkstra algorithm; the shortest path; distribution system; distributed generation

## 0 引言

随着智能配电网的发展, 分布式电源(Distributed Generation, DG)在配电网中的渗透率越来越高<sup>[1-3]</sup>。为了充分发挥 DG 的作用, IEEE 提出了新的标准, 鼓励有意识的孤岛运行<sup>[4]</sup>。孤岛划分是智能配电网自愈控制的一项重要内容, 对提高配电网的供电可靠性具有重要意义<sup>[5-9]</sup>。

目前, 在孤岛划分问题上的研究成果, 主要分三类: 启发式算法、传统数学方法和图论算法。

### 1) 启发式算法

文献[10-12]以满足功率平衡约束为原则, 采用负荷量、负荷重要等级、电网运行数据等信息制定启发式规则, 进而求得负荷切除量最小、运行稳定的最优孤岛。

### 2) 传统数学算法

文献[13-14]分别基于整数动态规划算法和分枝定界算法求解孤岛划分问题。但是, 这些算法与上述启发式算法都没有考虑配电网中的联络开关, 没有合理利用电网的拓扑结构。

### 3) 图论算法

文献[15]提出了计及负荷可控性和优先等级的孤岛划分方法。文献[16-19]分别采用图论中的 Prim

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(沈阳供电公司信息化工作办公室 KJ[2013]896)

和 sollin 算法求解配电网孤岛划分问题。然而, 这些算法只能得出一个连通孤岛, 即使在电网中电气距离相距较远的 DG 也仍然会被划分在一个孤岛中, 造成了较大的网络损耗。

综上所述, 在配电网孤岛划分问题上, 当前方法未能有效利用联络开关的作用, 部分考虑联络开关的方法只能形成一个孤岛, 造成了较大的网络损耗, 电网已有的拓扑结构没有得到合理利用, 难以满足实际工程需要。因此, 研究一种综合考虑孤岛运行约束、负荷恢复量、负荷重要程度、负荷可控性、联络开关等因素的配电网孤岛划分方法是有必要的。

本文针对上述问题, 将图论中求解最短路径的 Dijkstra 算法应用于配电网孤岛划分问题。首先, 以功率为路径距离, 采用 Dijkstra 算法求出重要负荷与各个 DG 间的最短路径, 再以路径的形式形成初步划分方案, 然后, 根据节点优先级和孤岛对外连接关系等信息, 在初步孤岛方案基础上恢复其他负荷。

## 1 孤岛划分的目标及约束条件

### 1.1 孤岛划分的目标

在进行孤岛划分时需考虑以下几个目标。

#### 1) 恢复重要负荷

对负荷的重要程度和作用进行评估和划分, 根据负荷重要性由高到低的顺序分为一级、二级和三级负荷, 孤岛划分方案应保证重要负荷的优先供电。

#### 2) 恢复可控负荷

可控负荷有利于孤岛的安全稳定运行和孤岛划分的灵活性, 孤岛划分方案应尽量将可控负荷并入孤岛中。

#### 3) 恢复负荷量最大

为了最大程度地提高供电可靠性和发挥 DG 的作用, 在保证安全运行的情况下, 孤岛划分方案应尽可能恢复更多的负荷。

### 1.2 孤岛划分的约束条件

#### 1) 功率平衡约束

为使岛内供用电功率平衡, DG 的总发电量应大于用电总负荷量。

$$\sum_{i \in A} P_{Gi} - \sum_{j \in A} P_{Lj} - P_{\text{loss}} > \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $P_{Gi}$  为孤岛内第  $i$  个 DG 的发电量;  $P_{Lj}$  为孤岛内第  $j$  个负荷的负荷量;  $P_{\text{loss}}$  为孤岛内的网络损耗;  $A$  为孤岛的节点集合;  $\varepsilon$  为孤岛运行中需要满足的安全裕量。

#### 2) 电网的节点电压约束

#### 3) 电网的支路电流约束

4) 参与孤岛划分的 DG 应满足的条件如下:

(1) 孤岛划分和孤岛运行依托于统一的管理系统, 应具备远程通信和集中控制功能, 以便于对 DG 进行远程测量和控制;

(2) 根据现行规程规定, 故障后配电网中的所有 DG 必须短时退出运行, 所以参与孤岛划分的 DG 应具有黑启动功能;

