

基于“搜索 + 优化”的主动解列断面选择方法

王乙斐, 刘涤尘, 廖清芬

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对大规模电力系统失稳后应及时进行解列的问题, 提出一种“搜索+优化”的主动解列断面选择方法。该方法在“搜索”阶段分 2 个步骤进行: 首先将电力系统等效为无向加权图, 以 Floyd 算法得到节点之间的耦合程度获取公共节点, 对原始网络结构进行降维; 再依据失稳机组电压相角均值与负荷节点电压相角差的大小, 将公共节点划分到相应的集合中, 得到初始解列断面。“优化”阶段按照解列原则对初始解列断面进行调整, 得到满足孤岛功率平衡约束的解列面。所提算法计算复杂度小, 能快速缩减求解策略的规模, 确定最终解列断面。以 CEPRI 36 节点系统和 IEEE 118 节点系统进行仿真, 结果验证了所提方法的正确性与有效性。

关键词: Floyd 算法; 主动解列; 解列策略; 电力系统; 优化

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.008

0 引言

随着我国互联电网规模不断地扩大, 系统中某区域的局部扰动将通过联络线快速扩散至整个电网, 严重时会引发大停电事故^[1-4]。失步解列作为保证大电网安全稳定运行的第三道防线, 是防止电网大面积停电的重要手段^[5-8]。

在多数情况下, 电网实施被动解列后, 系统内部容易出现发电机出力与负荷之间的极不平衡功率, 电网仍需要采取切机、切负荷等措施才能使系统达到稳定^[9-11]。而主动解列则根据系统的在线运行水平与故障信息, 对故障严重性进行准确评估, 在短时间内找到使孤立子系统迅速恢复稳定的最优断面, 主动将整个网络分解为若干个孤岛, 有效减少了切机、切负荷等操作, 保障了电力系统安全稳定地运行^[12-14]。因此, 主动解列是未来解列控制系统发展的新方向。

解列点选择是主动解列决策过程中的 where 问题, 目前也是研究的热点^[5]。从理论角度分析, 系统中每一条线路皆是潜在的解列线路, 解列时需要通过网络中所有线路进行搜索。这样, 原始解列策略数量将随着网络规模扩大呈几何级数增长, 难以满足计算快速性要求^[15-16]。如果能在不影响最终解列断面的前提下降低网络维数, 消除冗余信息, 在缩小后的求解空间中搜索解列断面, 将对主动解列具有重要意义。

文献[10]基于调度分区的方法, 从失稳区内边

界子区域的外层节点与剩余区间的联络线中搜索解列断面, 满足在线应用的快速性要求, 但未将子系统内部发生失稳的情况考虑到可控范围内。文献[15]提出基于决策空间预筛的解列策略搜索算法, 该方法能够在不损失可行解的前提下极大地减小决策空间规模, 但较难进行节点辨识。文献[16]依据慢模式特征值大小对线路进行直接处理, 有效避免了整个网络节点的划分, 但该方法计算冗长, 且运行方式的变化会影响最终判断结果。文献[17]利用有向二元决策图(OBDD)法将解列断面的求解问题转化为带约束边割问题, 有效减小了系统决策空间, 但该算法的复杂度成幂级数增长, 当系统增大到一定规模后, 受计算机内存影响, 策略搜索将无法继续完成。

本文在现有相关研究的基础上, 提出了一种新解列断面选择方法。该方法无需对系统弱连接进行识别, 也没有失稳模式的限制, 可迅速缩小求解空间确定解列断面, 并能对最终解列面作优化处理, 为主动解列控制的实现奠定了基础。基于 CEPRI 36 节点系统和 IEEE 118 节点系统的仿真结果验证了该方法的有效性 with 正确性。

