

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220139

基于拓扑连通性约束遗传算法的主动解列断面搜索

汪昭辰, 王增平, 相禹维, 王彤

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 随着大规模新能源互联电网的发展, 电力系统发生连锁故障的风险越来越高, 适当的主动解列可以阻止故障的传播。为解决主动解列断面求解过程中的系统拓扑连通性和计算复杂度高的问题, 提出了一种含拓扑连通性约束遗传算法的主动解列断面搜索方法。该方法首先构建了解列断面搜索的数学模型, 然后基于图论知识提出了一种系统拓扑连通性约束, 并加入到遗传算法中。同时提出了一种系统拓扑简化和预处理方法。最后将简化后的系统拓扑和数据输入到含拓扑连通性约束的遗传算法中进行主动解列断面的求解。IEEE 118 节点系统算例表明, 所提算法能够保证求解出的主动解列断面具有拓扑连通性且有功率基本平衡, 系统拓扑简化和预处理方法能够有效提高算法的运行效率。

关键词: 主动解列; 拓扑连通性约束; 解列断面; 遗传算法

Intentional islanding section searching based on a genetic algorithm with a topological connectivity constraint

WANG Zhaochen, WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the development of large-scale renewable energy power grids, the risk of cascading failures is becoming increasingly higher. Appropriate intentional islanding can prevent the spread of faults. To solve the problems of topological connectivity of power systems and high computational complexity in the process of intentional islanding sections, this paper proposes an intentional islanding section search method with a topological connectivity constraint genetic algorithm. The method first constructs a mathematical model for intentional islanding section searching, and then proposes a system topology connectivity constraint based on the knowledge of graph theory. This is added to the genetic algorithm. At the same time, a system topology simplification and preprocessing method is proposed. Finally, the simplified system topology and data is input into the genetic algorithm with topological connectivity constraint to solve the intentional islanding sections. The calculation example on the IEEE 118 node system shows that the proposed algorithm can ensure that the solved intentional islanding sections has topological connectivity and basically achieves active power balance, and the system topology simplification and preprocessing methods can effectively improve the efficiency of the algorithm.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5211DS21N013).

Key words: intentional islanding; topological connectivity constraint; islanding section; genetic algorithm

0 引言

随着“西电东送、南北互供、全国联网”总格局的逐渐形成, 我国已经建成了规模最大、电压等

级最高的全国互联电网, 这也对电力系统的安全稳定运行提出了更高要求^[1-2]。同时, 新能源和电力电子设备的广泛接入使我国电力系统的系统惯量在逐渐减小, 系统的抗扰动能力随之减弱^[3-4], 尤其当极端状况(如地震、台风、冰雪灾害等)发生时, 电网发生严重故障的几率大幅提升, 电力系统可能会因

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5211DS21N013)

此发生严重的连锁故障，造成大面积的停电事故^[5-6]。通过主动解列，可以将一个大电力系统分割形成几个独立运行的子系统，以防止连锁故障的发生和扩散，避免大规模停电事故的发生。在一个完整的主动解列策略中，主动解列最优断面搜索策略占据着核心地位，它回答了“在哪解列”的问题，合理的解列断面可以使切机切负荷量减小，使停电事故最小化。

主动解列最优断面搜索的核心问题就是含发电机组同调约束的功率平衡问题。与失步解列只能通过依靠设置在特定位置的装置动作不同，电力系统中的每一条线路都可以作为主动解列的开断线路，因此，主动解列断面搜索问题实质上是一种组合爆炸问题，它的复杂程度随着系统拓扑结构的复杂程度以及系统规模的增大呈指数型增长趋势^[7]。目前，求解主动解列断面方法按照主要思路可以分为两种：

1) 基于线路潮流的最小割集。这种思路中，解列断面是由若干条系统线路组成的集合，目标函数是使集合中所有线路上有功潮流的绝对值最小，从而使解列时系统受到的有功潮流冲击最小。文献[8]利用扩展拉普拉斯分割算法，目标函数中综合考虑了线路有功潮流的绝对值和电抗，以实现断面对系统的有功潮流冲击最小；文献[9-10]构造了一种含有发电机同调约束的谱聚类方法，解决了传统谱聚类得到的断面可能不满足发电机同调约束的问题；文献[11]为满足发电机同调约束提出了一种半监督式的谱聚类方法，并提出了一种改进的 PAM 聚类方法，对前序步骤所得的特征向量进行聚类。除了谱聚类方法外，此思路还包括慢同调方法，此方法通过对系统的状态矩阵的特征值和特征向量进行分析，以得到系统的薄弱环节。文献[12-14]提出了广义特征分析技术，将电力系统里的所有节点进行慢同调分群，然后考虑了功率平衡约束，将分群结果进行了调整和优化，实现了自适应主动解列断面的求解。基于线路的最小割集求解解列断面方法的优点是原来的 NP-hard 问题转化成系统状态矩阵的特征值和特征向量求解问题，使问题大大简化，但求解出的断面只考虑了开断线路上的有功功率绝对值最小，而没有考虑有功功率的方向，即没有考虑子系统层面上的有功功率出入平衡问题，导致求出的子系统内部功率较为不平衡，切机切负荷量较多。

