

DOI: 10.7667/PSPC161013

基于前 K 最短路径的电力系统低频振荡源定位方法

陈月辉¹, 张文朝², 徐遐龄³, 施秀萍², 盛四清¹, 王吉利⁴

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 南京南瑞集团北京监控技术中心, 北京 102200;
3. 华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077; 4. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了快速定位低频振荡源并及时采取相应措施抑制振荡的扩散, 提出一种基于电力网络拓扑的振荡源定位方法。利用局部振荡及区间振荡模式下振荡源所在区域发出能量的特点, 结合图论思想, 在割集能量的基础上, 提出最大振荡能量流割集的概念, 将振荡源定位问题转化为最大振荡能量流割集的搜索问题。根据振荡能量流传播转移的特点, 运用前 K 最短路径收缩搜索空间, 利用往返替换算法找出所有割集, 将振荡源所在范围限制在最大振荡能量流割集的内侧。利用蒙西电网进行仿真验证, 结果表明, 该方法能够快速有效地定位振荡源, 且同时适用于局部及区间两种振荡模式, 有一定的实用价值。

关键词: 低频振荡; 振荡源定位; 图论; 前 K 最短路径; 最大振荡能量流割集

Locating method of low frequency oscillation source based on K shortest paths

CHEN Yuehui¹, ZHANG Wenchao², XU Xialing³, SHI Xiuping², SHENG Siqing¹, WANG Jili⁴

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. NARI Group Corporation Beijing Monitoring Technology Center, Beijing 102200, China; 3. Central China Electric Power Dispatching and Communication Centre, Wuhan 430077, China; 4. Northwest China Grid Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to locate the low frequency oscillation source quickly and take appropriate measures to suppress the oscillation, a locating method of low frequency oscillation source based on the power network topology is proposed. Energy production characteristics of the region of oscillation source under the local oscillation mode and inter-area oscillation mode are analyzed. Then, based on graph theory and cut-set oscillation energy, the concept of the cut-set of maximum oscillation energy flow is put forward. The oscillation source location is transformed into the search of the cut-set of maximum oscillation energy flow. According to the transmission characteristics of the oscillation energy flow, using K shortest paths to limit the search scope, and using travel replacing algorithm to find all cut-sets, then the oscillation source is limited to the inside of the cut-set of maximum oscillation energy flow. The West Inner Mongolia Power Grid is used to verify the correctness of the locating method, and the method is applicable to both local and inter-area oscillation mode. Therefore, this method has some practical value.

Key words: low frequency oscillation; oscillation source location; graph theory; K shortest paths; cut-set of maximum oscillation energy flow

0 引言

随着互联电网规模的不断扩大, 低频振荡问题逐渐凸显, 动态稳定性问题逐渐成为制约电网主网安全及输电能力的重要因素。低频振荡发生时, 及时定位低频振荡源并采取相应措施, 对于保障电网的安全稳定运行意义重大。对于局部振荡, 振荡源明确, 应及时发现振荡源并切除相关机组消除振荡; 对于区间振荡, 参与机组较多, 需要快速确定振荡区域,

切除区域内部分机组以降低区间联络线功率并抑制振荡扩散^[1-3]。

针对低频振荡源定位问题, 国内外学者已经做了一系列研究^[4-9]。文献[4]采用 TLS-ESPRIT 法得到主导振荡模式, 利用最小二乘法计算该模式下发电机阻尼转矩系数, 从而实现振荡源定位; 文献[5]提出一种通过比较测量点波形相似度来分析扰动行波传播延时时间进而实现振荡源定位的方法。文献[6-7]利用振荡能量判断元件阻尼特性, 指出产生能

量的元件为系统提供负阻尼，并以此提出了一种根据网络中的振荡能量流定位电网振荡源的方法，在此基础上，文献[8]定义了割集能量，对电网事先配置分层分区的割集的并判断能量的流出和流入以实现振荡源的有效定位。

目前对振荡源定位的研究主要针对局部振荡模式，对于互联系统存在的区间振荡模式的适应性还有所欠缺。为此，本文首先分析低频振荡发生时的能量流动特点，结合电力网络拓扑的结构，考虑实际工程中网调信息 PMU 数据机组信息不全，提出一种只利用电网线路 PMU 信息的振荡源定位方法。这种方法不仅可以对局部振荡源进行定位，还可以实现区间振荡模式下的区域定位。

