

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181047

基于启发式规则的配电网孤岛划分算法

刘文轩¹, 姚玉海², 齐伟强², 任志刚²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 随着分布式电源(Distributed Generation, DG)的大量接入电网, 孤岛运行成为一种提高供电可靠性的重要方式, 合理地划分孤岛具有重要意义。首先, 针对配电网的特点, 构建了平均层数和平均度值两个目标函数。然后, 根据孤岛划分的多目标优化问题, 提出了支路和节点优先级的确定方法。在此基础上, 以支路和节点优先级作为启发式规则, 提出了一种基于启发式规则的配电网孤岛划分算法。该算法以 DG 节点或以该 DG 节点形成的孤岛为根, 采取“搜索+调整”的思路进行求解。最后, 通过仿真算例验证了该算法可以有效计及联络开关、负荷的重要程度、负荷的可控程度、节点度值、节点层数和负荷量大小的因素, 能够很好地解决孤岛划分问题。

关键词: 孤岛划分; 平均层数; 平均度值; 支路优先级; 节点优先级

An algorithm on island partition of the distribution system based on Heuristic rule

LIU Wenxuan¹, YAO Yuhai², QI Weiqiang², REN Zhigang²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Beijing 102209, China;

2. State Grid Beijing Electric Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: With more and more Distributed Generation (DG) access to distribution network, islanding operation has become an important operation mode. Therefore, it is significant to partition island reasonably. Firstly, on the basis of the characteristics of distribution networks, the average level and the average degree as the objective functions are proposed. Secondly, according to multi-objective problem of island partition, the determination method of branch and node priority level is proposed. On this basis, an algorithm on island partition of the distribution system based on heuristic rule is proposed. The DG node (or the island formed by the DG node) is as the root, and guideline of “search and modulation” is used for solving method. Finally, the effectiveness and rationality of this algorithm are validated by simulation case, which takes connective switch, load importance, controllability of load, node level, node degree and load capacity into account.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902000).

Key words: island partition; average level; average degree; priority level of branch; priority level of node

0 引言

近年来, 分布式电源(Distributed Generation, DG)在配电网中发挥着越来越重要的作用^[1-4]。计划孤岛运行是配电网接入 DG 后一种提高供电可靠性的运行方式。故障发生后, DG 可以按照划分好的孤岛继续向负荷供电, 直至故障排除后恢复系统原有的运行方式。因此, 孤岛划分对提高供电可靠性具有重要作用^[5-10]。

对于如何进行最优孤岛划分, 国内外众多专家

进行了深入研究。文献[11]给出了在满足功率平衡约束的前提下, 按负荷优先等级由高到低依次并入孤岛, 从而得到孤岛划分方案。文献[12]提出了基于树模型的孤岛划分算法, 加入了层数和自上而下的搜索方向等启发式信息后, 有效降低了算法的复杂度。文献[13-14]基于图论中树背包问题建立了接近工程实用的最优孤岛划分数学模型, 并分别基于 0-1 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, 这些方法没有考虑电网中联络开关的作用。

文献[15]提出了计及负荷可控性和负荷优先等级的孤岛划分方法。文献[16]根据配电网环网结构设计、开网运行的特点, 采用改进后的 Prim 算法对

基金项目: 国家重点研发计划项目资助“可再生能源发电基地直流外送系统的稳定控制技术”(2017YFB0902000)

连通图进行搜索, 以确定孤岛划分方案。文献[17]利用图论分析法中的 *sollin* 算法求解最小树进而实现孤岛的划分。文献[18]方法具有良好的搜索能力, 并合理利用了电网的拓扑结构, 距离较远的重要负荷也可以划入孤岛。但这些方法没有讨论孤岛应置于配电网中的位置。

针对上述问题, 本文建立了平均层数和平均度值两个目标函数, 根据孤岛划分的多目标问题提出了支路和节点优先级的确定方法。并以支路和节点优先级作为启发式规则, 提出了基于启发式规则的配电网孤岛划分算法。

1 孤岛划分的目标函数

本文采用传统的约束条件^[18], 目标函数除了采用恢复重要负荷、恢复负荷量最大、恢复可控负荷这三个传统目标外^[19], 又根据配电网孤岛划分的特点提出了以下两个目标函数。