(3) 为了维持孤岛的安全稳定运行, DG 应具有储能功能;

(4) 为了维持孤岛的安全稳定运行, DG 应具有电压和频率调节功能。

## 2 基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分

配电网结构复杂且运行方式灵活, 负荷与孤岛间的供电路径往往不唯一。一个负荷节点能否被划入孤岛, 一个重要因素就是孤岛的剩余容量是否大于该负荷节点所在路径上的总负荷量。求出重要负荷与孤岛间的最短功率路径, 再将满足约束条件的路径划入孤岛, 可以保证重要负荷在最大程度上得以恢复。

在建立拓扑时, 将负荷和 DG 视为节点, 连接节点之间的设备视为支路。为了求出重要负荷与孤岛间的最短功率路径, 将支路距离定义为支路下游节点所对应的功率。以 DG 节点为根节点, 功率方向为 DG 节点流向负荷节点, 功率流出节点为上游节点, 功率流入节点为下游节点。从支路距离的定义可知, 最短路径并非传统意义上的物理距离最短, 而是功率意义上的距离最短。

根据孤岛划分的目标, 确定负荷节点优先级的顺序如下。孤岛应优先保证重要负荷的供电, 负荷重要程度的优先级最高。负荷的可控程度可以保证孤岛划分的灵活性和孤岛的安全运行, 负荷可控性的优先级其次。孤岛在满足安全约束的情况下应尽可能地包含更多负荷, 负荷量的优先级最次。即不同重要程度的负荷, 重要程度高的负荷应优先恢复。重要程度相同的负荷, 具有可控能力的负荷应优先恢复, 重要程度相同, 且均具有可控能力, 则负荷量大的负荷优先恢复。

求解孤岛划分问题的主要思路如下。首先, 由于一级负荷停电后对社会生产生活影响较大, 应尽量保证这部分负荷的优先供电。采用 Dijkstra 算法求出各个 DG 节点与所有一级负荷节点的最短路径。在满足孤岛划分约束条件下, 先将这部分负荷划入孤岛中。然后, 为了避免孤岛范围过大而导致潮流远距离流动所引起的网络损耗, 对于其他负荷节点采取就近恢复的原则。根据孤岛的剩余容量和

对外邻接关系,将优先级高的节点逐个划入孤岛,直至孤岛划分的约束条件无法满足。最后,通过潮流计算来验证所得孤岛方案的合理性,继而采取相应的调节措施使得孤岛可以安全运行。

### 2.1 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法<sup>[18]</sup>是求解最短路径问题的经典方法,在电网规划<sup>[19]</sup>、黑启动<sup>[20]</sup>、电力通信网<sup>[21]</sup>等领域有着广泛应用。该算法可以得出源点到其他所有节点的最短路径,利用这个特点可以有效得出 DG 节点到所有负荷节点的最短路径,从而将合适的负荷与 DG 构成孤岛。

Dijkstra 算法的基本思路是:假设每个节点都有一组标号 $(d_j, \varphi_j, s_j)$ 。其中: $d_j$ 是 DG 节点  $m$  到节点  $j$  的最短路径的长度; $\varphi_j$ 是从 DG 节点  $m$  到  $j$  的最短路径中节点  $j$  的前一节点; $s_j$ 记录节点  $j$  是否被标记, $s_j=0$ 表示节点  $j$  未标记, $s_j=1$ 表示节点  $j$  已标记。

Dijkstra 算法求解最短路径的基本步骤如下:

1) 初始化,电网含有  $M$  个 DG 节点,  $N$  个负荷节点,令  $m=1$ ,其中  $m=1, \dots, M$ 。建立电网的邻接矩阵  $A$ 。邻接矩阵元素  $a_{ij}$  的赋值分为三种情况:(1)  $i=j$  时,则  $a_{ij}=a_{ji}=0$ ;(2)  $i \neq j$  且节点  $i$  与节点  $j$  之间无支路,则  $a_{ij}=a_{ji}=\infty$ ;(3)  $i \neq j$  且节点  $i$  与节点  $j$  之间有支路,则  $a_{ij}=p_j$ ,  $a_{ji}=p_i$ ,其中  $p_i$  和  $p_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的负荷量。