1 最大振荡能量流割集

1.1 振荡能量流

电力系统低频振荡发生时，网络中会有振荡能量的流动。元件的能量消耗与阻尼转矩具有一致性，负阻尼机组及其他元件，以及强迫振荡扰动源所在元件都是产生能量的元件，低频振荡发生时，能量就会从能量源流向电网中消耗能量的正阻尼元件，从而形成振荡能量流^[7]。

根据能量函数构造方法^[10-11]，支路 L_{ij} 自节点 i 向节点 j 传输的振荡能量流为^[7]

$$W_{ij} = \int (\Delta P_{ij} d\Delta\theta_i + \Delta Q_{ij} d(\Delta \ln U_i)) \quad (1)$$

式中： P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 L_{ij} 的有功功率和无功功率； U_i 和 θ_i 分别为母线 i 的电压幅值和相角； $W_{ij} > 0$ 时表示能量从 i 流向 j 。

如果忽略网络中传输的无功功率和节点电压的变化，则振荡能量流可近似为

$$W_{ij} \approx \int \Delta P_{ij} d\Delta\theta_i = \int \Delta P_{ij} 2\pi \Delta f_i dt \quad (2)$$

式中， f_i 为节点 i 的频率。

利用式(2)，基于线路的 PMU 数据，可以求得各条线路的振荡能量流，而定位振荡源的关键就是找出发出振荡能量流最大的区域。为此，需要把电网转化成拓扑图，定义最大振荡能量流割集。

1.2 最大振荡能量流割集

最小割集是能将 1 个网络分割成 2 个内部连通网络的最小支路集合，通过判断割集中支路的振荡能量流动方向，即可判断振荡源位于割集支路的哪一侧。如图 1 所示，虚线框内为子网 1，支路 ab, ac, fe 构成了把子网 1 与网络其他部分分开的最小割集 Ω 。显然，子网是与最小割集一一对应的。

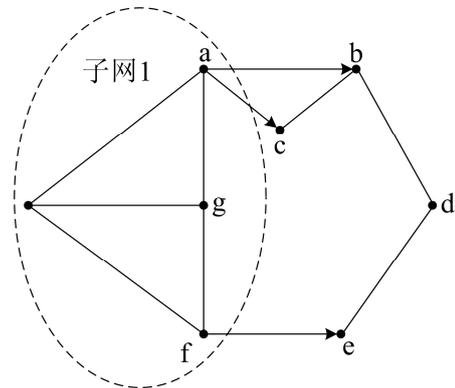


图 1 振荡能量流割集示意图

Fig. 1 Oscillating energy flow cut set

为了方便分析，定义流出子网的振荡能量为正，流入子网的振荡能量为负。当子网 1 中有振荡源时就会有振荡能量流出，最小割集 Ω_1 所含的支路上的振荡能量流之和即为子网 1 发出的能量，称为割集能量^[8]，记作 W 。举例来说，对于子网 1，其对应的割集 $\Omega_1 = \{ab, ac, fe\}$ ，割集能量 $W_1 = P_{ab} + P_{ac} + P_{fe}$ 。本文将割集能量最大的最小割集定义为最大振荡能量流割集，记作 Ω_{max} ，其割集能量记作 W_{max} 。

以下分别针对局部振荡和区间振荡，分析 Ω_{max} 与振荡源的关系。

对于局部振荡模式，作为振荡源的某台机组或某几台机组位于某个子网(包含这些机组的最小子网)中，则这个子网中会有大量振荡能量流出，消耗在网络其余部分的正阻尼元件中，并且这个子网对应的割集能量是所有割集能量中最大的。低频振荡发生时，搜索到最大振荡能量流割集即可找到对应的局部振荡源，进而在该线切除振荡源。

对于区间振荡模式，呈负阻尼的区域内将有大量能量产生，并通过区域间联络线流出，区域间联络线对应的割集能量就是此时所有割集能量中最大的。此时，搜索到的最大振荡能量流割集对应的是一个区域，可通过降低出力或切除机组来抑制振荡。