1) 平均层数

我国配电网具有辐射状运行的特点, 上游设备故障会导致下游负荷停电。故远离电源的负荷供电可靠性低, 更容易出现停电情况。为了体现孤岛技术在提高供电可靠性方面的作用, 孤岛宜置于系统的末端, 即孤岛划分方案应符合远离主网电源的原则。与此同时, 靠近电源侧的负荷应优先采用故障恢复技术进行转供。

文献[12]以主网电源节点为第 1 层, 对其他节点采用广度遍历法进行层数赋值。该方法是针对电网特定的运行方式下进行的层数赋值, 没有考虑多电源节点和配电网拓扑结构变化的影响, 从而层数的定义缺乏全局性。此外, 在系统运行方式发生变化的情况下, 层数也会发生变化, 需要重新计算得出。以图 1 所示电网为例, 在 5-11、7-16、10-14 断开的运行方式下, 节点 9 的层数为 3。在 8-9、7-16、10-14 断开的运行方式下, 节点 9 的层数为 5。在后者的运行方式下, 节点 9 的层次数值变大, 需要被优先划入孤岛中。但节点 9 距离主网电源节点 2 较近, 若被划入孤岛中则不符合远离主网电源的原则。

本文的层数定义方法为: 将主网电源节点定义为第 1 层, 系统的其他节点的层数由该节点与主网电源节点之间的最短路径决定。这种定义方法不受电网的运行方式影响, 在电网拓扑结构确定的情况下, 节点的层数也是确定的。层数高的节点处于系统的末端, 应优先划入孤岛中。以图 1 所示电网的节点 9 为例, 节点 9 到主网电源有三条路径, 分别为 9-11-5-4-1、9-8-2、9-8-10-14-13-3。从这三条路

径的比较可以得出 9-8-2 路径最短, 从而节点 9 的层数为 3。

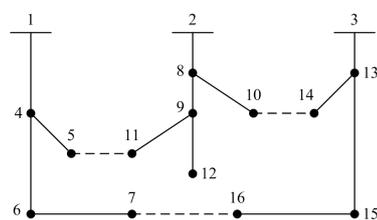


图 1 3 馈线配电系统图

Fig. 1 Diagram of distribution system with 3 feeders

平均层数的数学表达式如式(1)。

$$f = \max \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N} \quad (1)$$

式中: C_i 为节点 $i(i=1,2,\dots,N)$ 的层数; N 为孤岛方案中的节点总数。

从平均层数的数学表达式中可知, 平均层数越大, 表明孤岛方案距离主网电源点越远, 孤岛方案越优。

2) 平均度值

将电网的拓扑图视为无向图, 节点度为与节点相关联的边数。其中, 度值为 1 的节点称为叶子节点。以图 1 所示电网为例, 节点 11 的度值为 2, 节点 12 的度值为 1。节点度值越大表明该节点的供电路径越多, 更容易通过故障恢复技术进行转供。相反, 节点的度值越小表明该节点的供电路径越少, 通过网络重构转供该节点的方案越少。因此, 应优先将度值较小的节点划入到孤岛中。

平均度值的数学表达式如式(2)。

$$f = \min \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad (2)$$

式中, D_i 为节点 $i(i=1,2,\dots,N)$ 的度值。

从平均度值的数学表达式中可知, 平均度值越小, 表明孤岛方案包含了更多的度值较小的节点, 孤岛方案越优。

2 启发式搜索算法

进行孤岛划分时, 需要将电网进行简化和建立拓扑模型, 本文采用文献[12]所述方法。

2.1 支路和节点优先级

支路和节点优先级的确定方法如下。

1) 支路优先级

将连接两个节点的支路归类为三种类型: (1) 双绕组变压器; (2) 三绕组变压器; (3) 馈线。每一类

型支路的功能可分为三种：(1) 连接负荷节点；(2) 连接 DG 节点或孤岛，其中孤岛是指以该 DG 节点形成的孤岛；(3) 连接主网电源节点。通常情况下，含有双绕组变压器的支路损耗最大，含有三绕组变压器的支路损耗其次，仅含有馈线的支路损耗最小。依据支路在电网中的功能对其进行评价如下：连接主网电源节点的支路最为重要，连接 DG 节点或孤岛的支路其次，连接负荷节点的支路再次。