2) 将邻接矩阵  $A$  中 DG 节点  $m$  之外的 DG 节点所在的行和列设为 0。

3) 设置 DG 节点  $d_m=0$ ,  $\varphi_m=\text{null}$ ,  $s_m=1$ ; 负荷节点  $d_j=\infty$ ,  $\varphi_j=\text{null}$ ,  $s_j=0$ 。

4) 获得  $d_j$ 。采用式(2)计算从所有已标记的节点  $l$  到其直接连接的未标记节点  $j$  的距离。

$$d_j = \min(d_l, d_l + p_j) \quad (2)$$

5) 标记节点。从所有未标记的节点中选出  $d_j$  中最小的一个节点(为了方便描述假设该节点为节点  $i$ ),并将该节点  $i$  进行标记,即  $s_i=1$ 。

6) 获得  $\varphi_j$ 。从已标记的点中找到直接连接到节点  $i$  的节点(为了方便描述假设该节点为节点  $j$ ),该节点  $j$  即为节点  $i$  到 DG 节点  $m$  之间最短路径上的前一点,即  $\varphi_i=j$ 。

7) 判断所有负荷节点是否均被标记,若均被标记则进行下一步,否则转步骤 4)。

8) 判断算法结束条件,若  $m > M$ ,则对得出的所有路径进行安全校验,将不满足孤岛划分约束条件的路径删除,并输出算法结果;否则  $m=m+1$ ,并重新生成邻接矩阵  $A$ ,转步骤 2)。

### 2.2 孤岛划分的求解步骤

孤岛划分的算法步骤如下所述,算法流程见图

1 所示。

1) 初始化,输入电气基本信息。

2) 采用 Dijkstra 算法得出所有 DG 节点到一级负荷节点的最短路径。

3) 对一级负荷节点进行孤岛划分。

(1) 由于电网结构的复杂性,每个一级负荷节点可能与多个 DG 节点之间存在最短路径。根据求得的最短路径,对一级负荷节点到各个 DG 节点的路径按照距离从小到大的顺序进行排序。为了叙述方便,假设共有  $N$  个一级负荷节点具有最短路径信息,每个一级负荷节点的最短路径个数为  $l$ 。则  $R_{ij}$  表示为第  $i$  个一级负荷节点根据路径距离顺序的第  $j$  条路径。 $s_i$  记录节点  $i$  是否被标记,  $s_i=0$  表示节点  $i$  未标记,  $s_i=1$  表示节点  $i$  已标记。令  $i=1, j=1$ , 并初始化所有节点未标记。

(2) 判断节点  $i$  是否被标记。若  $s_i=1$ , 则转(4); 若  $s_i=0$ , 则判断路径  $R_{ij}$  与所连接 DG 形成孤岛后是否满足孤岛划分约束条件。若满足, 则将该路径上的负荷节点划入孤岛中, 并标记该路径上的所有一级负荷节点; 若不满足, 则进行相应调整, 根据路径负荷量和孤岛容量的差值切除重要程度低的可控负荷, 直至满足约束条件, 将该路径划入孤岛, 并标记该路径上的所有一级负荷节点, 并转(4); 若进行调整之后仍不满足约束条件, 则该路径不划入孤岛, 进行下一步。

(3) 判断节点  $i$  是否具有其他路径可以划入孤岛。若  $j < l$  则令  $j=j+1$ , 并转步骤(2); 若  $j \geq l$ , 则标记节点  $i$  并转下一步。

(4) 判断所有一级负荷节点是否均被标记。若  $i \geq N$ , 则进行下一步; 若  $i < N$ , 则令  $i=i+1$ , 并转步骤(2)。

4) 对其余负荷节点进行孤岛划分。

(1) 为了描述方便,假设电网含有  $M$  个孤岛。 $s_i$  记录孤岛  $i$  是否被标记,  $s_i=0$  表示孤岛  $i$  未标记,  $s_i=1$  表示孤岛  $i$  已标记。令  $i=1$ , 并初始化所有孤岛未标记。

(2) 判断孤岛  $i$  是否具有剩余容量。若没有剩余容量, 则令  $s_i=1$ , 并转(5)。在有剩余容量的情况下判断孤岛  $i$  是否被标记。若  $s_i=1$ , 则转(5)。若  $s_i=0$ , 则转下一步。

