

基于 Dijkstra 算法的最优解列断面快速搜索方法

王乙斐,唐 飞,刘涤尘,廖清芬,杨 健,汪颂军

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 如何快速确定合理的解列地点,是解列控制实施的关键。针对该问题,提出基于 Dijkstra 算法的最优解列断面搜索方法。该方法以 Dijkstra 算法求取节点间最小电抗累加和路径,依据各节点间的电气联系强弱程度,将节点划分为公共节点与一般节点;凭借解列断面与公共节点的联系,将解列断面的搜索转换为公共节点的处理问题,缩小了预搜索空间的规模;以解列后子系统中有功不平衡功率最小为目标函数,基于宽度优先搜索算法完成对公共节点集的搜索分配,获取最优解列断面。仿真算例表明,所提方法既能在考虑节点间电气联系的情况下缩小原始的求解空间,避免化简过程中可行解的丢失,又能适应系统运行方式的变化,满足快速性与有效性要求。

关键词: 电力系统; 主动解列; Dijkstra 算法; 不平衡功率; 最优断面; 搜索; 解列

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.019

0 引言

随着“西电东送”、“南北互联”、“三华联网”等工程的展开,我国将形成特大型同步互联电力系统。在这种大背景下,当系统原有运行状态遭遇根本性破坏,且紧急控制措施不能使系统恢复稳定时^[1-4],为避免大面积停电事故的发生,系统将实施解列措施。

当前,系统解列主要分为被动解列与主动解列 2 个研究方向。被动解列是指基于离线仿真或运行经验所安装解列装置,根据判断相关整定值是否超限实施控制的措施。该控制手段缺乏全系统的动态信息,极易使解列后的子系统出现发电机出力与负荷之间极不平衡功率,进而产生切机、切负荷等操作,造成经济损失。而主动解列则是指根据故障信息与运行方式,选取合理的解列断面将系统分为若干个孤立子系统的控制措施。该解列策略能有效地消除机群之间的振荡,避免被动解列后孤岛中出现的极度不平衡功率^[5-10]。因此,主动解列是现在及未来解列控制策略研究的重要方向。

当系统实施主动解列时,如何快速地确定解列断面是解列控制重点研究方面之一。目前典型的断面搜索方法包括基于图论的方法^[4,7,11-12]和基于慢同调^[13-15]的方法等。采用图论的方法确定解列断面能将复杂的电力系统用带权的数学模型图表示,把解

列断面的选择问题抽象为带约束的目标函数的实现问题。文献[4]提出的有序二叉决策图(OBDD)法充分说明了图论方法的优越性,但化简后图模型节点数的限制约束了该方法在实际系统中的应用。文献[16]也基于图论方法对系统进行潮流追踪,无需对原图进行等值化简,但分区的可行性却有待验证。采用慢同调理论的搜索方法是将解列断面与系统弱连接进行合理等效,在小范围内搜索最优解列断面。文献[17]基于慢同调理论,利用深度优先搜索(DFS)算法寻找到了电网的脆弱断面。文献[14]提出了基于慢模式特征值的电力系统弱连接识别方法,该方法物理意义清晰,计算简洁,但系统潮流的变化可能会对机组慢同调特性产生影响,结果的精确性有待论证。

在现有的相关研究基础上,本文从节点电气联系理论出发,根据节点间耦合的强弱关系提出了一种基于 Dijkstra 算法的最优断面搜索方法。该方法将电力系统转化为拓扑图,基于 Dijkstra 算法求取节点之间的最小电抗累加和路径以表征两点间的电气联系强度,依据负荷节点与同调机群之间的电气联系紧密程度,对节点进行分类得到公共节点 PN(Public Node)集;然后采用宽度优先搜索(BFS)算法以解列后孤岛中不平衡功率 UP(Unbalanced Power)最小为目标函数对公共节点集进行搜索,从而得到最优解列断面。该方法将 Dijkstra 算法运用于电力系统中,根据节点间电气耦合强度对原始网络进行化简,降低了对所有节点搜索的复杂性,节省了计算时间,提高了解列断面的搜索速度,并且化简过程中考虑了节点间的电气联系,避免了单纯图论化简时可行解的丢失,增强了搜索结果的有效性与准确性。