为了直观地表达支路的优先级，根据支路的类型和作用对支路权值进行赋值，支路权值越大优先级越高。支路权值的赋值方法为：支路的类型是影响网损的主要因素，支路类型编号构成支路权值的十位。支路作用是决定该支路是否被划分入孤岛的重要依据，支路作用编号构成支路权值的个位。

以图 2 为例，馈线支路 2-3 连接两个负荷节点，其支路权值为 31。含有双绕组变压器支路 1-2 连接主网电源节点，其支路权值为 13。含有三绕组变压器支路 3-4 连接负荷节点，其支路权值为 21。馈线支路 5-7 连接 DG 节点，其支路权值为 32。

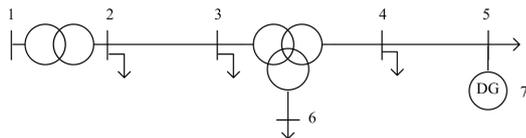


图 2 配电系统图

Fig. 2 Diagram of distribution system

2) 节点优先级

电网中共有三类节点，根据优先级从高到低的顺序分别为：主网电源节点；DG 节点或孤岛；负荷节点。

各类节点的优先级确定方法如下。

(1) 主网电源节点

若孤岛划分过程中搜索到主网电源节点，则应采取故障恢复技术处理。这种情况非本文重点，故不做赘述。

(2) DG 节点或孤岛

DG 节点或孤岛本质上属于一种类型，优先级的高低与其功率输出大小成正比。

(3) 负荷节点

影响负荷节点优先级的主要因素有：负荷的重要程度、负荷的可控程度、负荷节点的度值、负荷节点的层数和负荷量。

根据配电网和孤岛运行特点，对负荷优先级划分如下：孤岛应优先保证重要负荷的供电，负荷节点的重要程度优先级最高；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，节点负荷的可控性优先级其次；孤岛运行是故障恢复的重要

补充形式，负荷节点的度值优先级再次；为了使得孤岛处于系统末端，负荷节点的层数优先级再次；孤岛在满足安全约束的情况下应尽可能地包含更多负荷，节点负荷量的优先级最次。

2.2 求解思路

以支路和节点优先级为启发式规则，从根节点 (DG 节点或孤岛) 开始，采取“搜索+调整”的思路求解孤岛划分问题。“搜索”是先搜索支路，再根据支路和节点优先级对支路连接的节点进行排序。进行排序时，权值高的支路所连接的节点重要性高于权值低的支路所连接的节点，权值相同的支路所连接的节点则根据节点优先级进行比较。“调整”是在节点序列中选择一个节点，并将其划入孤岛中。节点能否被划入孤岛中，主要取决于节点的优先级和是否满足约束条件两个因素。将得到的节点序列按由高到低的顺序，依次判断节点划入孤岛后是否满足约束条件。若满足约束条件，则将该节点划入孤岛中并返回“搜索”状态；若不满足约束条件，则通过孤岛内的可控负荷和切除重要性低的叶子节点进行“调整”；如果所有搜索到的节点都无法通过“调整”而划入孤岛，则孤岛划分完毕。

2.3 算法的求解步骤

算法步骤如下：

1) 输入电气基本信息，令 $k=1(k=1,2,\dots,d)$ ，并建立 DG 矩阵、支路信息矩阵、负荷节点信息矩阵。

DG 矩阵 $D(2 \times d)$ 描述的是 DG 的节点信息和输出状态， d 为停电范围内 DG 的个数。DG 矩阵内元素 d_{ij} 的赋值方法为：第一行为 DG 的节点编号，第二行对应为 DG 的功率输出值。

支路信息矩阵 $B(n \times n)$ 描述的是电网拓扑关联关系和支路权值， n 为电网节点总数。支路信息矩阵内元素 b_{ij} (即为支路 $i-j$) 的赋值方法为