(3) 搜索与孤岛直接相连接的负荷节点。根据孤岛  $i$  的对外连接关系,判断是否有其他孤岛与孤岛  $i$  有直接联系。若没有直接联系,则得出与孤岛  $i$  直接相连接的负荷节点集合,并根据节点优先级对这些节点按照重要程度从高到低的顺序进行排序。若有直接联系,则将孤岛  $j$ (为了描述方便,假设为

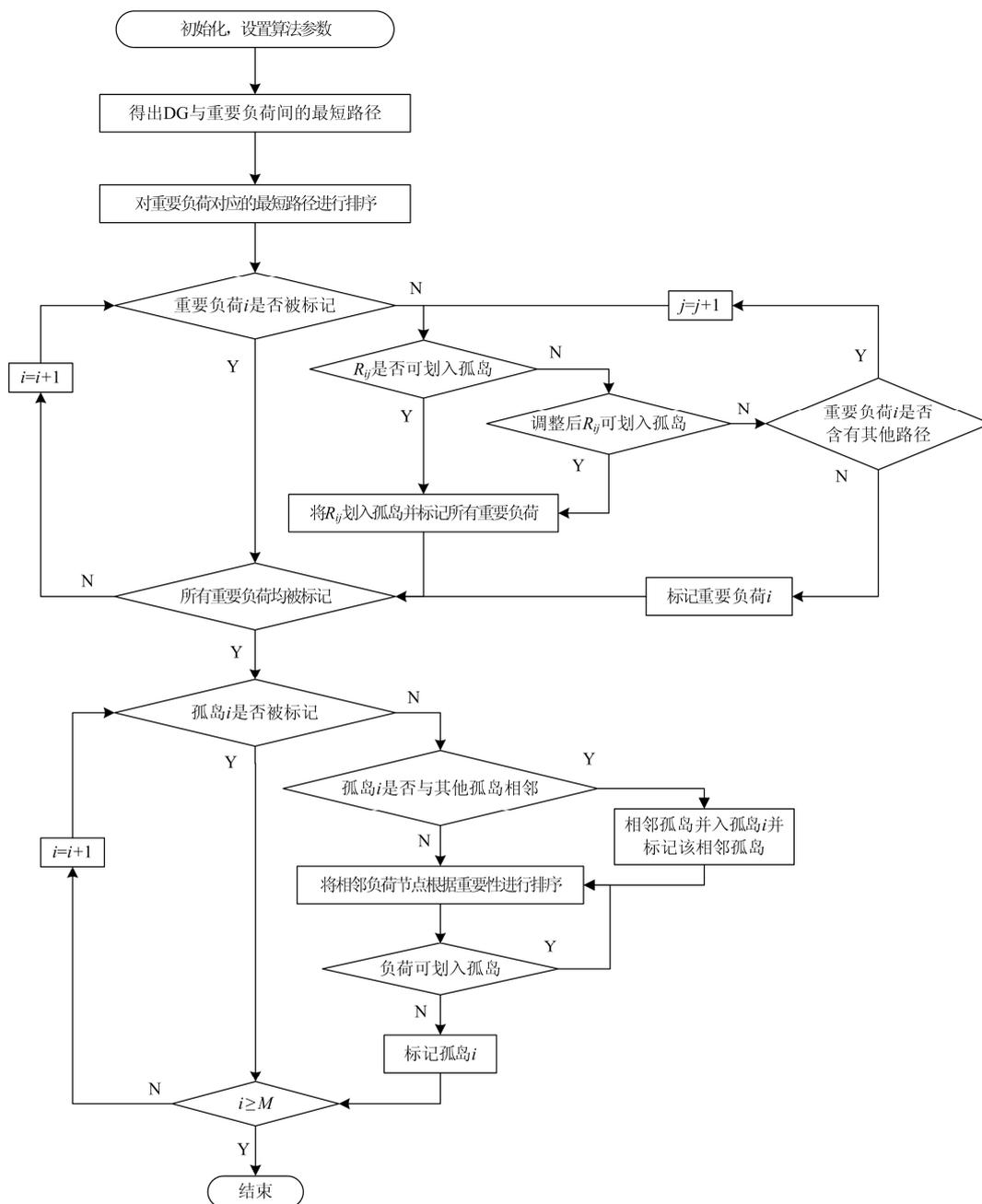


图 1 孤岛划分算法流程图

Fig. 1 Flow chart of island partition

孤岛  $j$ ) 并入孤岛  $i$ , 并将孤岛  $j$  标记, 再得出合并后的孤岛  $i$  直接相邻的负荷节点集合, 并根据节点优先级对这些负荷节点按照重要程度从高到低的顺序进行排序。

