

基于电气耦合路径分析的割支路和割节点辨识算法

段献忠, 杨雄平, 石东源

(华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北省 武汉市 430074)

Algorithm for Identification of Cut Edges and Cut Vertices Based on Analysis of Electric Interaction Paths

DUAN Xian-zhong, YANG Xiong-ping, SHI Dong-yuan

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The breaking of cut edges and cut vertices will lead disconnected sub-graphs in a connected power network. These edges and vertices may stand for the weak places or some optimization partition and dimensionality reduction strategies, which have vital significance for such network analysis as power flow, voltage stability and relay coordination, etc. Traditional identification of cut edges and cut vertices is always expressed into the observing the change of geometrical topology connectivity while removing some vertices or edges. Based on the analysis of equivalence network and electric interaction path, this paper presents a new physical topology analysis algorithm to identify cut edges and vertices, which introduces two simple equality criterions derived from the reduced Z -matrix elements. This novel algorithm adequately utilizes the physical topological properties concealed in the Z -matrix of power system. The improvement over existing graph-theoretical approaches is that this new algorithm has more direct-viewing, simplicity, specific and important physical significance, which can borrow ideas to insight and research the topology configuration in power network.

KEY WORDS: power system; cut edge and cut vertex; equivalence network; geometrical topology; physical topology; interaction path

摘要: 割支路和割节点的断开会导致网络产生分离子图, 这种特殊的支路和节点往往代表了网络中的薄弱环节或某种优化的分割降维策略, 因而在潮流、电压稳定、继电保护整定等电力系统网络计算领域具有重要的意义。以往的割支路和割节点辨识算法大多从几何拓扑的角度, 将其转化为局部支路开断后的图的连通性判断。基于阻抗矩阵元素网络等值

后的节点电气耦合路径分析, 提出一种识别割节点和割支路的物理拓扑判断算法。该算法利用节点阻抗矩阵反映的物理特性, 引入了2个简单的数学等式判据。相对传统的图论拓扑分析算法, 文中提出的算法简单、直观, 具有明确的物理意义, 对于理解和研究电力系统网络拓扑结构具有一定借鉴意义。

关键词: 电力系统; 割支路和割节点; 等值网络; 几何拓扑; 物理拓扑; 耦合路径

0 引言

电力系统的静态和动态特性取决于其组成各元件的联结方式及其参数。研究电力系统网络拓扑结构对于电力系统具有重要意义: ①电力系统中的很多问题与网络拓扑结构具有密切关系, 如链式狭长电网结构与暂态稳定问题密切相关^[1]; ②网络拓扑的结构特点可以为许多问题的处理和实际应用提供便利, 如无功电压的分层分区控制^[2]; ③网络拓扑结构的特点研究可以有效提高电力系统问题分析的效率, 如电力系统可靠性评估中的拓扑分区^[3]、继电保护整定计算中断点求取的网络预处理^[4-5]和运行方式组合的拓扑变化分析^[6]。

根据图论理论, 对于任意给定连通网络, 若断开网络中某条支路或某个节点(同时包括该节点直接关联的支路), 该网络变成两个或多个独立分离的连通子图, 则被断开的支路或节点称为割支路或割节点^[7]。这种特殊连接方式的支路和节点往往代表了系统的薄弱环节或某种优化的分割降维策略, 因