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-12-05

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M552080);含交直流混合多级微电网的国家级兰州新区智能电网综合建设工程之微电网实验系统开发(5227221350BR)

Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (2014M552080) and the Experimental System Development of Microgrid for the Comprehensive Construction of Smart Grid Containing AC/DC Hybrid Multilevel Microgrid in Lanzhou New District(5227221350BR)

1 最优解列断面的数学特性

解列作为一种紧急控制手段,其目标是隔离异步机群、防止故障扩散、形成发电和负荷平衡的孤岛。目前,已有研究学者在该方面进行了深入研究,分析发现当系统在寻找最优断面进行解列时应该满足以下 2 个基本原则^[18]。

a. 孤岛内发电机同步运行的约束。

系统受到扰动产生机群失稳现象后,不同步运行状态的发电机应被分配在不同的孤岛中,具有相同摇摆情况的发电机应划分在同一发电机群中。

电力系统的拓扑结构可以被描述为由节点和边组成的集合 $G = \{V, E\}$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 其中 v_i 为节点, e_i 为边。当系统 G 受到扰动失去稳定被分为 t 个机群时,解列后孤岛内部的发电机应该满足:

$$\begin{cases} \bigcup_{i=1}^t V_i^G = V^G \\ V_i^G \cap V_j^G = \emptyset \quad \forall i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

其中, V^G 表示系统中所有发电机节点的集合; V_i^G 和 V_j^G 分别表示系统受扰分群后第 i 群和第 j 群机组中发电机节点的集合。式(1)说明失稳后不同的机群中不会出现相同的发电机组。

b. 孤岛内负荷与发电机之间不平衡功率的约束。

解列后孤岛内部的负荷与发电机之间的不平衡功率应尽可能小,否则因不平衡功率过大会造成大量切机、切负荷,严重时会出现故障蔓延,导致系统进一步崩溃。

$$\min \left| \sum_{i \in V_k} P_i \right| < \varepsilon \quad \forall V_k \in \{V_1, \dots, V_t\} \quad (2)$$

其中, V_k 表示第 k 个机群中所有节点的集合; P_i 表示节点 i 的注入功率,其中发电机节点为正功率,负荷节点为负功率; ε 为阈值,表示孤岛内的不平衡功率应尽可能小。

解列基本原则结构图如图 1 所示。

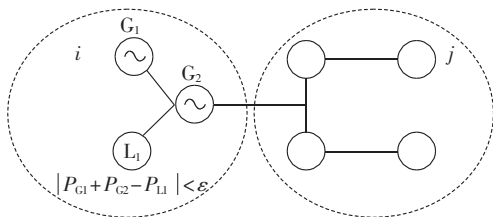


图 1 解列基本原则结构图

Fig.1 Structural diagram of basic splitting principle

2 基于 Dijkstra 算法的节点划分

Dijkstra 算法是图论中求解点与点之间最短路径的经典算法。该方法具有计算速度快、稳定性好、

工程实现能力强等优点,目前已在计算机网络、交通运输、通信工程等领域有着广泛的应用^[19-20]。本文针对大电网解列实际应用,采用 Dijkstra 算法求取两节点间最小电抗累加和路径以衡量电气联系的强弱程度,并在已知系统机组同调信息基础上,对负荷节点进行分类,缩小解列断面的预搜索空间。下面给出具体步骤。

a. 捕捉系统实际监测预设解列点处的联络线电气量,获取电网信息。

b. 假设系统 $G = \{V, E\}$ 的节点集合 V 中共有 n 个节点,其中包含 m 个发电机节点, $n-m$ 个非发电机节点(为方便分辨,统一称为负荷节点)。选取线路电抗作为权值^[21],构造赋权矩阵 $V'_{(n \times n)}$:

$$V' = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{n1} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3)$$

$$v_{ij} = \begin{cases} x_{ij} & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 相连} \\ +\infty & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 不相连} \\ 0 & i=j \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_{ij} 表示线路的电抗值。

c. 采用 Dijkstra 算法计算出任意两节点之间的最小电抗累加和路径 S ,以表征节点间电气联系的强弱程度^[22]。

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{n1} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (5)$$