(4) 判断是否有负荷节点可以划入孤岛。根据负荷节点的顺序, 依次判断负荷节点划入孤岛后是否满足约束条件。若满足, 则将该节点划入孤岛, 并转步骤(3)。若不满足则进行相应的调整, 对当前孤岛范围内优先级与该负荷节点相等或小于的可控负

荷进行切除调整。如果可控负荷的调整量无法满足约束条件时, 再将该负荷节点与孤岛范围内的叶子节点进行优先级比较, 将优先级低的叶子节点切除, 直到满足约束条件。若调整之后仍不满足约束条件, 则根据节点序列判断下一个节点。若整个节点序列中不存在可以并入孤岛的节点, 则标记该孤岛, 并转下一步。

(5) 判断算法是否结束。若  $i < M$ , 则令  $i = i + 1$ , 并转步骤(2); 若  $i \geq M$ , 则对孤岛进行潮流计算来验

证所得孤岛方案是否满足约束条件, 如果不满足, 则切除优先级低的可控负荷或叶子负荷节点进行调整, 输出孤岛划分方案。

### 3 算例分析

采用文献[14]所述算例, 该算例采用美国

PG&E69 节点配电系统<sup>[22]</sup>。为了使得算例具有对比性, 本文也将孤岛运行中需要满足的裕度设为 0, 并且忽略无功功率, 这对于算法有效性的验证没有影响。假设所有 DG 均满足孤岛划分条件, 线路开关均具有三遥功能。电网运行状态如图 2 所示, 其中实线和虚线分别代表闭合和打开状态。

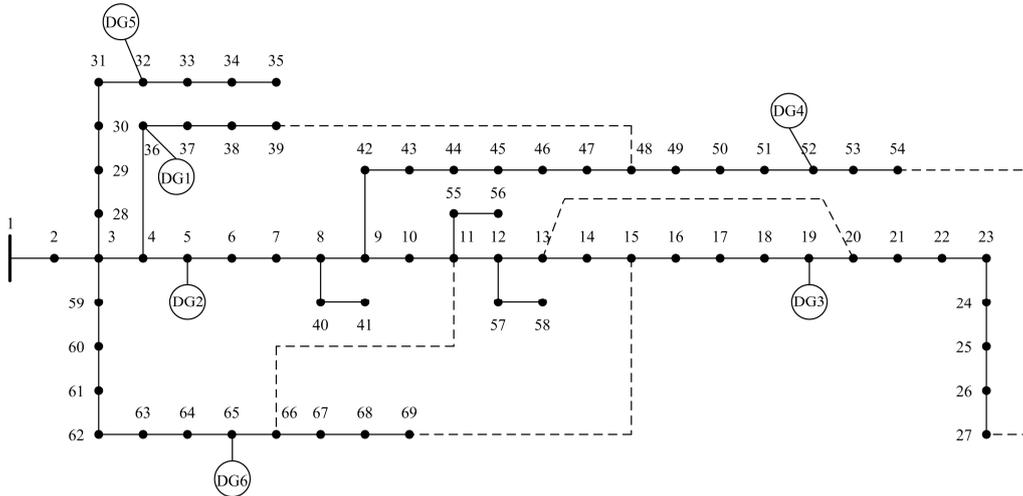


图 2 含分布式发电的 69 节点配电系统

Fig. 2 69-bus distribution system with DGs

算例 1: 采用文献[14]所述算例, 线路 2-3 处发生了三相接地故障, 经故障隔离, 故障下游的系统失电。分布式电源、负荷重要程度和负荷可控程度参见文献[14]。

图 3 和图 4 分别是本文方法和文献[14]所得到的孤岛划分方案, 点划线所包围的区域为孤岛划分

方案。从图 3 与图 4 的对比可知, 本文方法在 DG1、DG2、DG4、DG5 和 DG6 所形成的孤岛方案上得到了与文献[14]相同的结果, 在 DG3 所形成的孤岛方案上与文献[14]不同。其中, 本文在 DG3 所形成的孤岛方案中, 节点 13 完全切除, 节点 21 切除 45.6 kW。