综上所述，电力系统低频振荡发生时，对最大振荡能量流割集 Ω_{max} 的搜索可实现两种振荡模式下的振荡源定位，振荡源就位于 Ω_{max} 的内侧，也即位于流出 W_{max} 的子网中。因此，振荡源定位的关键就是从众多割集中找出 Ω_{max} 。由于电网规模庞大，因此其最小割集的数量极其巨大，为了能在低频振荡发生后尽快定位振荡源，需要缩小 Ω_{max} 的搜索空间。

为此，我们分析了大量低频振荡案例，得到如下规律：

1) 具有最大振荡能量流的线路 L_{max} ，一般在最

大振荡能量流割集内, 即 $L_{\max} \in \Omega_{\max}$; 并且如果 $L_{\max} \notin \Omega_{\max}$, 则 L_{\max} 在距 Ω_{\max} 电气距离较近的范围。

2) 构成一个割集的线路一般都是电气距离较近的。

3) 只要 K 值足够大, 则 L_{\max} 的两端节点间的前 K 最短路径中肯定包含 Ω_{\max} 内的所有支路。

基于以上规律, 前 K 最短路径可以用来收缩 Ω_{\max} 的搜索空间。

2 图论相关概念

2.1 图与邻接矩阵

在研究电力系统时, 不考虑支路性质, 可用图 (Graph) 来描述其电网结构及其连接性质, 记作 $G(V, E)$, 其中 V 表示顶点集合, E 表示边的集合。若 G 中的每一条边 e_i 都对应一个值 w_i , 则图 G 为加权图。图 1 即为抽象成图后的 8 节点系统。

对于具有 n 个节点的加权图 $G(V, E)$, 其加权邻接矩阵 A 定义^[12]为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j \\ w_{ij}, & i \neq j \text{ 且 } (v_i, v_j) \in E \\ \infty, & i \neq j \text{ 且 } (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (3)$$

式中, w_{ij} 为节点 v_i, v_j 构成的边上的权值, 若两节点 v_i, v_j 之间没有支路则权值取 ∞ , 由此得到的矩阵为 n 阶方阵。

2.2 前 K 最短路径

从源点 v_i 出发, 经过若干支路到达目的点 v_j , 且其中的支路和节点均不重复出现, 则经过的这些边就是 v_i 和 v_j 之间的一条路径。对于本文, 各支路权值取线路电抗值, 则一条路径 $l = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_i\}$ 的长度即为路径 l 中所有线路的电抗值之和。前 K 最短路径, 即给定源点 v_i 及目的点 v_j 之间的前 K 条长度最短的路径。

举例来说, 对于图 1 所示系统, 假设各支路电抗均为 0.1, 以节点 a 为源点, b 为目的点, 若确定了 $K=4$, 则求前 4 条最短路径得表 1。由表 1 可知, 这 4 条路径包含的线路组成的线路集 $Lines = \{ab, ac, cb, ag, gf, fe, ed, db, ah, hf\}$ 中共有 10 条线路。这 10 条线路任意组合, 可得到许多割集, 这些割集组成割集集合 Φ , 其中就有子网 1 与外部网络间的最小割集 $\Omega_1 = \{ab, ac, fe\}$ 。如果 Ω_1 的割集能量是 Φ 中割集能量最小的割集, 即 $\Omega_{\max} = \Omega_1$, 则振荡源就在子网 1 内。

表 1 节点 a 到节点 b 的前 4 最短路径

Table 1 The 4 shortest path

路径节点标号	路径长度
a-b	0.1
a-c-b	0.2
a-g-f-e-d-b	0.5
a-h-f-e-d-b	0.5

2.3 连通性判断

由于本文振荡源定位并不依赖于事先配置的割集, 因此需要实时扫描割集。其中最常见的工作就是找出 n 条支路能构成的所有割集。因为从 n 条支路中挑出任意数量的支路, 都能够成割集, 所以需要 $2^n - 1$ 种线路组合进行割集判定。

本文采用往返替换算法来判断连通性, 进而判定这几条支路是否构成割集。往返替换算法来自文献[13], 采用节点标记的思想, 通过 2 次扫描和更新标号, 快速实现连通性判定。对于支路数为 M 的网络, 算法所需的存储空间为 $O(M)$, 效率为 $O(M^2)$, 逻辑运算为 $O(M^2)$, 且算法中仅含比较及赋值等简单计算。