2) 基于节点有功的平衡组合。这种思路中，解列断面是由若干个节点集合组成，每个节点集合组成一个子系统，目标函数是使每个集合内的不平衡功率最小，从而使每个子系统内部能大致形成有功

功率的“供需平衡”。该思路一般由优化算法实现，文献[15]利用粒子群算法进行系统中各节点的组合以实现孤岛内部的节点功率平衡，从而求得解列断面，但所提出的算法并没有考虑节点之间的连通性约束；蚁群算法作为经典的优化算法也可以进行解列断面的搜索，通过对系统的节点进行选取和组合，求得系统的最优断面^[16-17]，采用传统优化算法进行主动解列断面搜索的缺点是：传统优化算法是将节点进行随机组合形成初始解，在初始解的基础上进行优化，这样得到的节点组合很可能不满足节点之间的连通约束，从而形成不可行的解列方案。为解决这一问题，文献[18-20]提出了一种以节点有功最平衡为优化目标的混合整数线性规划模型进行主动解列断面的搜索，并提出了一种基于潮流平衡的连通性约束 ADCLF 以保证求解出的解列方案的可行性，但 ADCLF 约束较为复杂，大大地降低了主算法效率；文献[21]提出了一种基于潮流收敛的连通性约束，同样存在着计算量大的缺点。

针对传统优化算法在求解解列断面时的随机性问题，本文提出了一种拓扑连通性约束，该约束以图论和 0-1 矩阵的运算为基础，计算量小。将该约束加入到遗传算法，形成了含拓扑连通性约束的遗传算法(connected topology constraint genetic algorithm, CTGA)，将主动解列断面的求取问题转化为节点的有功功率平衡组合问题。算法以解列后各子系统内部不平衡功率绝对值之和最小为目标函数，并加入了电力系统的拓扑连通性约束，保证了求得的解列断面是可行的、合理的。同时，本文提出了一种系统拓扑的简化和预处理方法，大大提高了主动解列断面搜索的算法运行效率。

1 主动解列最优断面搜索的数学建模

1.1 电力系统的图论模型

在最优解列断面的搜索过程中，电力系统可以看成是一个由边和节点构成的无向加权图，其图论模型如式(1)所示^[22]。

$$\begin{cases} G(V, E) \\ V = \{v_1, v_2, L, v_n\} \\ E = \{e_{ij}\} \\ V = V^G U V^L \\ V^G = \{v_1^G, v_2^G, L, v_p^G\} \\ V^L = \{v_1^L, v_2^L, L, v_q^L\} \end{cases} \quad (1)$$

式中： G 为电力系统无向加权图； n 为电力系统的节点数； V 是电力系统中的节点集合； v_i 是节点集

合 V 中的元素, 代表第 i 个节点; E 是电力系统中连接各个节点的电力设备集合(传输线、变压器等); e_{ij} 是集合 E 中的元素, 代表 v_i 和 v_j 之间的连接关系; V^G 是发电机节点集合; v_i^G 是节点集合 V^G 中的元素, 代表第 i 个发电机节点; V^L 是负荷节点集合; v_i^L 是节点集合 V^L 中的元素, 代表第 i 个负荷节点。

一般情况下, 有功网损对于解列断面搜索影响较小, 因此在本文中, 将有功网损进行等效处理, 即将网损分配到各发电机节点, 对于各个节点的赋权如式(2)所示^[23]。

$$\begin{cases} w_i^G = P_i^G \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^p P_i^G - \sum_{i=1}^q P_i^L}{\sum_{i=1}^p P_i^G} \right) - P_i^L \\ w_i^L = -P_i^L \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_i^G 和 w_i^L 分别为发电机节点和负荷节点的权重值; P_i^G 和 P_i^L 分别为节点 i 对应的有功出力和有功负荷。