1 “搜索+优化”的理论特性

如图 1 所示, 失稳后系统中的节点由两部分构成: 一部分是单独与某机群(如 Area1 或 Area2)存在强耦合联系的节点, 以空心圆圈表示; 另一部分是与几个机群(如 Area1 和 Area2)共同存在强耦合联系的节点, 以实心圆圈表示。而大量实践经验表明, 系统最终的解列断面实质上是在共同拥有的区域中寻找使解列后子系统平衡的点的集合。因此, 若能将系统中某机群单独拥有的节点(如空心圆圈所示)消除, 则可排除大量非可行解列策略, 加快系统的搜索速度。

由图 1 可知, 降维后系统的求解策略空间由 2^n

收稿日期: 2014-02-12; 修回日期: 2015-05-13

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG029-2012)

Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG029-2012)

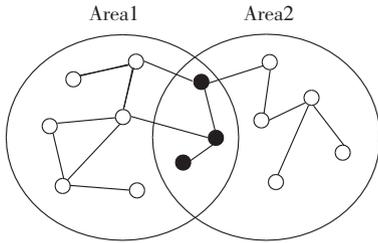


图 1 系统失稳后网络结构

Fig.1 Network structure of instable grid

降低至 2^{a-b} , 其中 a 为原始节点数, $a-b$ 为公共区域中节点数。若能将断面搜索问题从整体深化到局部, 在 2^{a-b} 维空间中进行断面搜索, 并以功率平衡为原则加以调整, 则能确定最终断面。因此, 本文提出了一种“搜索+优化”的综合算法, 该算法分 3 步进行, 其中前 2 步属于“搜索”, 第 3 步属于“优化”。首先应用 Floyd 算法对采集到的潮流信息进行分析, 得到系统内各节点之间的最短电抗累积和, 保留与失稳机群均存在强耦合联系的公共区域, 完成对网络结构的降维处理; 然后根据失稳时各节点电压相角的暂稳特性, 对第 1 步得到的公共区域做二次处理, 将其包含的节点划分到相应的集合中, 则可确定初始解列断面; 最后以解列原则对初始解列面进行调整优化, 得到满足孤岛功率平衡约束的解列面。具体流程图如图 2 所示。

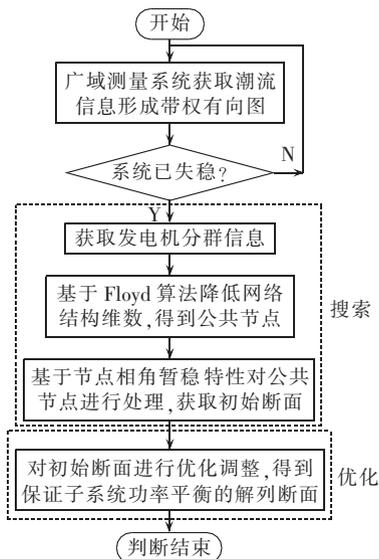


图 2 “搜索+优化”实施过程

Fig.2 Flowchart of “searching + optimization”

2 基于 Floyd 算法化简网络结构

Floyd 算法是一种解决最短路径规划的算法, 目前已广泛地运用在网络通信领域、交通运输、信息包传递等方面。电力网络也是典型复杂网络中的一种^[18-20]。因此, 本节将利用 Floyd 算法求解节点之间的最短电抗累积和以化简网络结构。

2.1 最短电气距离的数学特性

电力系统的拓扑结构可描述为由顶点和边组成的带权无向图 $G(V, E)$, 其中 V 为电网中所有发电机、变电站和负荷节点的集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$; E 为一组有权边的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_q\}$ 。系统中任意一条弧为 $l_{ij} = (v_i, v_j)$, 为与解列操作的实际应用相结合, 本文用节点 v_i 与节点 v_j 间边的电抗值 x_{ij} 表示 l_{ij} 上的权值。边权值反映了相邻节点间耦合的强弱程度。

假设系统 G 中, 顶点 v_r 到顶点 v_s 存在 h 条路径, t 为 h 条路径中任意一条, 定义路径 t 的权 W_t 为 t 中所有弧的权值之和, 即:

$$W_t = \sum_{x_{ij} \in t} x_{ij} \quad (1)$$

其中, $x_{ij} \in t$ 表示 x_{ij} 为构成路径 t 的线路元素。

若 h 条路径中的某一条路径 j 的权值满足 $W_j = \min\{W_t, t \in h\}$ ($j \in h$) ($t \in h, j \in h$ 分别表示路径 t, j 为 h 条路径中任意一条), 则称 W_m 为顶点 v_r 到顶点 v_s 路径的最短电抗累积和。