3 基于前 K 最短路径的振荡源定位方法

3.1 前 K 最短路径的求法

前 K 最短路径是最短路径搜索问题的延伸, 其算法有很多^[14-17]。文献[17]提出的算法为本文搜索方法的基础, 相比于其他方法, 即易于编程实现, 又具有较好的时间及空间复杂度。求解源点 v_s 到 v_t 的前 K 最短路径算法具体步骤为

1) 首先对每个顶点 v_i 赋予 K 个标号, 每个标号对应源点到该顶点的第 k 短路径。每个标号对应 4 个变量为 $lable[i]_k, weight[i]_k, pre[i]_k, ks[i]_k$, 其中 $lable[i]_k$ 记录该顶点第 k 短路径标号是 0——临时标号还是 1——永久标号, $weight[i]_k$ 记录源点到该顶点的第 k 短路径的长度值, $pre[i]_k$ 记录源点到该顶点第 k 短路径的前一顶点编号, $ks[i]_k$ 记录源点到该顶点第 k 短路径由前一顶点的第 $ks[i]_k$ 短路径产生。

2) 初始化 v_s 的 4 组变量为 $\{1, 1, \dots, 1\}, \{0, 0, \dots, 0\}, \{0, 0, \dots, 0\}, \{0, 0, \dots, 0\}$ 。顶点 $v_i (i \neq s)$ 初始化为 $\{0, 0, \dots, 0\}, \{\max, \max, \dots, \max\}, \{0, 0, \dots, 0\}, \{0, 0, \dots, 0\}$ 。对所有与 v_s 相连节点的对应变量赋值: $weight[i]_1 = w_{si}, ks[i]_1 = 1$ 。max 表示置极大值, w_{si} 为边 si 的权值。

3) 若所有 $weight[t]_k$ 均为 1 或没有可选临时标

号, 则转 6) 否则转 4)。

4) 从所有临时标号节点中, 选择 $weight[i]_k$ 最小的存入临时变量 \min 中, 对应源点到 v_m 的 p 短路径。若 $\min \geq \max$, 转 6)。

5) 将对源点到 v_m 的第 p 短路径的标号置为永久标号。对于所有与 v_m 直接相连的顶点 v_n , 从其对应的第 p 短路径顺序搜寻, 若不存在 $weight[n]_k > \min + w_{mn}$ 则转 3), 否则依次更新其除 $lable[i]_k$ 外的 3 个变量, 每个变量从第 p 短路径对应值开始, 依次后移, 即 $weight[n]_{k+1} = weight[n]_k$ 及 $pre[i]_{k+1} = pre[i]_k$, $ks[i]_{k+1} = ks[i]_k$ ($p \leq k \leq K-1$), 并且令 $weight[n]_p = \min + w_{mn}$, $pre[i]_p = m$, $ks[i]_p = n$, 转 3)。

6) 若 $lable[t]_k$ ($1 \leq k \leq K$) 均为 1, 即 v_i 标号均为永久标号, 则前 K 短路径计算结束。从 v_i 开始对标号进行回溯, 即可得到前 K 短路径。

此算法推广了 Dijkstra 的顶点标号^[18]设置方法, 采用多重标号法, 执行过程中, 每一次从所有节点临时标号中选择路径长度最短的标号置为永久标号, 然后仿照 Dijkstra 算法修正与该节点直接相连的各节点的临时标号, 不断重复以上过程, 直到节点的所有路径标号均为永久标号, 最后得到源点到目的点的前 K 短路径。

3.2 K 值的选取

在 1.2 节中已说明, 只要 K 值足够大, 则 L_{\max} 的两端节点间的前 K 短路径中肯定包含 Ω_{\max} 内的所有支路。在用前 K 短路径收缩最大振荡能量流割集的搜索空间时, K 值的选取至关重要。若 K 值选取过小会导致搜索空间收缩的太小, 出现漏选现象而得不到真正的 Ω_{\max} ; 若 K 值选取过大, 则搜索空间过大, 延长了搜索定位的时间。