1.2 最优解列断面搜索的数学模型

主动解列的目标是使电力系统分割成为若干个独立运行的子系统, 因此各个子系统要保证有功出力和有功负荷的大致平衡, 这样在后续过程中可以使切机切负荷量最小, 使停电事故最小化。本文采用节点的有功功率平衡组合思路来求解最优解列断面, 采用各子系统的功率不平衡绝对值之和最小作为模型的目标函数。

在电力系统受扰之后, 发电机会出现分群摇摆的现象, 一些发电机表现出相似的摇摆特性, 这些发电机的组合称为一个同调机群^[24]。在最优解列断面搜索中, 同调机群中的发电机必须划分至同一子系统中, 形成解列断面搜索模型的同调约束。

电力系统在解列之后形成的若干个子系统要满足系统拓扑的连通性要求, 即求得的每个子系统对应的节点集合内部要连通, 不能出现孤立的节点, 导致求出不合理的解列断面。这形成了解列断面搜索模型的连通性约束。

模型的数学表达如式(3)所示。

$$\begin{cases} \min f_{it} = \min \left(\sum_{k=1}^m \left| \sum_{i \in S_k} w_i \right| \right) \\ \text{s.t.} \quad \bigcup_{k=1}^m V_{S_k}^G = V^G \\ V_{S_k}^G \cap V_{S_l}^G = \emptyset \quad k \neq l \\ \forall v_i, v_j \in V_{S_k}, \exists p_{ij} \quad i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为子系统个数, 其值等于同调机群个数; S_k 为第 k 个子系统; w_i 为所屬子系统中第 i 个节点的权重值; $V_{S_k}^G$ 和 $V_{S_l}^G$ 分别为第 k 个和第 l 个同调发电机集合; V_{S_k} 为第 k 个子系统的节点集合; p_{ij} 代表节点 v_i 和 v_j 之间的连通路徑。

2 基于含连通性约束遗传算法的最优解列断面搜索

遗传算法求解主动解列断面是以各子系统内部不平衡有功功率最小为目标函数, 通过选择、交叉和变异操作进行迭代优化, 从而求得内部有功功率最平衡的子系统。

传统遗传算法在形成初始化种群时具有随机性, 在主动解列断面搜索时表现为所有节点的随机组合, 这样的随机组合中的节点很多时候并不是互相连通的, 也就是不满足子系统的连通性约束。针对遗传算法的随机性, 本文基于图论知识, 提出了一种拓扑连通性约束。

2.1 图的邻接加权矩阵与可达矩阵

在 1.1 节中已经提到, 电力系统可以用一个无向加权图 G 进行表示, 在图论中, 一个无向加权图可以用一个邻接加权矩阵 $A_{n \times n}$ 表示, $A_{n \times n}$ 中非零元素 a_{ij} 对应的位置表示节点 v_i 和节点 v_j 之间存在一条边 e_{ij} , $A_{n \times n}$ 中的零元素 0_{ij} 即表示节点 v_i 和节点 v_j 之间不存在直接相连的边^[25]。即

$$A[i, j] = \begin{cases} a_{ij} \neq 0 & \exists e_{ij} \\ 0 & \text{ó} e_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

无向图的可达矩阵 $P_{n \times n}$ 可以表示图中所有节点之间的连通关系, 具体如式(5)所示^[26]。

$$P[i, j] = \begin{cases} 1 & v_i \text{和} v_j \text{存在连通路徑} \\ 0 & v_i \text{和} v_j \text{不存在连通路徑} \end{cases} \quad (5)$$

由图的邻接加权矩阵 $A_{n \times n}$ 可以求得可达矩阵 $P_{n \times n}$, 计算公式如式(6)所示^[26]。

$$\begin{cases} P_0 = \sum_{k=1}^n A^k \\ P[i, j] = \begin{cases} 1 & P_0[i, j] \neq 0 \\ 0 & P_0[i, j] = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 解列计算连通性约束的构成

合理的解列断面形成的所有子系统内部的所有节点应该是互相连通的, 不应该出现孤立的节点。由可达矩阵的定义可知, 如果一个子系统是连通的, 这个子系统的可达矩阵是一个所有元素全为 1 的矩

阵, 即 $\mathbf{P}_{n \times n} = \mathbf{1}_{n \times n}$ 。

对于遗传算法形成的子系统 S_k 的节点集合 $V_{S_k} = \{v_i\}_{1 \times n_k}$, 通过式(7)可以将子系统 S_k 中的节点对应原系统的邻接加权矩阵 $\mathbf{A}_{n \times n}$ 的行与列提取出来形成子系统 S_k 的伪邻接加权矩阵 $\mathbf{A}_{n_k \times n_k}$ 。

$$\mathbf{A}_{n_k \times n_k} = \mathbf{A}[\{i\}_{1 \times n_k}, \{i\}_{1 \times n_k}] \quad (7)$$