(1) 当 $i \neq j$ 时

当节点 i 和节点 j 之间存在支路时， b_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间支路的权值；特别说明的是， b_{ij} 的赋值与节点 i 和节点 j 之间支路是否处于在线运行状态无关，即断开状态的联络开关所处的支路也体现在支路信息矩阵中。

当节点 i 和节点 j 之间不存在支路时， $b_{ij}=0$ 。

(2) 当 $i=j$ 时， $b_{ij}=0$

负荷节点信息矩阵 $L(6 \times (n-d))$ 描述的是负荷节点的相关信息。负荷节点信息矩阵内元素 l_{ij} 的赋值方法为：第一行为节点的编号。第二行为负荷的相对重要程度，根据负荷重要性由低到高分别赋值为 1、2、3。第三行为负荷的可控程度，取值范围为 (0, 1)，该值为负荷的可控程度比。如负荷不可控则为

0, 完全可控为 1, 50%可控则为 0.5。第四行为节点的度值。第五行为节点的层数。第六行为负荷节点的负荷量。

2) 支路搜索。

支路信息矩阵 \mathbf{B} 中第 d_{1k} 行(或列)中的非零元素即为与 DG 或以该 DG 形成的孤岛相连接的所有支路, 根据支路权值将这些支路进行由高到低的排序。

3) 节点搜索并排序。

根据支路与节点的连接关系将取出的支路连接的所有节点得到。并根据支路和节点优先级对这些节点进行排序。权值高的支路所连接的节点重要性高于权值低的支路所连接的节点, 权值相同的支路所连接的节点则根据节点优先级进行比较。

4) 判断是否有节点可以划入孤岛。

将得到的节点序列以由高到低的顺序, 依次判断节点划入孤岛后是否满足约束条件。

节点的判断方法为: 如果是 DG 节点或孤岛, 则结束判断过程, 将该节点划入孤岛, 并对 DG 矩阵、支路信息矩阵进行修改, 转步骤 2)。

如果是负荷节点, 为了方便描述, 以 i 节点为例, 判断 $d_{1k}-l_{6i}$ 是否大于 ε , 若 $d_{1k}-l_{6i}$ 大于 ε , 则进行潮流计算^[18]进一步判断是否满足电压、电流约束, 若满足则该节点可以并入孤岛, 若不满足则根据节点序列判断下一个节点。

若 $d_{1k}-l_{6i}$ 小于 ε , 则根据当前孤岛范围内的可控负荷节点进行切负荷调整, 如果可控负荷的调整量无法使得 $d_{1k}-l_{6i}$ 大于 ε 时, 再将节点 i 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, 直到满足功率平衡约束。若通过调整之后仍无法满足约束条件, 则根据节点序列判断下一个节点。