对于 K 值的选取, 本文采用校正经验法。先用经验法确定 K 值, 搜得 Ω_{\max} 之后再根据搜索结果校正 K 值, 具体说明如下。

1) 经验法确定 K 值。目前我国高电压等级网络分层分区划分明显, 各省间输电通道简单分明, 在不考虑电磁环网情况下, 可针对研究的具体区域对 K 取经验值。根据我国电网结构来看, 取 $K=10$ 即可包含最大振荡能量流割集中的所有线路, 对于网架结构简单的区域, 取 $K=5$ 以缩短耗时, 提高搜索效率。

2) 校正 K 值。按第 1) 步确定的 K 值求得前 K 条短路径和 Ω_{\max} , 如果 Ω_{\max} 被前 $K-1$ 条路径所包含, 则说明 K 无需加大, 否则, 需要加大 K 值重新计算 Ω_{\max} 。

3.3 振荡源定位方法

基于以上讨论, 当低频振荡发生后, 我们可以按以下步骤定位振荡源:

1) 将电网中节点间的双回线路合并为一条支路, 并进行支路电抗等值, 根据实际电网的网络拓扑结构, 以电网中各支路电抗为权值, 按公式(4)建立电网的加权邻接矩阵 A 。

2) 用经验法确定 K 值, 并利用公式(3)计算各支路上的振荡能量流, 找出最大振荡能量流所在的线路 L_{\max} , L_{\max} 上的振荡能量是由节点 a 流向节点 b 的。

3) 用 2.1 节介绍的基于多重标号法的前 K 短路径算法求出节点 a 到节点 b 的前 K 短路径, 并得到路径线路集 $Lines$ 。

4) 从 $Lines$ 里取出任意条线路, 利用往返替换算法判断其是否构成最小割集, 是则求其割集能量, 如此遍历找出 Ω_{\max} 。

5) 根据求得的前 K 短路径和 Ω_{\max} , 判断是否需要校正 K 值, 是则将 K 值加 2 后重做步骤 2)~5)。

6) 根据求得的 Ω_{\max} 定位振荡源。

4 算例验证

为验证本方法的适用性, 采用 PSD-BPA 软件^[19-20], 以蒙西电网为例对局部振荡模式及区间振荡模式分别进行仿真验证。

蒙西电网^[21-22]局部地理接线图如图 2 所示, 将其转化得到的简化拓扑图如图 3 所示, 图中共有 85 个节点、102 条线路。网络简化后可得到加权邻接矩阵 A , 经验法确定 $K=5$, 利用式(3)计算 10~15 s 内各线路上的振荡能量流, 得到 L_{\max} , 即可快速搜索得到最大振荡能量流割集, 实现振荡源定位。

(1) 算例 1: 宁格尔地区局部振荡模式

宁格尔地区的局部地理接线图如图 4 所示。退出部分机组 PSS, 使得宁格尔地区处于局部弱阻尼运行状况, 设置断线扰动激发宁格尔地区的局部振荡模式, 仿真得到振荡频率为 0.8181 Hz, 阻尼比 0.0089。