通过式(6)可求得 $\mathbf{A}_{n_k \times n_k}$ 的可达矩阵 $\mathbf{P}_{n_k \times n_k}$, 若 $\mathbf{P}_{n_k \times n_k} = \mathbf{1}_{n_k \times n_k}$, 则子系统 S_k 是连通的。若解列形成的所有子系统都是连通的, 则这个解列断面是合理的。

2.3 基于含连通性约束遗传算法(CTGA)的最优解列断面搜索方法

假设待解列的系统有 m 个同调机群, 即要解列形成 m 个子系统, 系统总节点数为 n , 发电机节点数为 p , 负荷节点数为 q 。将 q 个负荷节点分配到 m 个含有各自同调发电机群的子系统中, 使得每个子系统的功率不平衡最小, 式(3)中的目标函数即为遗传算法的目标函数。CTGA 求解最优解列断面的流程如图 1 所示。

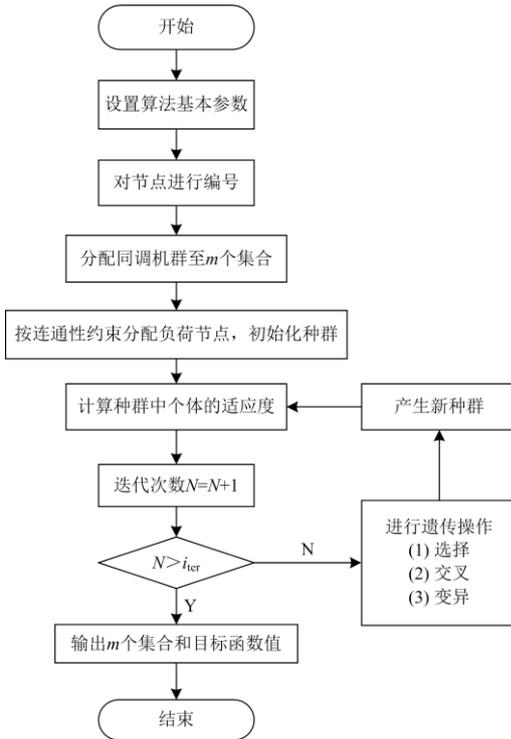


图 1 CTGA 求解最优解列断面的流程图

Fig. 1 Flow chart of the CTGA to solve the islanding section

算法的具体步骤如下:

- 1) 设置种群规模 p_{op} 、父代数量 p_{ar} 、迭代次数 i_{ter} 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_M ;

- 2) 对系统的所有节点进行编号 1~n;
- 3) 将 m 个同调机群分别放入 m 个集合里, 以满足式(3)中的同调性约束;
- 4) 按照式(6)和式(7), 将 q 个负荷节点分配到 m 个集合中, 进行种群的初始化, 使生成的种群中的候选解满足式(3)中的连通性约束;
- 5) 求解个体的目标函数值;
- 6) 舍弃目标函数值较大的个体;
- 7) 对于生存下来的个体进行遗传、变异和交叉操作, 产生新的种群;
- 8) 重复步骤 5)~步骤 7), 直至进化代数到达指定迭代次数 i_{ter} ;
- 9) 输出求出的 m 个集合和对应的目标函数值。

3 系统拓扑的简化和预处理方法

适当地对系统的拓扑进行简化可以提高主动解列断面搜索效率, 文献[17]基于 Dijkstra 算法提出了针对主动解列问题的系统拓扑简化方法; 文献[21]基于最小生成树方法提出了一种基于搜索空间缩减的系统拓扑简化方法。这两种方法都是将同调机群进行聚合处理, 将大系统的拓扑结构进行简化。本文在此基础上进一步提出了悬挂节点的概念, 对系统拓扑进行了进一步简化, 并提出了一种在求解主动解列断面时的系统简化和预处理方法。

本文采用 IEEE 118 节点标准测试系统为例说明本文提出的系统拓扑的简化和预处理方法。系统的拓扑结构如图 2 所示, 该系统含有 19 个发电机节点和 99 个负荷节点, 图中发电机节点和负荷节点分别以黑色方块和白色圆圈标注。系统的有功总出力为 4374.86 MW, 总有功负荷为 4242 MW, 系统有功网损为 132.86 MW, 将系统有功网损按式(2)进行等效处理。测试系统的同调机群分组情况如表 1 所示[18]。