两点间最短电抗累积和的大小在一定程度上反映了网络中节点间电气联系的强弱^[18-20]。其值越大, 说明两点之间距离越远, 电气耦合程度越弱; 其值越小, 说明两点之间距离越近, 电气耦合程度越强。因此, 两点之间最短电抗累积和路径实质上表征了两点之间联系最强的路径。

2.2 Floyd 最短路径算法

Floyd 算法的核心思想是在未标记的点中选择一个权值最小的弧段^[21-23], 进行循环比较的过程。本文将该算法运用于求解节点间最短电抗累积和, 主要分为以下几个步骤进行。

a. 获取系统的暂态稳定性, 判断机组分群情况, 假设系统受大扰动失去稳定后分为 m 个机群。

b. 假设系统 $G=(V, E)$ 中共包含 n 个节点, y 个发电机节点 v_G , 用集合 V_G 表示; u 个负荷节点 v_L , 用集合 V_L 表示; $y+u=n, V_G \cap V_L = \emptyset, V = V_G \cup V_L$ 。首先, 构造系统的带权邻接矩阵 W 。

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 0 & i=j \\ x_{ij} & i \neq j, \text{且 } (v_i, v_j) \text{ 为图 } G \text{ 的边} \\ \infty & i \neq j, \text{且 } (v_i, v_j) \text{ 非图 } G \text{ 的边} \end{cases} \quad (3)$$

c. 在 MATLAB 中编写 Floyd 算法程序, 计算任意两节点间的最短电抗累积和, 提取其中发电机与负荷节点间的最短路径部分构成矩阵 $\tilde{D}_{n_c \times n_l}$ 。

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{v_{G1}v_{L1}} & \cdots & \tilde{d}_{v_{G1}v_{Ln}} \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{d}_{v_{Gy}v_{L1}} & \cdots & \tilde{d}_{v_{Gy}v_{Ln}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\tilde{d}_{v_{Gi}v_{Lj}}$ 为负荷节点 v_{Gi} 到发电机节点 v_{Lj} 之间的最短电抗累积和。

d. 已知系统受到扰动后分为 m 个机群,若要得到系统中负荷节点到不同同调机群的最短电抗累积和,则通过计算到该同调机群中所有机组的最短电抗累积和的平均值来确定。

$$D_{v_{Li}}^m = \frac{1}{N_{m_s}} \cdot \bigcup_{v_{Gi} \in m_s} \tilde{d}_{v_{Gi}v_{Lj}} \quad (5)$$

其中, m_s 为某一机群; N_{m_s} 为机群 m_s 所包含的发电机数量; $D_{v_{Li}}^m$ 为负荷节点 v_{Li} 到机群 m_s 的最短距离。

2.3 节点辨识

假设 m_a, m_b 为 m 个机群中任意 2 个机群,节点 v_{Li} 到这 2 个机群的最短平均距离之差 $\mu = D_{v_{Li}}^{m_a} - D_{v_{Li}}^{m_b}$, $|\mu|$ 大小的实质表征了节点 v_i 与这 2 个机群电气强弱的比较。设定 ε 为阈值,若 $|\mu| > \varepsilon$,表示负荷节点 v_{Li} 与 2 个机群的联系相差较大,节点 v_{Li} 与某一个机群存在强联系,定义这种节点为一般节点(如图 2 中空心节点所示),主导机群可由 μ 的正负确定;若 $|\mu| < \varepsilon$,表示负荷节点 v_{Li} 与机群 m_a, m_b 之间联系的强弱程度接近,将该种节点定义为公共节点 v_p (如图 2 中实心节点所示)。其中, ε 的整定可根据实际电网的特性分析、统计数据、运行经验进行具体整定。如果阈值取值过大,会导致公共节点数目过多,增加第 2 阶段计算的复杂度;阈值取值过小,会导致第 2 步搜索空间过小,丢失可行解。因此,本文通过对 CEPRI 36 节点和 IEEE 118 节点系统进行故障扫描,选择 0.05 作为阈值门限。