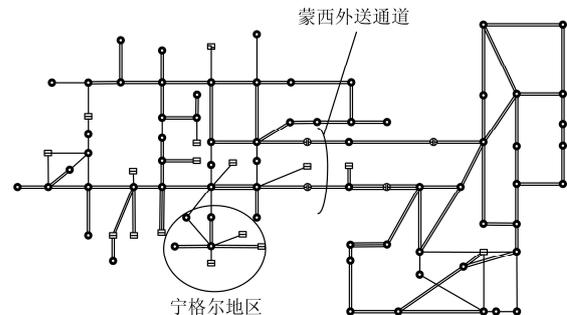


图 2 蒙西电网局部地理接线图

Fig. 2 Geographical wiring diagram of part Mengxi grid

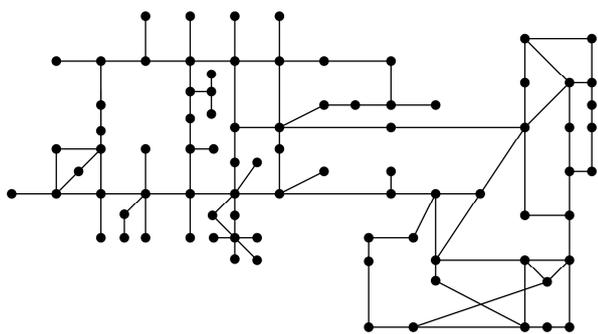


图3 蒙西电网局部的简化拓扑图

Fig. 3 Simplified topology of part Mengxi grid

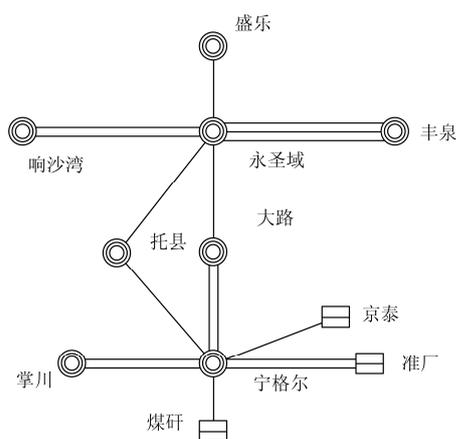


图4 宁格尔局部地区地理接线图

Fig. 4 Geographical wiring diagram of part Ningel area

启动搜索程序, 振荡能量最大的前 10 条线路如表 2 所示, L_{\max} 为宁格至托县。前 5 最短路径如表 3 所示, 路径线路集 $Lines = \{\text{宁格-托县, 宁格-大路, 大路-永圣, 永圣-托县}\}$, $\Omega_{\max} = \{\text{大路-永圣, 宁格-托县}\}$ 。由于 Ω_{\max} 被前 2 条路径包含, 故不需校正 K 值。此 Ω_{\max} 即宁格尔地区与外界电网相连的最小割集, 故搜索结果与仿真设置一致。

表 2 振荡能量计算结果

Table 2 Oscillation energy calculation results

线路	振荡能量
宁格-托县	329.9533
托县-永圣	212.8225
准厂-宁格	211.7172
煤研-宁格	96.3813
永圣-响沙	87.7992
丰泉-万全	83.6087
永圣-丰泉	78.6845
武川-春坤	64.1432
响沙-高新	53.5653
京泰-宁格	45.6903

表 3 前 5 最短路径结果

Table 3 The 5 shortest path

最短路径排序	路径
第 1	宁格-托县
第 2	宁格-大路-永圣-托县
第 3	无其他路径

(2) 算例 2: 蒙西地区与外界电网的区间振荡模式退出蒙西地区部分机组 PSS, 设置断线扰动激发蒙西地区与外界电网的区间振荡模式。振荡能量最大的前 10 条线路如表 4 所示, L_{\max} 为汗海-沽源。搜索从汗海至沽源的前 5 最短路径如表 5 所示, $\Omega_{\max} = \{\text{汗海-沽源, 丰泉-万全}\}$, 由于 Ω_{\max} 被前 2 条路径包含, 故不需校正 K 值。此 Ω_{\max} 即蒙西外送通道, 振荡模式为互联系统区域间振荡模式, 搜索结果与仿真设置一致。

表 4 振荡能量计算结果

Table 4 Oscillation energy calculation results

线路	振荡能量
汗海-沽源	50.5813
丰泉-万全	40.2817
永圣-丰泉	32.234
响沙-永圣	20.2629
春坤-武川	19.926
旗下-汗海	18.4328
察右-汗海	17.2674
武川-察右	15.6758
包北-春坤	11.1795
高新-响沙	10.7366

表 5 前 5 最短路径结果

Table 5 The 5 shortest path

最短路径排序	路径
第 1	汗海-沽源
第 2	汗海-集东-丰泉-万全-顺义-北京东-太平-沽源
第 3	汗海-集东-丰泉-万全-顺义-通州-北京东-太平-沽源
第 4	汗海-旗下-盛乐-永圣-丰泉-万全-顺义-北京东-太平-沽源
第 5	汗海-察右-武川-旗下-盛乐-永圣-丰泉-万全-顺义-北京东-太平-沽源

5 结语

本文根据低频振荡动态过程中的能量特点, 结合电网拓扑结构, 利用图论相关知识, 将低频振荡源定位问题转化为最大振荡能量流割集的搜索问题, 提出了基于前 K 最短路径的低频振荡源定位方法, 并通过仿真验证了该方法的正确性和实用性。

本方法仅使用网络中的线路实时信息, 解决了

区域电网机组实时信息缺少的问题;利用图论方法收缩搜索空间,提高了扰动源定位效率;同时既适用于局部振荡模式又适用于互联系统区间振荡模式的低频振荡源定位问题,实现了振荡源的准确快速定位,工程实用性较强。

参考文献

[1] 郭权利. 电力系统低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 114-119.
GUO Quanli. Low frequency oscillation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 114-119.