若存在可以并入孤岛的负荷节点则结束判断

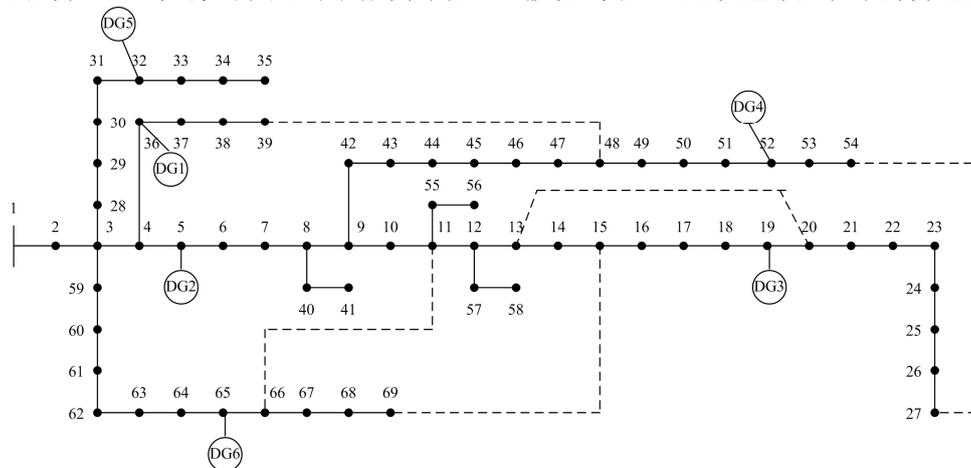


图 3 含分布式发电的 69 节点配电系统

Fig. 3 Distribution system of sixty-nine-bus integrated with DGs

过程, 将该节点划入孤岛。并对 DG 矩阵、支路信息矩阵进行修改, 转步骤 2)。

DG 矩阵的修改方法为: 如果是 DG 节点或孤岛, 则将该 DG 节点或孤岛的剩余输出功率加到当前孤岛中, 并将该 DG 节点或孤岛删除。为了方便描述, 以 DG 节点或孤岛 i 为例, 即 $d_{2k}+d_{2i}$, 再将 DG 矩阵的第 i 列所有元素置为 0; 如果是负荷节点则将当前孤岛的剩余功率减去该负荷节点的负荷, 即 $d_{2k}-l_{6i}$ 。

支路信息矩阵的修改方法为: 为了方便描述以节点 i 并入孤岛 j 为例, 首先将 b_{ij} 、 b_{ji} 置为 0, 再将第 i 行(或列)与第 j 行(或列)对应元素相加, 然后将第 i 行(或列) 和第 i 列(或行)的所有元素置为 0。即将节点 i 的连接关系并入了孤岛 j , 孤岛 j 所在的行(或列)可以反映该孤岛的所有对外连接关系。

若整个节点序列中不存在可以并入孤岛的节点则转步骤 5)。

5) 判断算法是否结束。

若 $k>d$ 则算法结束, 输出当前孤岛划分方案。特别说明的是, 由于本文方法考虑了联络开关, 在输出孤岛划分方案之前要检查孤岛中是否含有环网, 为了避免孤岛并网的复杂操作, 对含有环网的孤岛采用破圈法^[20]的思想优先打开原本处于断开状态的开关以保证孤岛的连通和辐射; 若 $k<d$ 则令 $k=k+1$ 并转步骤 2)。

3 算例分析

采用美国 PG&E69 节点配电系统^[21]对本文方法进行验证。电网运行状态及 DG 接入位置如图 3 所示, 图中实线和虚线分别代表闭合和打开状态。DG 参数见表 1, 负荷重要性和负荷可控程度见表 2。假设线路 2-3 处发生永久性故障并退出运行。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of DG

DG 编号	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5	DG6
输出功率/kW	50	250	400	1 300	40	100

表 2 负荷重要性和可控程度

Table 2 Priorities and controlling types of loads

负荷信息	负荷节点
一级负荷	6、9、18、26、27、35、37、42、51、57
二级负荷	其余节点
三级负荷	7、10、11、13、16、22、28、43、45、46、47、48、59、60、63
100%可控	13、26、27、34、35、39、40、41、43、44、48、53、54、55、56、57、58、66、67、68、69
40%可控	11、21、38
不可控	其余节点

采用本文所述方法，得到的孤岛方案如图 4 所示，点划线所包围的区域为孤岛区域。其中，节点 13、26、27、43、54、66 被全部切除，节点 21、53、69 的切除量分别为 45.6 kW、205 kW 和 28.44 kW。

文献[12]和文献[18]所得孤岛方案如图 5 和图 6 所示。表 3 列出了本文方法与对比文献在孤岛方案上的差异。

由于孤岛划分目标的合理设置和利用了联络开关的作用，从表 3 可以看出，本文方法所恢复的一级、二级负荷均大于对比文献，得到的孤岛方案在三级负荷恢复量上要优于文献[12]，这意味着本文方法在一定能力内恢复了更多的重要负荷，恢复了更少的次要负荷。本文方法所得到的孤岛方案平均度值较小，平均层数较大，更加符合孤岛远离主网电源的原则。