如第 1 节中所述,将系统中的一般节点消除,对公共节点所在区域进行重点研究,能够在较小的范围内寻找系统的解列策略,从而减小搜索问题的求解规模。

3 基于暂态特性的节点划分

由第 2.2 节可知, G 是一个 n_G 机系统。假设系统受扰后 n_A 台发电机相对于 n_B 台机组失稳^[24], $n_A + n_B = n_G$ 。 n_A 台发电机组成机群 A , n_B 台发电机组成机群 B 。发电机节点 v_{Gi}, v_{Gj} 与系统中任意非发电机节点即负荷节点 v_{Lk} , 在系统中所处的情况有以下几种。

a. 当 $\{v_{Gi}, v_{Gj}\} \in$ 机群 A , 其电压相角 $\theta_i \approx \theta_j$, 节点 v_{Lk} 处的电压相角 θ_k 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \theta_k \approx \theta_i & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } A \\ \theta_k \ll \theta_i & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } B \end{cases} \quad (6)$$

b. 当 $\{v_{Gi}, v_{Gj}\} \in$ 机群 B , 其电压相角 $\theta_i \approx \theta_j$, 节点 v_{Lk} 处的电压相角 θ_k 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \theta_k \approx \theta_i & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } B \\ \theta_k \gg \theta_i & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } A \end{cases} \quad (7)$$

c. 当 $v_{Gi} \in$ 机群 A 、 $v_{Gj} \in$ 机群 B 时,电压相角 $\theta_i \gg \theta_j$, 节点 v_{Lk} 处的电压相角 θ_k 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \theta_k \approx \theta_i & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } A \\ \theta_k \approx \theta_j & \text{节点 } v_{Lk} \text{ 靠近机群 } B \end{cases} \quad (8)$$

基于上述理论分析,可通过将失步机组发电机节点电压相角的平均值与公共节点电压相角 θ_k 进行比较,把公共节点分到 2 个集合 V_a 和 V_b 中,集合 V_a 包含了失步的 n_A 台发电机及部分负荷节点,集合 V_b 包含了失步的 n_B 台发电机及其余的负荷节点。具体步骤如下。

a. 对系统实际监测预设点处的联络线电气量进行捕捉,获取系统分群情况与节点电压相角。

b. 基于系统分群情况,计算失步机群 A 内发电机节点电压相角平均值 $\tilde{\theta}_A = \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{n_A} \theta_i$, 计算失步机群 B 内发电机节点电压相角平均值 $\tilde{\theta}_B = \frac{1}{n_B} \sum_{j=1}^{n_B} \theta_j$ 。

c. 将公共节点电压相角 θ_k 与 $\tilde{\theta}_A, \tilde{\theta}_B$ 做比较。若 $|\theta_k - \tilde{\theta}_B| < |\theta_k - \tilde{\theta}_A|$, 则说明 $v_{Lk} \in V_a$; 若 $|\theta_k - \tilde{\theta}_A| > |\theta_k - \tilde{\theta}_B|$, 则说明 $v_{Lk} \in V_b$ 。

d. 重复进行步骤 **c** 直至所有公共节点分入相应的集合中,完成节点划分。

上述步骤仅针对失步为两机群情况而言,若为多机群时,则可按照相同的方法进行两两比较。因此,采用该方法对公共节点进行处理,能将其划分到相应的集合中,寻找到初步解列断面。

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性与快速性,在电力系统综合分析程序(PSASP)和 MATLAB 中进行仿真计算。

4.1 CEPRI 36 节点系统

CEPRI 36 节点系统是中国电科院的标准算例,该系统包括 8 台发电机、36 条母线以及 32 条交流线,总发电量为 2652 MW,总负荷量为 2567.8 MW,基准功率为 100 MW。