[2] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.
ZHAO Hongsheng, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.

[3] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等. 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 18-22.
XIANG Li, BAO Yanhong, GENG Tianxiang, et al. Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 18-22.

[4] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 98-103.
GENG Tianxiang, ZHANG Zhujing, XIANG Li, et al. A locating and splitting scheme for disturbance source of forced power oscillation based on the propagation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 98-103.

[5] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 78-83.
DONG Qing, LIANG Jing, YAN Xiangwu, et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.

[6] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位 (一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27.
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location using

oscillation energy, part one: mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.

[7] 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 等. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5.
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location using oscillation energy, part one: mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5.

[8] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS: part one method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.

[9] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84-91.
LI Yanghai, HUANG Ying, LIU Ju, et al. Power system oscillation source location based on damping torque analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 84-91.

[10] MOON Y H, CHO B H, LEE Y H, et al. Energy conservation law and its application for the direct energy method of power system stability[C] // Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, New York, USA, 1999, 1: 695-700.

[11] MIN Yong, CHEN Lei. A transient energy function for power systems including the induction motor model[J]. Science in China (Technological Sciences), 2007, 50(5): 575-584.

[12] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[13] 黄家栋, 罗伟强, 赵永强, 等. 两种新的电网连通性分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 16-18, 50.
HUANG Jiadong, LUO Weiqiang, ZHAO Yongqiang, et al. Two new high-speed algorithms for electrical network connectivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 16-18, 50.

[14] 柴登峰, 张登荣. 前 N 条最短路径问题的算法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 531-534.
CHAI Dengfeng, ZHANG Dengrong. Algorithm and its application to N shortest paths problem[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2002, 36(5):

- 531-534.
- [15] 李成江. 新的 k 最短路算法[J]. 山东大学学报(理学版), 2006, 41(4): 40-43.
LI Chengjiang. A new algorithm to find the k shortest paths[J]. Journal of Shandong University (Science Edition), 2006, 41(4): 40-43.
- [16] 高松, 陆锋, 段滢滢. 一种基于双向搜索的 K 则最优路径算法[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2008, 33(4): 418-421.
GAO Song, LU Feng, DUAN Yingying. A K th shortest path algorithm implemented with bi-directional search[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information and Science), 2008, 33(4): 418-421.
- [17] 戴树贵, 陈文兰. 一个求解 k 短路径实用算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(36): 63-65
DAI Shugui, CHEN Wenlan. A practical algorithm for the k shortest-path problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(36): 63-65.
- [18] 顾雪平, 王大江, 李少岩, 等. 电力系统扩展黑启动方案的后效性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 238-246.
GU Xueping, WANG Dajiang, LI Shaoyan, et al. Investigation on after effect of power system extended black-start schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 238-246.
- [19] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 MATLAB 联合建模与仿真方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 383-388.
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu, et al. A PSD-BPA and MATLAB joint modeling and simulation method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 383-388.
- [20] 顾雪平, 王大江, 梁海平, 等. 电力系统扩展黑启动方案动态综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 44-52.
GU Xueping, WANG Dajiang, LIANG Haiping, et al. Dynamic comprehensive assessment of power system extended black-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 44-52.
- [21] 王磊, 王秋莎, 吴丽红, 等. 基于主成分分析与信息熵的电能质量综合评估[J]. 陕西电力, 2015, 43(8): 55-58.
WANG Lei, WANG Qiusha, WU Lihong, et al. Power quality synthetic evaluation based on principal component analysis and information entropy[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(8): 55-58.
- [22] 黄银华, 李常春, 罗方旋, 等. 大规模风电接入对福建电网调峰的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 96-100.
HUANG Yinhua, LI Changchun, LUO Fangxuan, et al. Impact of large-scale wind farm connected with Fujian power grid on peak load regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 96-100.

收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-08-04

作者简介:

陈月辉(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统低频振荡的扰动源定位技术; E-mail: ch_yh5@163.com

张文朝(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究工作。E-mail: zhangwenchao@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)