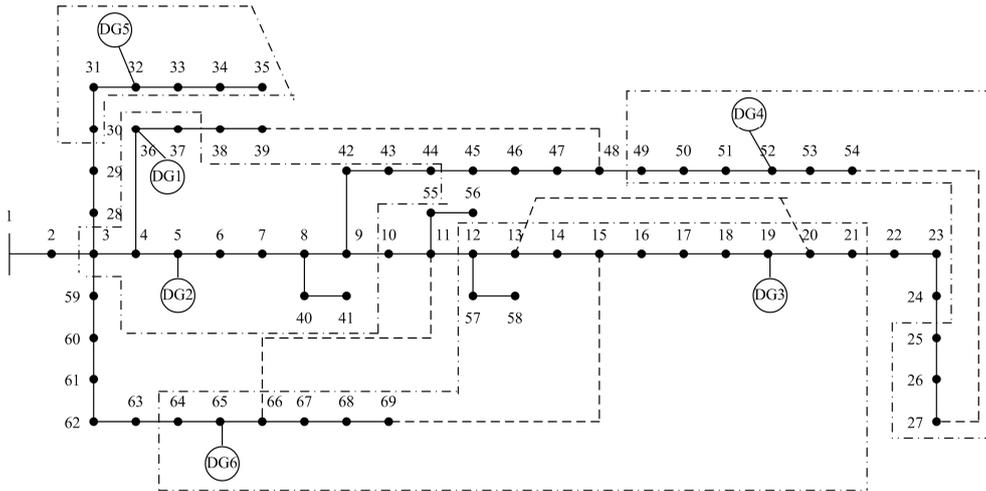


图 4 本文方法所得孤岛方案

Fig. 4 Island scheme formed by the method of this paper

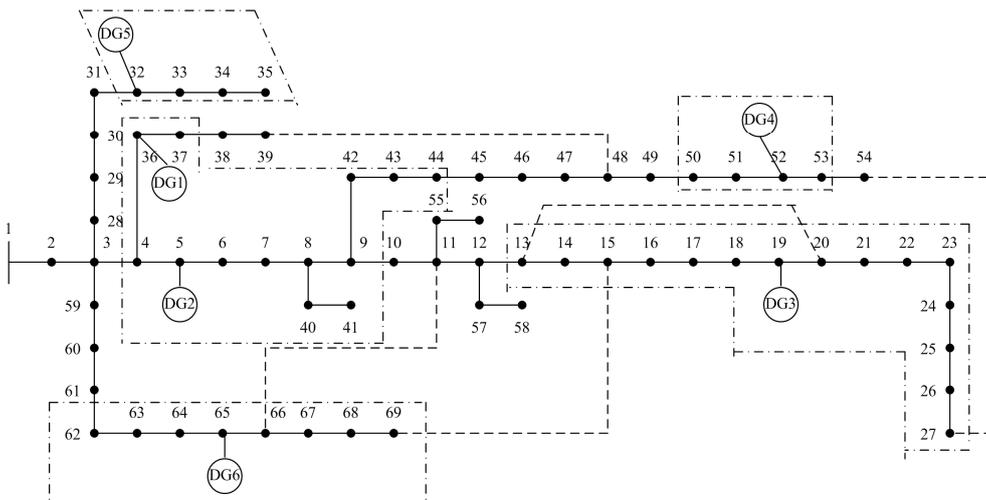


图 5 文献[12]所得孤岛方案

Fig. 5 Island scheme formed by the method of Ref. [12]

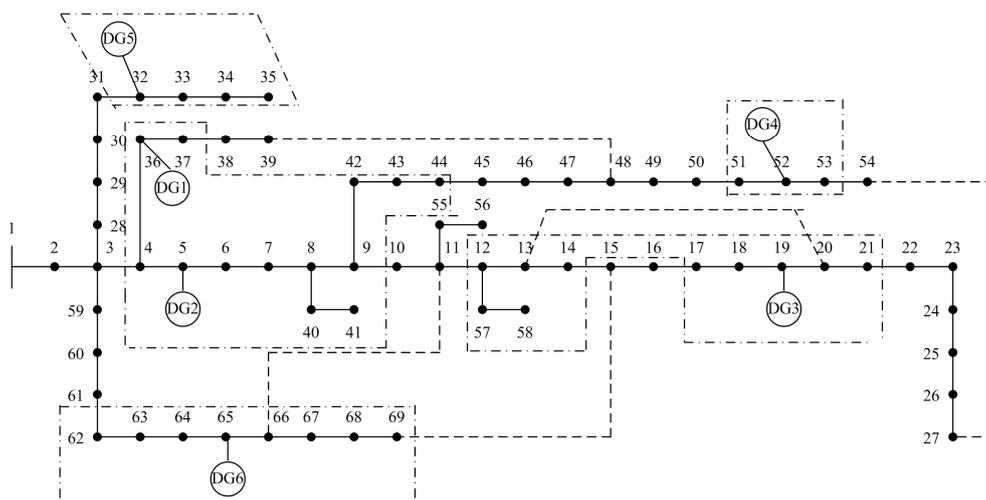


图 6 文献[18]所得孤岛方案

Fig. 6 Island scheme formed by the method of Ref. [18]