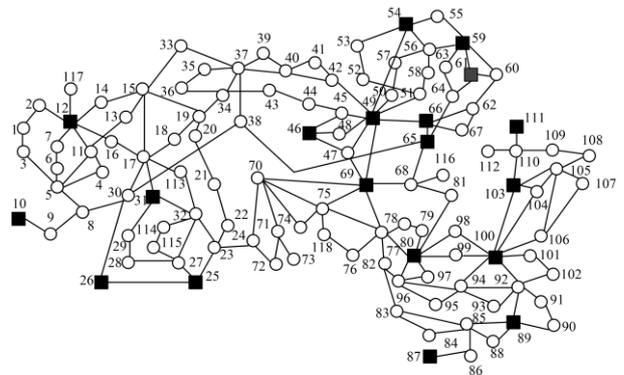


图 2 IEEE 118 节点标准测试系统拓扑结构图

Fig. 2 IEEE 118-node standard test system topology graph

表 1 IEEE 118 节点标准测试系统同调机群分组情况

Table 1 Coherent generator groups in IEEE 118-node standard test system

分组	组内发电机节点编号	有功出力/MW
1	10, 12, 25, 26, 31	1043.3230
2	46, 49, 54, 59, 61, 65, 66, 69, 80	2288.1935
3	87, 89, 100, 103, 111	910.4835

为提高算法的计算效率, 本文针对主动解列断面搜索提出了一种系统拓扑简化和预处理方法, 具体如下:

1) 将同调发电机进行聚合处理。按式(1)建立 IEEE 118 节点系统的无向加权图, 其中节点的权值

按式(2)确定, 边的权值设置为对应支路的阻抗值, 则 IEEE 118 节点系统图的邻接加权矩阵元素的表达式为

$$A[i, j] = \begin{cases} 0 & i = j \text{ 或 } \delta e_{ij} \\ z_{ij} & i \neq j \text{ 且 } \exists e_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

通过广度优先算法求得表 1 中各组同调发电机之间的最短电气路径, 并将最短电气路径上的所有节点进行聚合处理, 聚合后得到 3 个等效发电机节点, 如图 3 和图 4 所示。经过步骤 1) 的处理生成了 3 个聚合等效发电机节点, 系统由 118 个节点减少到 84 个节点。

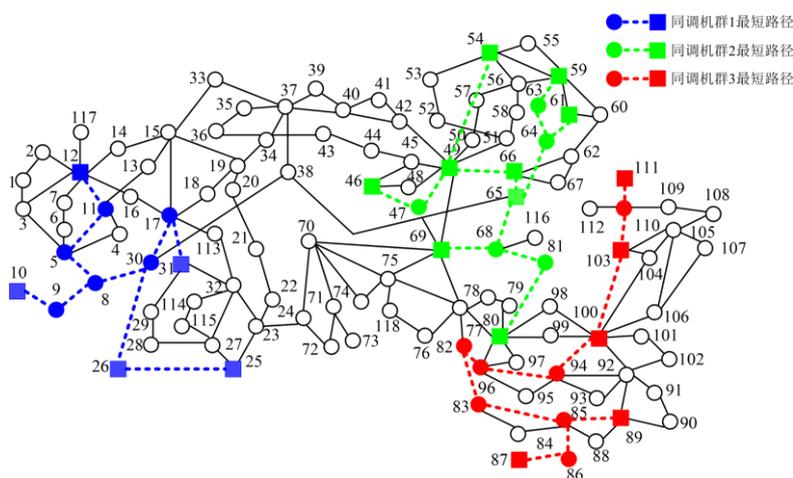


图 3 各同调发电机之间的最短电气路径

Fig. 3 Shortest electrical paths among coherent generators

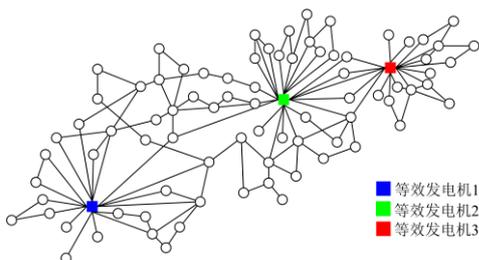


图 4 节点聚合后的系统拓扑图

Fig. 4 System topology after node aggregation

2) 将悬挂节点并入等效发电机节点中。经过步骤 1) 的聚合后, 系统的拓扑结构产生了一些悬挂节点, 它们直接或间接悬挂在一个等效发电机节点上, 且与其他等效发电机节点之间的所有连通路都要经过所悬挂的等效发电机节点, 如图 5 所示。在解列计算中, 这些悬挂节点只能划入所悬挂的等效发电机节点所在的子系统中, 否则会产生孤立节点, 因此在后续断面搜索中不再考虑此类节点的归属问