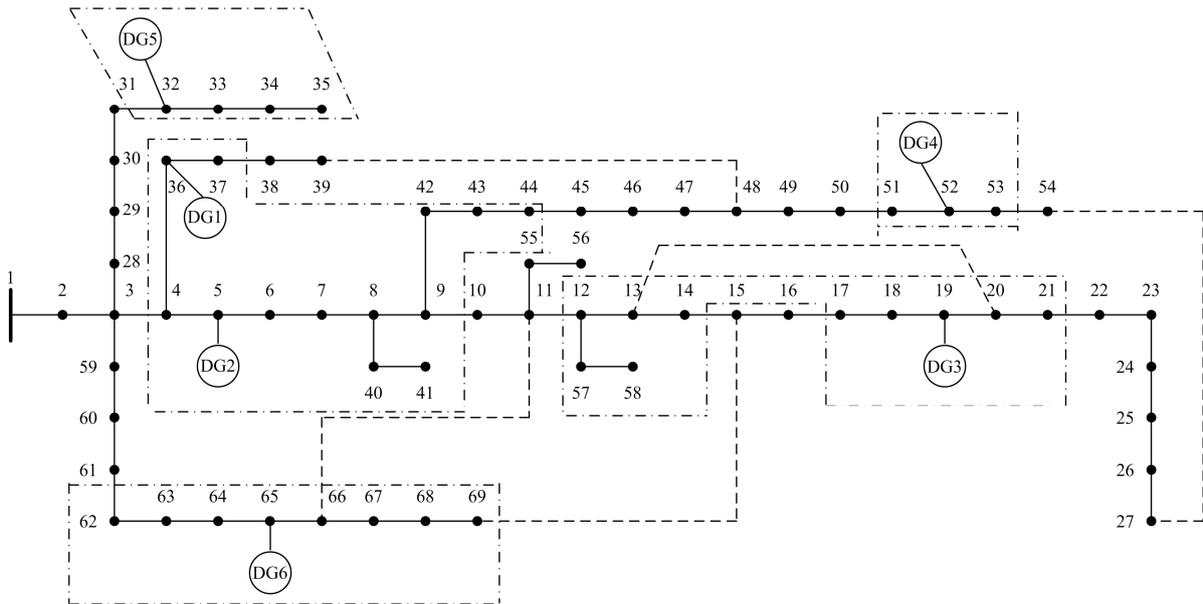


图 3 配电系统最优孤岛划分方案

Fig. 3 Optimal island partition scheme of distribution system

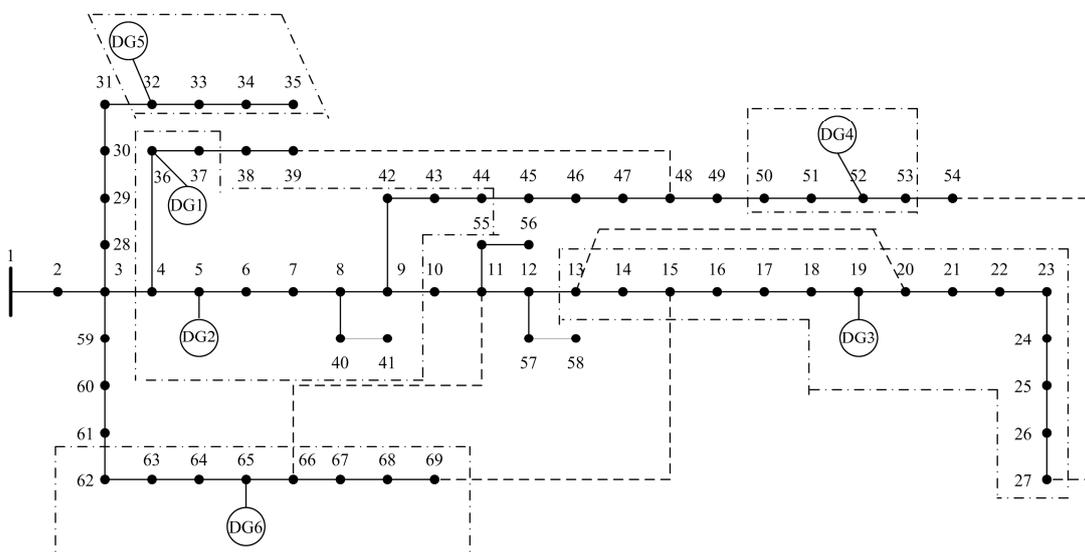


图 4 文献[14]方法得到的孤岛划分方案

Fig. 4 Island partition scheme formed by the method of Ref. [14]