4.1.1 搜索初始解列断面

假设系统 0 s 时在线路 19-30 上发生三相接地短路故障,0.2 s 后清除故障。发电机群 I $\{G_7, G_8\}$ 相对于发电机群 II $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6\}$ 失步。根据图 2 所示的简化网络流程图,在已知发电机分群信息之后,采用 Floyd 算法求解负荷节点到机群 I、机群 II 的最短电抗累积和之差 $\mu (\mu = D_{v_{Li}}^I - D_{v_{Li}}^{II})$, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知,当 $\varepsilon = 0.5$ 时,系统所包含的公共节点为 14、15、19、21、29、33、34、52,解列策略集由原始的 2^{27} 维降低为 2^8 维,搜索空间大幅减小。具体网架结构如图 3 所示,其中灰色圆圈代表分至群 I 的一般

表 1 负荷节点到两机群最短电抗累积和之差
Table 1 Difference between shortest reactance cumulative sums from load node to two unit sets

节点	μ	节点	μ	节点	μ
9	0.0874	19	0.0152	29	-0.0313
10	0.0860	20	0.1210	30	-0.2556
11	0.0848	21	0.0398	31	-0.2557
12	0.0618	22	0.0944	50	0.0925
13	0.0806	23	0.0918	33	0.0156
14	0.0352	24	0.1165	34	-0.0413
15	0.0378	25	0.0847	51	0.0861
16	0.0814	26	0.0618	52	0.0377
17	0.0807	27	0.0618		
18	0.0925	28	0.0805		

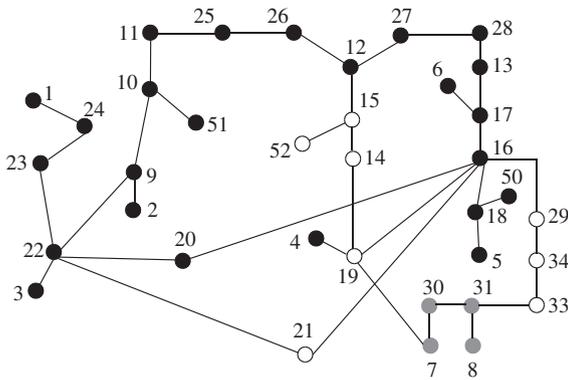


图 3 CEPRI 36 节点系统结构图

Fig.3 Structure of CEPRI 36-bus system

节点,黑色圆圈代表分至群 II 的一般节点,空心圆圈代表所求得公共节点。

为将公共节点分配至相应的子系统中以获取初始解列断面,基于实时监测的信息,公共节点与发电机节点故障前后的电压相角如表 2 所示。

表 2 故障前后相关节点电压相角
Table 2 Voltage phase angle of related nodes before and after fault

节点	$\theta / (^{\circ})$		节点	$\theta / (^{\circ})$	
	0 s	0.21 s		0 s	0.21 s
1	354.5	358.1	14	329.7	335.1
2	339.8	345.7	15	330.1	335.2
3	329.9	330.7	19	331.1	337.1
4	331.1	337.1	21	328.5	331.9
5	318.5	318.5	29	318.5	319.6
6	318.8	320.0	34	318.5	319.7
7	343.5	11.1	33	343.5	11.0
8	343.5	11.7	52	330.1	335.2

此时失步机群 I 的发电机节点电压相角平均值 $\bar{\theta}_I = 335.02^{\circ}$, 非失步机群 II 的发电机节点电压相角平均值 $\bar{\theta}_{II} = 11.4^{\circ}$ 。比较 $|\theta_i - \bar{\theta}_I|$ 与 $|\theta_i - \bar{\theta}_{II}|$ 的大小, 其中 θ_i 为公共节点的电压相角。可知, 失步机群 I 所在集合 V_a 包含节点 14、15、19、21、34、52、29, 失步机群 II 所在集合 V_b 包含节点 33。这样就完成了对解列断面的快速搜索。