题, 本文将悬挂节点并入所悬挂的等效发电机节点中, 得到最终系统拓扑结构如图 6 所示。

经过上述两步简化步骤后, 系统节点数由 118 个减少至 47 个, 等效发电机节点的有功出力=该同调机群总有功出力-(对应聚合路径上的节点有功负荷+悬挂节点有功负荷), 如表 2 所示。

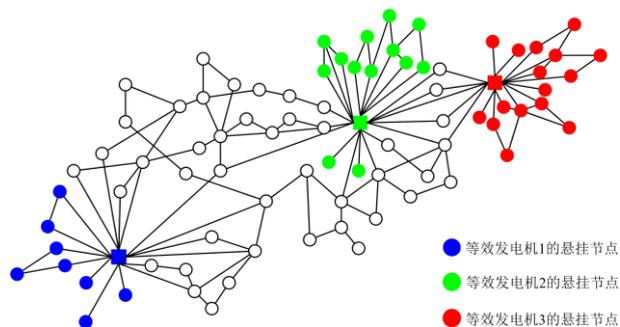


图 5 3 个等效发电机节点的悬挂节点

Fig. 5 Suspension nodes of three equivalent generator nodes

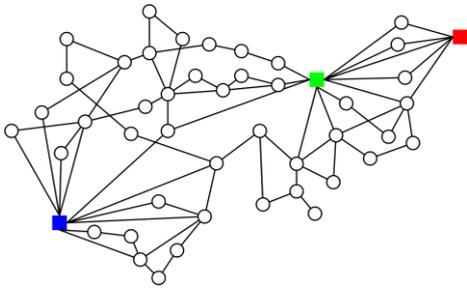


图 6 合并悬挂节点后的系统拓扑图
Fig. 6 System topology diagram after merging suspension nodes

表 2 等效发电机节点有功出力计算
Table 2 Active power output calculation of equivalent generator node

等效发电机节点	聚合路径节点有功负荷/MW	悬挂节点有功负荷/MW	等效发电机节点有功出力/MW
1	199	265	579.3230
2	708	633	947.1935
3	286	618	6.4835

4 算例分析

本文基于拓扑连通性约束的遗传算法(CTGA)对 IEEE 118 节点的主动解列最优断面进行求解。实验 PC 机的 CPU 主频为 2.90 GHz, 内存为 16 G, CTGA 程序基于 Matlab R2021a 平台实现。首先将遗传算法的基本参数设置如下: 种群规模 $p_{op} = 50$ 、父代数量 $p_{ar} = 30$ 、迭代次数 $i_{ter} = 40$ 、交叉概率 $P_c = 0.9$ 、变异概率 $P_m = 0.9$ 。将第 3 节中简化后的系统数据和拓扑结构输入到 CTGA 中进行主动断面的求解, 式(3)中的目标函数值 f_{it} 随迭代次数的变化情况如图 7 所示。

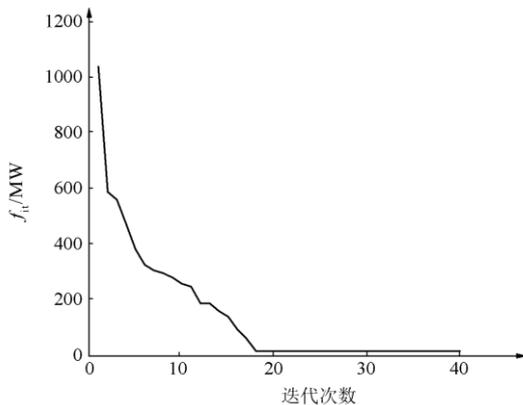


图 7 f_{it} 随迭代次数变化情况
Fig. 7 Changes of f_{it} with the number of iterations

经过 40 次迭代后, 式(3)中的目标函数值 f_{it} 最终保持在 17.0329 MW, 即 3 个子系统的不平衡功率绝对值之和为 17.0329 MW, CTGA 的运行时间为 0.26 s, 满足主动解列的快速性要求, 得到的 3 个子系统和解列断面割集如图 8 虚线所示。

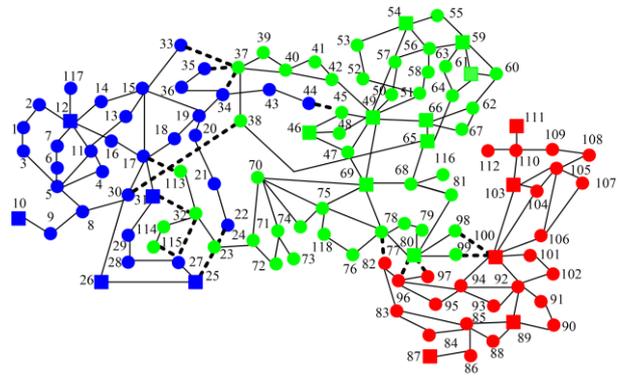


图 8 IEEE118 节点系统解列断面搜索结果
Fig. 8 Islanding section searching result of IEEE 118-node system