其中, s_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的最小电抗累加和路径,反映了两点间具有最强电气联系的路径。

提取式(5)中 $n-m$ 个负荷节点到 m 个发电机节点之间的最小电抗累加和路径形成新的矩阵 S' 。

$$S' = \begin{bmatrix} s'_{11} & \cdots & s'_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ s'_{(n-m)1} & \cdots & s'_{(n-m)m} \end{bmatrix}_{(n-m) \times m} \quad (6)$$

其中, s'_{ij} 表示负荷节点 i 到发电机节点 j 之间的最小电抗累加和。

d. 根据机组同调信息,若系统 G 中有 t 个同调机群,则相应地需要将系统分解为 t 个孤立的子系统 ($t=1, 2, \dots$),计算每个负荷节点到不同机群的平均最小电抗累加和。

$$S_i^r = \frac{1}{t_r} \sum_{j=1}^t s'_{ij} \quad r=1, 2, \dots, t \quad (7)$$

其中, S_i^r 表示节点 i 到第 r 个机群的电气联系; t_r 表示第 r 个机群中发电机的数量; s'_{ij} 表示负荷节点 i 到第 r 个机群中每个发电机节点的电气联系。

此外,由式(1)与(2)可知,发电机位置和容量大小对计算结果的影响分别通过同调机群约束和孤岛

内不平衡功率约束进行表征。

e. 对负荷节点进行匹配, 辨识公共节点与一般节点 GN(General Node)。负荷节点 i 到第 r_1 和 r_2 个机群的距离差 $\gamma = |S_i^{r_1} - S_i^{r_2}|$, 若 $\gamma < \sigma$ (σ 为阈值), 表明负荷节点 i 到第 r_1 和 r_2 个机群的电气联系强弱程度接近, 可视为该节点所带负荷由 2 个机群共同供应, 定义这种类型的负荷节点为公共节点; 若 $\gamma > \sigma$, 则意味着负荷节点 i 由两机群中某一机群主要供应, 可视为该节点为一般节点。通过比较 γ 的正负可以将负荷节点归入其主要依赖的机群。当系统呈现为多个机群时, 则可进行两两比较, 按照两机群负荷节点的划分方法, 将负荷节点进行归类。通过大量的仿真实验分析, 一般情况下, 公共节点占总负荷节点数的 8%~20%。

3 基于最小有功不平衡的最优解列断面搜索策略

系统中的负荷节点由 2 个部分组成: 一部分是由某个机群主要供给的负荷节点, 即一般节点; 另一部分是由几个机群共同供给的负荷节点, 即公共节点。实践证明解列断面与公共节点间存在紧密联系, 若能将公共节点划分至合理的孤岛中, 则能得到最终解列断面。

系统实施解列控制后, 孤岛中负荷与发电机出力之间的不平衡功率应尽可能小, 保证解列后孤岛内较少的减载切机量。因此, 本节以子系统中不平衡功率最小为目标函数, 围绕公共节点采用 BFS 算法搜索最优解列断面, 主要步骤如下。

假设系统分为群 A 与群 B 2 群, 发电机节点 n_{Gi} 所带权值为 P_{Gi} , 负荷节点 n_{Li} 所带权值为 $-P_{Li}$; 由第一步(Dijkstra 算法)已确定属于群 A 的一般节点集为 V_A , 各点权值总和 $W_A = \sum_{i \in V_A} w_i$; 属于群 B 的一般节点集为 V_B , 各点权值总和 $W_B = \sum_{i \in V_B} w_i$; 公共节点集为 V_P 。