初始子系统和断面如图 4 所示。

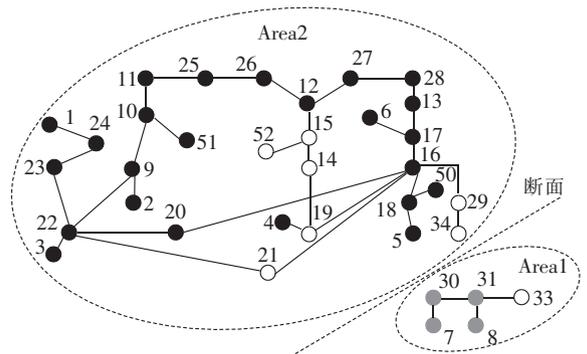


图 4 初始断面搜索结果

Fig.4 Results of initial islanding surface search

4.1.2 解列断面优化

可知, 初步搜索到的解列断面不一定为最终的解列断面。现采用深度优先算法以子系统功率平衡为原则对初始断面做相应的调整。

由潮流计算可知, 当解列断面如图 4 所示, 节点 $\{30, 31, 33\} \in \text{Area2}$ 时, Area1 和 Area2 的不平衡功率分别为 0.7391 p.u.、0.11 p.u.。节点 $\{30, 31, 33, 34\} \in \text{Area2}$ 时, Area1、Area2 的不平衡功率分别为 -4.4609 p.u.、5.31 p.u., 依此类推进行校验。结果发现, 本文所搜索的初始断面即为最终的解列断面。

在计算时间方面, 采用性能为 Intel(R) Core(TM) 2 Duo 2.97 GB 处理器、4 G 内存的计算机进行仿真, 初始断面搜索时间为 11 ms, 解列断面调整时间为 4 ms, 达到在线运用要求。

4.2 IEEE 118 节点系统

以 IEEE 118 节点为例, 该系统共包含 19 台发电机。假设线路 80-87 发生三相接地故障, 发电机 $\{G_{10}, G_{12}, G_{25}, G_{26}, G_{31}, G_{46}, G_{49}, G_{54}, G_{59}, G_{61}, G_{65}, G_{66}, G_{69}\}$ 为同调机群 I, 发电机 $\{G_{80}, G_{87}, G_{89}, G_{100}, G_{103}, G_{111}\}$ 为剩余机群即失步机群 II, 该系统被解列为 2 个区域子网。

采用本文第 3 节所述方法, 选取阈值 $\varepsilon = 0.05$, 得到系统的公共节点集为 $\{68, 75, 77, 79, 82, 104, 105, 106, 107, 118\}$, 具体结果如图 5 所示, 图中圆圈含义同图 3 中。

然后进行暂态特性分析, 得到失步机群 I 的发电机节点电压相角平均值 $\bar{\theta}_I = 25.31^{\circ}$, 失步机群 II 的发电机节点电压相角平均值 $\bar{\theta}_{II} = 79.6^{\circ}$ 。比较公共节点的电压相角 θ_i 与 $\bar{\theta}_I$ 、 $\bar{\theta}_{II}$ 差的大小, 可以得到失步机群 I 所在集合 V_a 包含节点 68、75、118, 失步机群 II 所在集合 V_b 包含节点 77、79、82、104、106、107。以孤岛功率平衡对初始解列断面进行优化, 可以得到初始解列断面即为最终解列断面, 所需切发电机和负荷量均最小。该系统的搜索时间达 23 ms, 其中初始搜索时间为 17 ms, 调整时间为 6 ms, 满足在线运