此在潮流、电压稳定、继电保护整定等电力系统网络分析计算领域具有重要的意义^[8-10]。

以往的割支路和割节点辨识算法大多从几何拓扑的角度，将其转化为局部支路开断后的图的连通性判断。电网的连通性判断可以采用现有图论中广泛被应用的两种拓扑结构辨识算法：基于支路树搜索算法^[11]和节点关联矩阵法^[12]。其中树搜索算法包括广度搜索算法和深度优先算法及其改进变形算法，这类算法对于复杂多环网结构适应性较差。节点关联矩阵法用矩阵描述网络的拓扑连接关系，通过矩阵逻辑自乘分析节点之间的连通关系，直观性较好，但其运算时间随节点数的平方增长，当网络规模较大时，其时间难以承受。割支路和割节点的辨识也可以直接采用 Tarjan 提出的一种搜索算法^[13]。该算法通过前向支路、后向支路及父节点、子节点的区分来动态修改子节点所能追溯到的最早祖先点序号，从而实现割节点的辨识和强连通分图的求解。该算法具有较快的强连通分图求解速度。另外，文献[14]提出一种用于电网安全预警分析的割支路辨识算法，该算法将构成回路的所有支路上的节点合并，最后剩余的支路即可被确定为割支路。文献[15]通过分析节点断开后网络邻接矩阵秩的变化来辨识割节点，并将其用于基于传输分配系数的电网等值计算算法。

上述算法都是从图的几何网络连接关系入手，辨识图中存在的割支路和割节点。本文采用综合元件参数和拓扑结构的网络数学模型——节点阻抗矩阵，充分利用其矩阵元素反映电网节点间电气耦合的综合体现这一特性，基于两点 Π 型等值和三点等值网络中节点电气耦合路径分析，提出一种辨识割支路和割节点的新算法。算法仅根据两个简单的数学等式判据，即可快速辨识电气物理耦合网络拓扑中的割支路和割节点，并获得对应的网络分裂方式。算法在方向保护整定计算断点求取中的应用证明了本文算法和几何网络拓扑算法结果的一致性。相对于基于图论的拓扑分析算法，本文提出的算法简单直观，蕴含明确的物理意义，对于理解和研究电力系统网络拓扑结构、节点间的电气耦合关系等具有一定的借鉴意义。

1 割支路和割节点

对于任意给定连通网络，若断开网络中某个割节点或某条割支路，该网络变成 2 个或多个分离的

连通子图。两端节点均是割节点的支路为割支路。根据图论理论，假设 v 是连通图 G 中的一个节点，则如下陈述是等价的^[7]：① v 是图 G 的一个割节点；② 存在与 v 不同的两个节点 u 和 w ，使 v 在每一条 $u-w$ 道路上；③ 存在一个将节点集 $V-\{v\}$ 分成子集 U 和 W 的划分，是对任何两点 $u \in U$ 和 $w \in W$ ，节点 v 在每一条 $u-w$ 道路上。

如图 1 所示的图 G ，支路 7 和节点 2、5、8 即为割支路和割节点。断开支路 7 以及在节点 8 处分裂，图 G 将变为 3 个分离的连通子图。

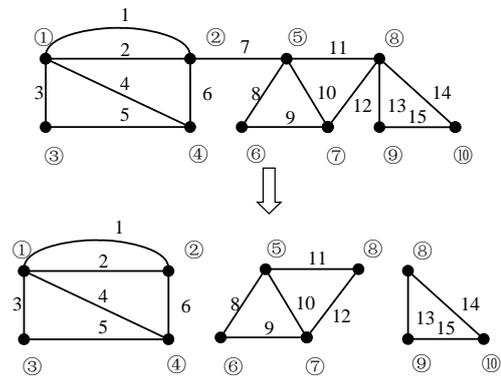


图 1 根据割节点和割支路对图 G 进行分解示意图

Fig.1 Decomposing diagram based on cut vertices and cut edges

割支路和割节点的断开将直接导致网络解列为几个孤生子岛。在电力系统网络中，这种孤岛的出现可能导致潮流计算时雅可比矩阵的奇异，潮流计算无法进行。因此割支路和割节点的辨识对于电力系统网络分析是必要的，尤其在电力系统静态安全分析中的断线模拟及电力系统可靠性分析中，需要避免这种类型的支路和节点断开或采取特殊的处理^[16-17]。同时，割支路和割节点往往代表了破坏系统安全稳定运行的最薄弱区域，由于线路故障等突发原因造成的电力系统解列运行，使有功和无功功率不平衡，可能导致电力系统失稳。因此割支路和割节点的辨识在电力系统电压、暂态稳定等动态安全预警、监控中也具有重要意义^[9,14,18]。