a. 将节点集 V_A 和 V_B 分别等值为 2 个聚合节点 N_A 和 N_B , 并计算与 N_A 和 N_B 分别直接相连的公共节点数目。

b. 将等值节点 N_A 和 N_B 作为 BFS 算法的根节点。

c. 将 V_P 中仅与 V_A 存在连通路径的节点划分至区域 A, 并更新 V_A 、聚合节点 N_A 和权值总和 W_A 。

d. 确定与 N_A 直接相连的公共节点集 V_{P-A} , 从中选择点 N_j ($N_j \in V_{P-A}$) 使得此时 V_A 与被选点 N_j 的权值总和 $W_{A\Sigma}$ 满足 $|W_{A\Sigma}| < |W_A|$ 且 $|W_{A\Sigma}| = \min(|W_A + w_{N_j}|)$ ($N_j \in V_{P-A}$), 即对该公共节点进行目标函数检查, 必须保证选入该点后区域 A 不平衡功率绝对值变小且减量最大; 若满足条件, 纳入 N_j , 更新区域 A 节点集 V_A 、聚合节点 N_A 、权值总和 W_A 及与 N_A 直接相连

的公共节点集 V_{P-A} 。

e. 重复步骤 d, 直至选取 V_{P-A} 中任一节点 N_j 后, V_A 与被选点 N_j 的权值总和 $W_{A\Sigma}$ 出现 $|W_{A\Sigma}| > |W_A|$, 此时停止搜索, 不纳入 N_j ; 已被选取在区域 A 中的节点构成了区域 A, 剩余节点构成了区域 B, V_A 与 V_B 间的割集即为解列断面。

通过以上步骤, 可完成对解列断面的搜索。根据文献[23], 该 BFS 算法时间复杂度为 $O(|V| + |E|)$, 穷举法的时间复杂度为 $O(V^2)$, 由此可见本文寻优算法的时间复杂度较穷举法有明显优势。尤其是应用于大系统时, 计算时间规模的增加仅为线性增长, 而非指数增长, 该算法的时间复杂度仍处于可控范围内。

综上所述, 本文获取解列断面的过程分 2 步进行, 首先采用 Dijkstra 算法基于节点间电气联系的紧密程度完成对多数负荷节点的划分, 并得到与不同机群存在相近电气联系的公共节点集, 缩小了预搜索空间, 为解列操作的实施赢得了宝贵时间; 采用 BFS 算法以解列后孤岛中不平衡功率最小为目标对公共节点集进行搜索, 得到最终解列断面。

4 算例分析

为验证本文所提出方法的有效性, 对 IEEE39 节点系统和 IEEE118 节点系统进行了仿真实验。仿真计算在电力系统综合分析程序(PSASP)和 MATLAB 中进行。仿真使用的计算机性能为 Intel(R) Core(TM) 2 Duo 2.97 GB 处理器, 4G 内存。

4.1 IEEE39 节点系统

IEEE39 节点系统的拓扑结构如图 2 所示, 其中黑圈代表发电机, 白圈代表负荷。该标准系统包括 10 台发电机, 39 条母线以及 46 条交流线。基准功率为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 基准电压为 345 kV。线路 28-29 上 1 s 时发生三相接地短路故障, 0.2 s 后清除故障。通过观察发电机功角可知系统出现 2 个同调机群, 其中 G_1 — G_8 、 G_{10} 为同调机群 1, 节点编号分别为 39、30—37; G_9 为同调机群 2, 节点编号为 38。

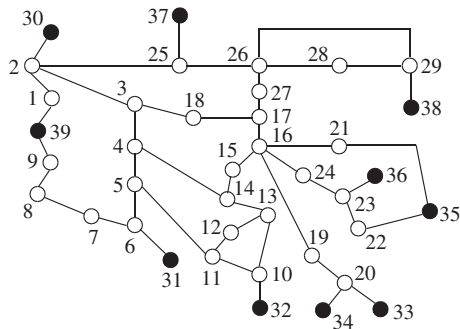


图 2 IEEE39 节点系统
Fig.2 IEEE39-bus system

基于系统的网络参数和潮流信息,以 Dijkstra 算法求取负荷节点到两机群的最小电抗累加和之差 γ ,结果如表 1 所示。

表 1 最小电抗累加和之差(IEEE 39 节点系统)
Table 1 Minimum reactance sum difference
(IEEE 39-bus system)