表 1 列出了本文方法与文献[14]所形成的孤岛方案上的差异。从表 1 可以看出, 本文方法和文献[14]均完全恢复了一级负荷。但是, 在孤岛恢复总量相当的情况下, 本文方法相比文献[14]恢复了更多的二级负荷和更少的三级负荷, 这意味着更多的

表 1 孤岛方案比较

Table 1 Comparison of island partition schemes

孤岛方案	本文方法	文献[14]
孤岛内的总负荷/kW	2133.16	2132.85
一级负荷/kW	410.95	410.95
二级负荷/kW	1657.81	1606.6
三级负荷/kW	64.4	115.3
一级负荷量与一级负荷总量的比值	100%	100%
二级负荷量与二级负荷总量的比值	57.35%	55.58%
三级负荷量与三级负荷总量的比值	6.67%	15.79%

重要负荷节点被搜索到并划入孤岛中, 更加有效地利用了 DG 的发电量。造成以上结果的原因是, 在 DG3 所形成的孤岛方案中, 本文方法充分发挥了联络开关的作用, 能够有效利用电网的拓扑结构来提高孤岛划分的合理性。

算例 2: 为了进一步说明本文方法的有效性和优越性, 在文献[14]所述算例的基础上进行修改。删除 DG1 到 DG5, 仅保留 DG6。将 60、69 节点设置为一级负荷节点, 63 节点设置为可控负荷。

图 5 为本文方法得到的孤岛划分方案。在 DG3 所形成的孤岛方案中, 节点 63、66 完全切除, 节点 68 切除 31.06 kW。文献[14]得到的孤岛方案与图 3 中 DG6 所形成孤岛一致, 不同的是, 节点 63 完全切除, 节点 68 切除 10.99 kW。

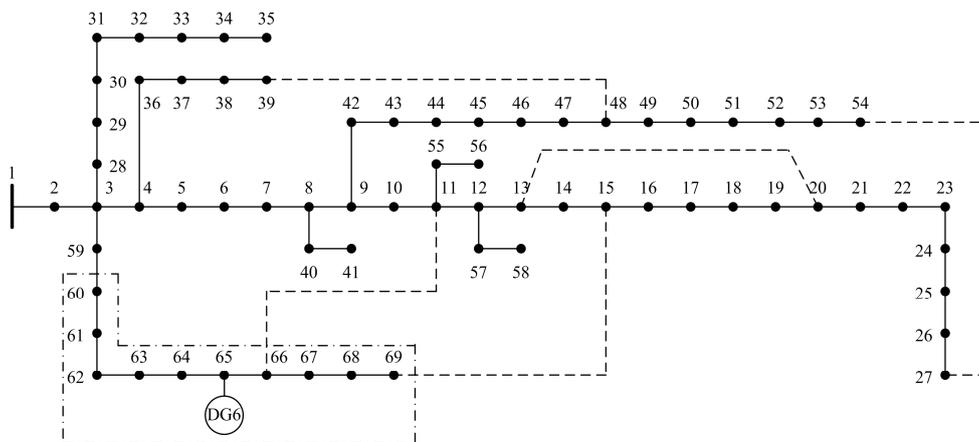


图 5 配电系统最优孤岛划分方案

Fig. 5 Optimal island partition scheme of distribution system

表 2 列出了本文方法与文献[14]所形成的孤岛方案上的差异。从表 2 可以看出, 本文方法恢复了更多的重要负荷, 得到了更好的孤岛划分方案。这是因为文献[14]对不同重要程度的负荷赋予了相应权重, 分支定界算法计算得出等效树的 TKP。即以 DG 为根节点和根据功率平衡约束直接搜索出初步孤岛划分方案, 再对初步方案进行调整。这样就导致初步孤岛划分方案受制于负荷权重和电网负荷的实际分布, 搜索范围有限。本文方法将重要负荷节点的最短路径求出, 再将这些路径逐一划入孤岛并进行相应调整, 可以最大程度地搜索到满足运行约束的重要负荷, 从而可将更多的重要负荷划入孤岛。

表 2 孤岛方案比较

Table 2 Comparison of island partition schemes

孤岛方案	本文方法	文献[14]
孤岛内的总负荷/kW	98.58	98.65
一级负荷/kW	89.22	63.22
二级负荷/kW	9.36	35.43
三级负荷/kW	0	0