各个子系统的有功功率不平衡情况如表 3 所示, 其中子系统的有功功率不平衡比例=|不平衡有功功率|/子系统总有功负荷×100%。

表 3 各子系统的有功功率不平衡情况
Table 3 Unbalanced active power of each subsystem

子系统	总有功出力/MW	总有功负荷/MW	不平衡有功功率/MW	不平衡有功功率比例/%	不平衡有功功率绝对值之和/MW
1	1043.3230	1041	2.3230	0.2232	
2	2288.1935	2282	6.1935	0.2714	17.0329
3	910.4835	919	-8.5165	0.9267	

为体现出 CTGA 在求解最优解列断面的优越性, 将本文方法与文献[9, 27]所提方法的效果进行比较。文献[9]没有考虑网损, 按本文方法处理文献[9]网损后, 得到其解列后各子系统不平衡有功功率绝对值之和为 71.033 MW; 按文献[27]方法得到解列后各子系统不平衡有功功率绝对值之和为 21.613 MW。按文献[9, 27]进行解列后的各子系统不平衡功率情况如表 4 所示。

可以看出, 本文方法搜索出的主动解列断面相对于文献[9, 27]的不平衡功率更小, 即在后续子系统稳定控制中的切机切负荷量更小, 更有利于电网的安全稳定运行。

同时, 本文将未简化的系统拓扑和数据输入到 CTGA 中进行了主动解列断面求解, 其他参数和实验条件均保持一致, 求得的解列断面与图 8 相同,

CTGA 的运行时间为 0.93 s, 是简化系统的 3.58 倍, 验证了本文所提出的系统拓扑简化和预处理方法的有效性。

表 4 本文方法与文献[9, 27]方法的效果对比

Table 4 Effect comparison among this paper and

References [9, 27]

方法	子系统	不平衡有功功率/MW	不平衡有功功率比例/%	不平衡有功功率绝对值之和/MW
CGGA	1	2.3230	0.2232	
	2	6.1935	0.2714	17.0329
	3	-8.5165	0.9267	
文献[9]	1	30.3230	2.9933	
	2	5.1935	2.2749	71.0330
	3	-35.5165	3.7544	
文献[27]	1	8.3230	0.8042	
	2	-10.8065	0.4701	21.6130
	3	2.483 5	0.2735	

5 结论

本文提出了一种含有拓扑连通性约束的遗传算法用于求解主动解列的最优断面, 得出以下结论:

1) 本文利用图论的邻接矩阵和可达矩阵知识构成了主动解列断面求解的拓扑连通性约束, 保证了求解出的子系统具有连通性和完整性, 不存在孤立节点;

2) 本文提出了一种系统拓扑结构简化和预处理方法, 通过聚合同调发电机节点、合并悬挂节点简化了系统的拓扑结构, 很大程度上提高了主动解列断面搜索的运算效率;

3) 本文采用遗传算法, 以各子系统内部不平衡有功功率最小为目标函数, 通过选择、交叉和变异操作进行迭代优化, 保证了求解出的各子系统有功功率最平衡。

参考文献

[1] 朱劲璇, 王彤, 王增平, 等. 考虑主导不稳定平衡点变化的电力系统暂态稳定切机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 20-28.
ZHU Shaoxuan, WANG Tong, WANG Zengping, et al. Generator tripping strategy in transient stability control of a power system considering the change of the controlling unstable equilibrium point[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 20-28.

[2] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.

ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.

[3] 徐波, 章林炜, 俞向栋, 等. 基于系统辨识的电力系统惯量在线评估改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 62-69.
XU Bo, ZHANG Linwei, YU Xiangdong, et al. An improved method of power system inertia online estimation based on system identification[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 62-69.

[4] CHANDAK S, BHOWMIK P, ROUT PK. Load shedding strategy coordinated with storage device and D-STATCOM to enhance the microgrid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 250-268.

[5] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.

[6] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 1-13.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 1-13.

[7] 宋洪磊, 吴俊勇. 基于广域量测信息的电力系统主动解列控制研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3467-3474.
SONG Honglei, WU Junyong. A summarization of research on wide-area measurement information based power system controlled islanding[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3467-3474.