节点	γ	节点	γ	节点	γ
1	-0.056	11	-0.074	21	-0.090
2	-0.072	12	-0.131	22	-0.079
3	-0.065	13	-0.155	23	-0.082
4	-0.154	14	-0.070	24	-0.087
5	-0.154	15	-0.001	25	-0.074
6	-0.122	16	-0.074	26	0.017
7	-0.074	17	0.007	27	-0.043
8	-0.089	18	-0.001	28	0.166
9	-0.051	19	-0.082	29	0.291
10	-0.064	20	-0.085		

当阈值 σ 取 0.05 时,由表 1 可知,机群 1 包含节点 1—14、16、19—25,机群 2 包含节点 28、29。其中,公共负荷节点为 15、17、18、26、27。根据系统的运行状态与实际可解列策略进行分析,存在 2 种解列策略,如表 2 所示,表中子系统不平衡功率为标么值。

表 2 可行性解列策略不平衡功率
Table 2 Unbalanced power of feasible
splitting strategies

解列策略	公共节点划分	子系统不平衡功率
1	{15,17,18}∈机群 1	-0.795,0.893
	{26,27}∈机群 2	
2	{15,17,18,26,27}∈机群 1	3.405,-3.307

该算例的整体计算时间是 6 ms。系统选取策略 1 和 2 分别实施解列,发电机组的频率差变化 $\Delta\omega$ (标么值)如图 3 所示。可知实施不平衡功率较小的解列策略 1 后,系统更加稳定。

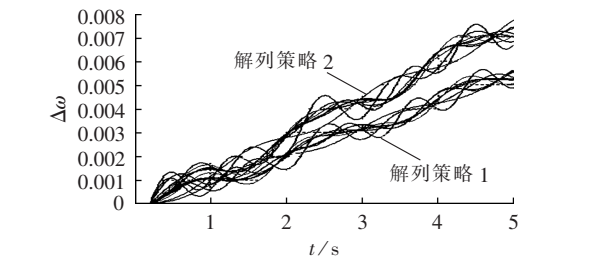


图 3 2 种解列策略实施后 $\Delta\omega$ 变化曲线
Fig.3 Variation curve of $\Delta\omega$ of units
after splitting for two strategies

4.2 IEEE118 节点系统

以图 4 所示的 IEEE 118 节点为例,该电网包括发电机节点 19 个,总发电量为 4374.9 MW,总有功负荷为 4242 MW。在线路 23—25 上发生三相短路接地故障,0.27 s 清除故障,观察发电机功角可知系统失稳为 2 群。其中,节点 10、12、25、26、31 为同调机群 1,节点 46、49、54、59、61、65、66、69、80、87、89、

100、103、111 为同调机群 2。

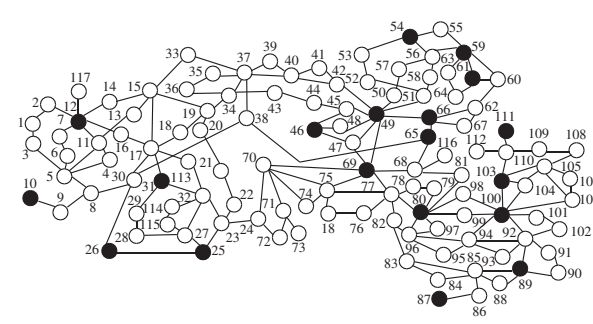


图 4 IEEE118 节点系统
Fig.4 IEEE 118-bus system

针对该运行状态下的系统模式,计算出节点到不同机群之间平均最小电抗累加和之差 ε ,如表 3 所示。当阈值 σ 取 0.05 时,对所有的节点进行分区,并计算出公共负荷节点包含 24、33、34、35、38、71、72、73。围绕公共节点进行搜索,选取其中 2 种可行解列策略进行分析,结果如表 4 所示。

通过比较孤岛内不平衡功率大小可知,相比于

表 3 最小电抗累加和之差(IEEE 118 节点系统)
Table 3 Minimum reactance sum difference
(IEEE118-bus system)