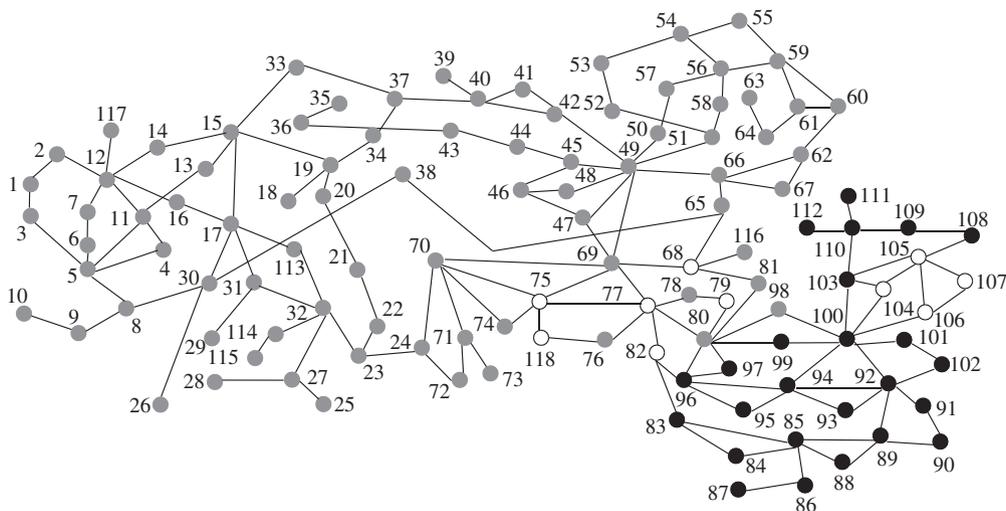


图 5 IEEE 118 节点系统
Fig.5 IEEE 118-bus system

算要求。

5 结论

本文提出一种基于“搜索+优化”的主动解列断面搜索方法。该方法具有以下 3 点优势:

a. 基于 Floyd 算法求取节点之间的电气耦合强度,完成系统降维处理的过程仅依赖于系统的网络结构,计算复杂度小,满足了解列断面搜索过程快速性的要求;

b. 通过节点电压相角之间的暂稳特性寻找系统初始解列断面的过程能适应运行方式的变化,可根据电力实时状况生成最佳简化策略,使得解列断面的确定更加智能化;

c. 对初始解列断面进行优化的过程,保证了系统解列后子系统内部稳定性的快速恢复,有效避免了大量切机、切负荷操作。

基于 CEPRI 36 节点系统与 IEEE 118 节点系统的仿真分析验证了该方法的有效性与正确性。

参考文献:

- [1] 张保会,汪成根,郝治国. 电力系统失步解列存在的问题及需要开展的研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):1-6.
ZHANG Baohui,WANG Chenggen,HAO Zhiguo. Problems and solutions of power system out-of-step islanding[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):1-6.
- [2] 张保会,郝治国,BO Zhiqian. 智能电网继电保护研究的进展(三)——保护功能的发展[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):1-6.
ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,BO Zhiqian. Development of relay protection for smart grid(3):development of protection function [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):1-6.
- [3] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8·14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-16.
YIN Yonghua,GUO Jianbo,ZHAO Jianjun,et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America

Power Grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology,2003,27(10):8-16.

- [4] CHEN J,THORP J S,DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. Electrical Power and Energy Systems,2005,27(6):318-326.
- [5] 沈沉,吴佳耘,乔颖,等. 电力系统主动解列控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(18):13-18.
SHEN Chen,WU Jiayun,QIAO Ying,et al. Studies on the active splitting control of power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(18):13-18.
- [6] 葛睿,董昱,吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术,2007,31(3):1-6.
GE Rui,DONG Yu,LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology,2007,31(3):1-6.
- [7] 陈恩泽,刘涤尘,廖清芬,等. 基于支路两端母线频差的失步解列判据研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):71-77.
CHEN Enze,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Out-of-step splitting criterion based on bus frequency difference[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):71-77.
- [8] SUN Kai,ZHENG Dazhong,LU Qiang. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2):912-923.
- [9] 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.
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.
- [10] 刘源祺,刘玉田. 基于调度分区的电力系统解列割集搜索算法[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):20-24.
LIU Yuanqi,LIU Yutian. An islanding cut set searching approach based on dispatching area[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(11):20-24.
- [11] 胥威汀,刘俊勇,李旻,等. 避免电网连锁解列的全局协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):33-39.