表 3 孤岛方案比较

Table 3 Comparison of the island partition schemes

方案指标	本文方法	文献[12]	文献[18]
孤岛内的总负荷/kW	2 158.95	2 158.85	2 158.91
一级负荷/kW	152.35	124.35	152.35
二级负荷/kW	1 894.8	1 892.5	1 901.4
三级负荷/kW	111.8	141.1	105.16
平均度值	2.07	2.16	2.11
平均层数	13.73	12.89	12.76
剩余可控负荷/kW	128	80.8	76.2

通过与文献[18]的方案对比, 本文在平均度值和平均层数上要优于该文献, 且在一级负荷的恢复上与参考文献[18]相同, 但在二三级负荷的恢复上略差于该文献。这是由于本文方法所得孤岛划分方案不仅要恢复重要负荷和恢复负荷量最大外, 还要兼顾孤岛在配电网中所处的位置, 即要符合孤岛划分远离主网电源的原则。

此外, 本文在剩余可控负荷量上要优于对比文献, 所得孤岛方案更加有利于孤岛的安全运行和灵活控制。

4 结论

本文采取启发式搜索算法求解配电网孤岛划分问题, 得出以下结论。

平均层数的建立使得孤岛处于配电网的下游, 更加符合配电网的运行特点。平均度值的建立使得系统中连通性差、不易被转供的负荷节点划入孤岛中, 提高了配电网的供电可靠性。

所提算法以支路和节点优先级作为启发式规则, 可以有效计及负荷的重要程度、负荷的可控程

度、节点度值、节点层数、负荷量和联络开关等因素, 能够合理解决配电网孤岛划分问题。

参考文献

- [1] ATWA Y M, EI-SAADANY E F. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 572-581.
- [2] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [3] 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.
- [4] HUANG S J, HSIEH C W, WAN H H. Confirming the permissible capacity of distributed generation for grid-connected distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 540-541.
- [5] AULT G W, MCDONALD J R, BURT G M. Strategic analysis framework for evaluating distributed generation and utility strategies[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(4): 475-481.
- [6] 江钧, 成乐祥, 孙国强, 等. 考虑安全域的配电网重构二阶锥双层规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 9-16.

- JIANG Jun, CHENG Lexiang, SUN Guoqiang, et al. Distribution network reconfiguration based on second order cone bi-level programming considering security distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 9-16.
- [7] 张世翔, 邵慧壮. 含分布式电源的配电网优化研究[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 147-153.
- ZHANG Shixiang, SHAO Huizhuang. Optimization research of distribution network considering distributed generation[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 147-153.
- [8] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods, and future research[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3420-3428.
- [9] WANG X, FREITAS. Impact of Positive-Feedback Anti-islanding methods on small-signal stability of inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 923-931.
- [10] 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.
- [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, 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] 姚玉海, 张璇, 齐伟强, 等. 基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 36-43.
- YAO Yuhai, ZHANG Xuan, QI Weiqiang, et al. Island partition of the distribution system based on Dijkstra algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 36-43.
- [19] 陆亚南, 施泉生. 基于改进粒子群算法的含分布式发电配电网孤岛划分[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(7): 17-23.
- LU Yanan, SHI Quansheng. Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved particle swarm algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(7): 17-23.
- [20] 卢志刚, 杨国良, 张晓辉, 等. 改进二进制粒子群优化算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 30-34.
- LU Zhigang, YANG Guoliang, ZHANG Xiaohui, et al. Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 30-34.
- [21] 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: 2018-08-14; 修回日期: 2019-04-19

作者简介:

刘文轩(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制;

姚玉海(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统自愈控制。E-mail: yao_yuhai@163.com

(编辑 魏小丽)