节点	γ	节点	γ	节点	γ
1	-1.090	39	0.504	81	1.750
2	-1.309	40	0.110	82	0.248
3	-1.309	41	1.309	83	1.896
4	-3.064	42	1.309	84	1.896
5	-1.390	43	0.263	85	1.896
6	-1.390	44	0.502	86	1.896
7	-1.089	45	-0.263	88	1.896
8	-5.108	47	0.400	90	1.689
9	-5.120	48	0.188	91	1.689
11	-3.064	50	0.783	92	1.689
13	-3.064	51	0.110	93	1.689
14	1.309	52	0.839	94	1.689
15	-1.309	53	0.110	95	1.924
16	-0.568	55	0.783	96	1.924
17	-1.094	56	0.783	97	1.750
18	-1.094	57	0.110	98	1.697
19	-1.390	58	0.783	99	1.786
20	-1.390	60	0.785	101	1.697
21	-0.502	62	0.457	102	1.697
22	-0.502	63	0.783	104	1.697
23	-0.468	64	3.513	105	1.753
24	-0.040	67	0.457	106	1.753
27	-0.413	68	0.333	107	1.857
28	1.878	70	0.437	108	1.753
29	-0.413	71	0.040	109	1.939
30	-4.855	72	0.240	110	1.939
32	-0.951	73	0.340	112	1.939
33	-0.004	74	0.038	113	-0.468
34	-5.020	75	0.040	114	-0.951
35	-0.006	76	0.218	115	-0.413
36	0.502	77	0.218	116	0.333
37	0.074	78	1.750	117	-1.090
38	0.090	79	1.750	118	0.041

表 4 可行性解列策略不平衡功率
Table 4 Unbalanced power of feasible
splitting strategies

解列策略	公共节点划分	子系统不平衡 功率/MW
1	{24}∈机群 1 {33,34,35,38,71,72,73}∈机群 2	60.58, -60.39
2	{24,34}∈机群 1 {33,35,38,71,72,73}∈机群 2	1.79, -1.81

解列策略 1 而言,解列策略 2 在实施解列后孤岛更易恢复稳定,同时也避免了出现因连锁故障产生的系统崩溃。解列后的子系统见图 5。本文方法所得最终解列策略与文献[16]中所述基于潮流追踪的实时断面搜索方法所得结果一致,验证了本文所提方法的有效性。同时该方法的整体搜索时间为 10 ms,在计算速度方面更具有优越性。

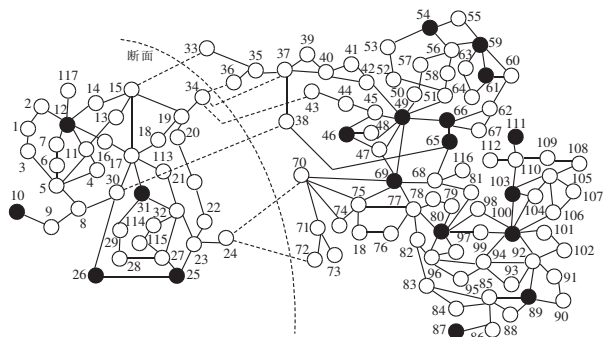


图 5 解列策略 2 实施后的 2 个子系统

Fig.5 Two sub-systems after splitting for strategy 2

5 结论

本文以节点间的电气联系为理论基础,遵循解列过程应满足的原则,提出了基于 Dijkstra 算法的最优解列断面快速搜索方法。

a. 采用 Dijkstra 算法简化了系统断面的预搜索空间,且考虑了节点间的电气联系,避免了单纯网络化简中可行解的丢失。

b. 基于 Dijkstra 算法得到节点之间的最小电抗累加和路径,并依据电气联系进行节点分类的计算步骤仅依赖于系统的网络拓扑结构,所需原始数据少,过程简单,能对系统空间进行快速搜索。

c. 以解列后孤岛中不平衡功率最小为目标函数搜索最优解列断面的过程满足了解列控制的基本原则,并能适应机组运行方式、负荷的实时变化,满足调度操作需求,具有良好的适应性。

d. 基于 IEEE 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统的实验仿真结果验证了该方法的有效性与快速性。

参考文献:

[1] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北京:中国电力出版社,2006:34-76.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 曹一家,王光增. 电力系统复杂性及其相关问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):5-10.
CAO Yijia,WANG Guangzeng. Research on power system complexity and related topics[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):5-10.