- XU Weiting, LIU Junyong, LI Min, et al. Globally coordinated control for preventing cascading split of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 33-39.
- [12] WANG C G, ZHANG B H, HAO Z G. Real-time searching method for power system splitting boundary[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(4): 1902-1909.
- [13] YANG B, VITTAL V, HEYD G T. Slow-coherency-based controlled islanding: a demonstration of the approach on the August 14, 2003 blackout scenario[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(11): 1840-1847.
- [14] 沈沉, 乔颖, 吴佳耘, 等. 电力系统主动解列仿真平台的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 1-6.
SHEN Chen, QIAO Ying, WU Jiayun, et al. Studies on the integrated simulation platform designed for active splitting control of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 1-6.
- [15] 乔颖, 沈沉, 卢强. 大电网解列决策空间筛选及快速搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 23-28.
QIAO Ying, SHEN Chen, LU Qiang. Islanding decision space minimization and quick search in case of large-scale grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 23-28.
- [16] 倪敬敏, 沈沉, 李颖, 等. 主动解列控制中电网弱连接的一种在线识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 24-30.
NI Jingmin, SHEN Chen, LI Ying, et al. An on-line weak-connection identification method for controlled islanding of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 24-30.
- [17] SUN Kai, ZHENG Dazhong, LU Qiang. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 912-923.
- [18] 赵慧梅, 宋琳丽. 基于图论的潮流转移快速搜索[J]. 水电站设计, 2009, 25(2): 40-45.
ZHAO Huimei, SONG Linli. Quick search for power transtering based on graph theory[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(2): 40-45.
- [19] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5.
- [20] 张国华, 张建华, 杨京燕, 等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 21-24.
ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, YANG Jingyan, et al. Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 21-24.
- [21] 俞峰. 复杂动态随机网络最短路径问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
YU Feng. The shortest path problems on complex dynamic and stochastic networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [22] 严晓凤, 陆济湘, 唐双平. 基于 Floyd 算法的校园最短路径问题分析与实现[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2012, 34(6): 695-703.
YAN Xiaofeng, LU Jixiang, TANG Shuangping. Analysis and implementation of campus shortest path based on Floyd algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2012, 34(6): 695-703.
- [23] 石为人, 王楷. 基于 Floyd 算法的机器人最短路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2088-2092.
SHI Weiren, WANG Kai. Floyd algorithm for the shortest path planning of mobile robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2088-2092.
- [24] 段振国, 高曙, 杨以涵, 等. 基于图论理论的电力系统解列策略生成方法[J]. 中国电力, 1998, 31(3): 7-9.
DUAN Zhenguo, GAO Shu, YANG Yihan, et al. A method of determining the point of system splitting based on graph theory[J]. Electric Power, 1998, 31(3): 7-9.

作者简介:



王乙斐

王乙斐(1990—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: wangyifei7@yeah.net);

刘涤尘(1953—),男,湖北红安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力自动监控技术、电力系统运行与控制、电力电子技术应用、电力故障诊断及电磁兼容等;

廖清芬(1975—),女,浙江衢州人,副教授,博士,从事电力系统稳定与控制方面的研究。

Islanding surface selection based on “searching + optimization”

WANG Yifei, LIU Dichen, LIAO Qingfen

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A method of islanding surface selection based on “searching + optimization” is proposed for the timely controlled islanding of instable large-scale power system. The “searching” phase includes two steps: with the power system as an undirected weighted graph, the Floyd algorithm is adopted to calculate the coupling degree between nodes to obtain the public nodes for reducing the dimension of original power grid; each public node is assigned to the corresponding unit set according to the difference between its voltage phase angle and the average voltage phase angle of instable unit set to obtain the initial islanding surface. In the “optimization” phase, the initial islanding surface is adjusted according to the islanding principle to satisfy the constraints of island power balance. With less complexity, the proposed method reduces the scale of solving strategy to quickly determine the final islanding surface. The CEPRI 36-bus system and IEEE 118-bus system are taken for simulation and the correctness and effectiveness of the proposed method are verified by the simulative results.

Key words: Floyd algorithm; controlled islanding; islanding strategy; electric power systems; optimization