[8] 宋洪磊. 基于 WAMS 信息的大区域互联电网主动解列控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
SONG Honglei. Controlled islanding strategy based on WAMS information in large-scale interconnected power grid[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[9] 程敏. 电力系统主动解列控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
CHENG Min. Research on active splitting control strategy of power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[10] 程敏, 杨文涛, 文福拴, 等. 电力系统主动解列断面搜索方法与孤岛调整策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 37-45.
CHENG Min, YANG Wentao, WEN Fushuan, et al. Controlled splitting sections searching method and islanding adjustment strategy for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 37-45.

[11] 杨健, 唐飞, 廖清芬, 等. 基于半监督谱聚类的最优主动解列断面搜索[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 242-249.
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. An optimal

- controlled partitioning scheme based on semi-supervised spectral clustering algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 242-249.
- [12] 倪敬敏, 沈沉, 陈乾. 基于慢同调的自适应主动解列控制(一): 理论基础探究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4374-4384.
NI Jingmin, SHEN Chen, CHEN Qian. Adaptive controlled islanding based on slow coherency—part I: research on the theoretical basis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4374-4384.
- [13] 倪敬敏, 沈沉, 陈乾. 基于慢同调的自适应主动解列控制(二): 实用慢同调区域划分方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4865-4875.
NI Jingmin, SHEN Chen, CHEN Qian. Adaptive islanding control based on slow coherency—part II: practical area partition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4865-4875.
- [14] 倪敬敏, 沈沉, 陈乾. 基于慢同调的自适应主动解列控制(三): 实用方案设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5597-5609.
NI Jingmin, SHEN Chen, CHEN Qian. Adaptive islanding control based on slow coherency—part III: design of the practical scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5597-5609.
- [15] EL-ZONKOLY A, SAAD M, KHALIL R. New algorithm based on CLPSO for controlled islanding of distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 45(1): 391-403.
- [16] AGHAMOHAMMADI MR, SHAHMOHAMMADI A. Intentional islanding using a new algorithm based on ant search mechanism[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35(1): 138-147.
- [17] 王乙斐, 唐飞, 廖清芬, 等. 带连通性约束的蚁群优化算法主动解列断面求解策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 56-62.
WANG Yifei, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Controlled splitting surface searching strategy based on ant colony optimization algorithm under connectivity constraints[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 56-62.
- [18] TURAJ A, HOSSEIN S. Controlled islanding using transmission switching and load shedding for enhancing power grid resilience[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 91: 135-143.
- [19] FARHAD T, TURAJ A, HOSSEIN S, et al. Toward controlled islanding for enhancing power grid resilience considering frequency stability constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1735-1746.
- [20] SADEGH K, TURAJ A, MAHMUD F. Controlled islanding for enhancing grid resilience against power system blackout[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2386-2396.
- [21] ALEXIS K, PANAYIOTIS D, CHRISTOS P, et al. Controlled islanding solution for large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1591-1602.
- [22] 王旭东. 基于图论的智能电网最优孤岛划分模型和算法[D]. 天津: 天津大学, 2011.
WANG Xudong. Model and algorithm of the optimal island partition of smart grid based on graph theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [23] 林济铿, 李胜文, 吴鹏, 等. 电力系统最优主动解列断面搜索模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 86-94, 195.
LIN Jikeng, LI Shengwen, WU Peng, et al. Model and algorithm for the optimal controlled partitioning of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 86-94, 195.
- [24] 李高望, 张智, 李达, 等. 基于 Prony 分析特征提取的同调机组分群方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 91-99.
LI Gaowang, ZHANG Zhi, LI Da, et al. Coherency clustering method based on Prony analysis feature extraction[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 91-99.
- [25] 马帅. 基于有序二叉决策图的电网主动解列策略搜索方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
MA Shuai. A research of OBDD-based searching method for active splitting strategies of power networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [26] 叶红. 可达矩阵的 Warshall 算法实现[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 31-35.
YE Hong. Reach ability matrix by Warshall algorithm[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2011, 35(4): 31-35.
- [27] 汪成根, 张保会, 郝治国, 等. 一种电力系统失步解列面的实时搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 48-55.
WANG Chenggen, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. A real-time searching method for splitting surfaces of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 48-55.

收稿日期: 2022-02-02; 修回日期: 2022-03-09

作者简介:

汪昭辰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估、电力系统保护与控制; E-mail: wangzhaochen1999@163.com

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制; E-mail: wangzp1103@sina.com

相禹维(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统风险评估、电力系统稳定分析与控制。E-mail: 1977593218@qq.com

(编辑 周金梅)