[9] 曹一家,张宇栋,包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):7-11.
CAO Yijia,ZHANG Yudong,BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):7-11.

[10] 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.

[11] SUN Kai,ZHENG Dazhong,LU Qiang. A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(1):389-399.

[12] SEN A,GHOSH P,VITTAL V,et al. A new min-cut problem with application to electric power network partitioning[J]. European Transactions on Electrical Power,2009(19):778-797.

[13] WANG Xiaoming,VITTAL V. System islanding using minimal cutsets with minimum net flow[C]//Proceeding of IEEE Power Systems Conference and Exposition. New York,USA:IEEE

- Power & Energy Society, 2004; 379-384.
- [14] 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.
- [15] 宋洪磊,吴俊勇,冀鲁豫. 基于慢同调理论和希尔伯特-黄变换的发电机在线同调识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 70-76.
- SONG Honglei, WU Junyong, JI Luyu. Online identification of coherent generators based on slow coherency theory and Hilbert-Huang transform [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 70-76.
- [16] 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.
- [17] YANG Bo, VIJAY V, HEYDT G T. Slow coherency-based controll-edislanding-a demonstration of the approach on the August 14, 2003 blackout scenario[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1840-1847.
- [18] YOU Haibo, VIJAY V, WANG Xiaoming. Slow coherency-based islanding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 483-491.
- [19] 李元臣,刘维群. 基于Dijkstra算法的网络最短路径分析[J]. 微计算机应用, 2004, 25(3): 295-298.
- LI Yuanchen, LIU Weiqun. Analysis of the shortest route in network on Dijkstra algorithm [J]. Microcomputer Applications, 2004, 25(3): 295-298.
- [20] 张福浩,刘纪平,李青元. 基于Dijkstra算法的一种最短路径优化算法[J]. 遥感信息, 2004, 32(2): 38-41.
- ZHANG Fuhao, LIU Jiping, LI Qingyuan. A new way of network analysis based on Dijkstra [J]. Remote Sensing Information, 2004, 32(2): 38-41.
- [21] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 199-201.
- [22] 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.
- [23] 陈立家,周建国,江昊. QoS多约束优化路径选择算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(4): 900-901.
- CHEN Lijia, ZHOU Jianguo, JIANG Hao. Multi-constrained optimal path selection of QoS[J]. Journal of Computer Applications, 2005, 25(4): 900-901.

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);

唐飞(1982—),男,湖北武汉人,博士后,通讯作者,研究方向为电力系统暂态稳定、电力系统紧急控制策略、智能电网通信技术等(E-mail: tangfei@whu.edu.cn);

刘涤尘(1953—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士后,主要从事电力系统稳定与控制、电力电子技术应用等方面的研究工作;

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。

Quick search of optimal splitting surface based on Dijkstra algorithm

WANG Yifei, TANG Fei, LIU Dichen, LIAO Qingfen, YANG Jian, WANG Songjun

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

Abstract: A method of optimal splitting surface search is proposed to fast determine the rational splitting location, which applies Dijkstra algorithm to obtain the inter-node path with the minimum accumulative reactance. A node is defined as a public or normal node according to its electrical connection with other nodes. In order to reduce the search space, the connection between the splitting surface and the public node is used to convert the splitting surface search into the public node management. With the minimum unbalanced active power of the sub-system after splitting as the objective function, the public node set is searched and distributed by the breadth-first search algorithm to get the optimal splitting surface. Case simulation shows that, the proposed method has smaller original search space due to the consideration of electrical connection between nodes, avoiding the loss of feasible solution during simplification, and adapts to the change of system operating mode, satisfying the requirement of rapidity and effectiveness.

Key words: electric power systems; controlled islanding; Dijkstra algorithm; unbalanced power; optimal splitting surface; search; splitting