## 4 结论

本文提出了一种基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分方法, 得出以下结论。

1) 以路径的形式确定可划入孤岛的重要负荷, 使得算法具有良好的搜索能力, 可以最大程度恢复重要负荷的供电。在可恢复的重要负荷形成初步孤岛后, 根据孤岛容量和节点优先级逐步扩大孤岛的划分范围, 充分发挥了 DG 的供电能力。

2) 算法不仅可以有效考虑负荷的重要性、可控性和负荷量等因素, 而且可以计及联络开关的作用, 充分利用了电网的拓扑结构来提高孤岛划分的合理性。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.  
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [3] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.  
LI Wenhan, ZHAO Dongmei, WANG Xin, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.
- [4] IEEE standard for interconnection distributed resources with electric power system: IEEE Std 1547[S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003.
- [5] 王嘉庚, 司聪, 冉新夺, 等. 考虑年经济效益的分布式电源的优化配置研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(1): 63-67.  
WANG Jiageng, SI Cong, RAN Xinduo, et al. Study on optimal allocation of distributed generation with consideration of annual economic benefits[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 63-67.
- [6] 刘兆元, 王萍, 管志成. 分布式电源大量接入后配电网可靠性综合评估体系[J]. 陕西电力, 2016, 44(10): 15-19.  
LIU Zhaoyuan, WANG Ping, GUAN Zhicheng. Integrated reliability evaluation system of distribution network after connecting to DG[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(10): 15-19.
- [7] 李艳, 李德强, 陈育良, 等. 含分布式电源的配电网供电可靠性评估方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 25-28.  
LI Yan, LI Deqiang, CHEN Yuliang, et al. Power supply reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 25-28.
- [8] 李勇, 刘俊勇, 魏震波, 等. 计及天气的分布式电源对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 93-98.  
LI Yong, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Distribution network reliability considering weather and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 93-98.
- [9] 王旭东, 林济铿, 李胜文, 等. 电力孤岛划分研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 125-135.  
WANG Xudong, LIN Jikeng, LI Shengwen, et al. Review of research on island partitioning in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 125-135.
- [10] CALDON R, STOCCO A, TURRI R. Feasible of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation[J]. Electric Power Systems

- Research, 2008, 78(12): 2017-2023.
- [11] 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 Xin, LU Yuping. Islanding algorithm of distribution network with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 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[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 62-67.  
DING Lei, PAN Zhencun, CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67.
- [13] WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation[J]. Science China (Technological Sciences), 2010, 53(11): 3061-3071.
- [14] 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.
- [15] MAO Y M, MIU K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(14): 1346-1352.
- [16] 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): 195-201.  
DONG Xiaofeng, LU Yuping. Islanding algorithm for distributed generators based on improved Prim algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 195-201.
- [17] 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 Lingcheng, LÜ Lin, ZENG Lanyu. Islanding method based on sollin algorithm for grid with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 95-100.
- [18] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 209-212.  
YUE Yang, GONG Jianya. An efficient implementation of shortest path algorithm based on Dijkstra algorithm[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1999, 24(3): 209-212.
- [19] 刘子俊, 于德龙, 胡少强. 基于禁忌搜索及模糊评价的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 45-50.  
LIU Zijun, YU Delong, HU Shaoqiang. Distribution network planning based on tabu search and fuzzy evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 45-50.
- [20] 刘翔宇, 胡雪凯, 胡文平, 等. 考虑线路操作时限和恢复概率的机组启动路径优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 24-29.  
LIU Xiangyu, HU Xuekai, HU Wenping, et al. Optimization of unit restoration sequence considering line start-up time and restoration probability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 24-29.
- [21] 何玉钧, 陈冉, 张文正, 等. 一种电力通信网最大不交叉双路由配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 60-68.  
HE Yujun, CHEN Ran, ZHANG Wenzheng, et al. A maximally disjoint routing algorithm for power communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 60-68.
- [22] MESUT E B, FELIX F W. Optimal sizing of capacitors placement on radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-05-08

作者简介:

姚玉海(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统自愈控制; E-mail: yao\_yuhai@163.com

张璇(1987—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为配电网自愈性分析与评估。

(编辑 姜新丽)