另外，割支路和割节点有时也代表了某种优化的分割降维策略^[15,19-20]。在复杂环网方向保护整定计算过程中，求解最小断点集(minimum break point set, MBPS)是保护配合计算的关键步骤。MBPS的求取是NP完全问题，其求解过程和结果的优劣直接与网络的规模和复杂程度相关。对于弱连通的配合关系图，对断开割节点或割支路后获得的各个连通子图分别求取MBPS和对整个配合关系图求取MBPS

可以获得相同的最终结果。根据割节点和割支路对配合关系图进行网络拓扑预处理分析, 对其进行简化和分解, 能够降低配合关系图的规模、有效提高整体 MBPS 求取算法的效率^[5,10,20]。而基于某些优先级原则选取断点的算法往往不能保证找到最小断点集, 其根本原因在于当出现优先级相同的多个待选断点时, 断点的选择具有随机性, 这种随机选取的断点将直接影响后续断点选择优先级的判断, 从而导致取不到最小断点集。对配合关系图进行简化和分解, 可以大大减少断点优先级相同的概率, 从而最大程度上获得求取到最小或接近最小断点集的可能性。

2 基于电气耦合路径分析的辨识判据

2.1 节点阻抗矩阵

电力系统的数学模型是对包括几何拓扑和元件参数在内的电力系统网络的一种数学描述, 节点导纳矩阵和阻抗矩阵是其中应用最为广泛的两种数学模型。节点导纳矩阵能直接反映系统网络拓扑结构, 节点阻抗矩阵则表征了网络节点之间的电气耦合程度, 其元素往往描述了节点之间的物理联系紧密程度。

在物理意义上, 节点阻抗矩阵表示了依次在各个节点单独注入电流激励后的全网电压分布。对于一个连通的电网, 从任意一个节点单独注入的电流将通过各种可能的电气耦合路径到达另外一个节点, 因此节点阻抗矩阵元素反映了在系统全局范围内节点间所有电气耦合的综合体现。节点间的电气物理耦合联系一般都建立在电气元件几何连接的基础上, 因此节点阻抗矩阵同样也蕴含了节点之间的几何拓扑关系。与节点导纳矩阵所反映的邻接节点间的局部拓扑连接关系不同的是, 根据节点阻抗矩阵局部元素, 能够探知系统范围内节点之间的某些拓扑连接特征。本文提出的割支路和割节点辨识算法正是基于这一思想。

由于节点零序阻抗矩阵同时反映了互感支路之间的耦合关系, 使其与几何拓扑之间的对应关系更为复杂, 所以本文采用节点正序阻抗矩阵元素来辨识割支路和割节点, 下文中的阻抗矩阵均指正序阻抗矩阵。另外, 从割支路和割节点的判断分析可知, 是否计及电阻对判断结果没有影响, 因此文中采用的阻抗矩阵均为忽略电阻的实矩阵。

2.2 基于两点 Π 型等值网络的割支路辨识判据

假设系统内的任意某条线路 L , 其两端母线为

p 和 q 。为判断该线路是否为割支路, 可以采用下述方法。

以母线 p 和 q 为保留节点, 其余节点均为消去节点, 将整个系统等值到保留节点 p 和 q 。等值后的两节点系统可以用一个 Π 型等值网络模拟, 如图 2(a) 所示。其中, X_{pq} 、 X_{pp} 、 X_{qq} 为等值网络中各等值支路的电抗参数。

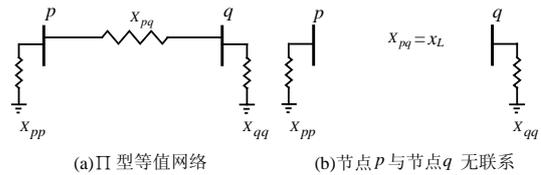


图 2 两点 Π 型网络等值图

Fig. 2 Π type equivalent network diagram

假设 Π 型等值网络的节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵用式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{pq} \\ Y_{qp} & Y_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pq} \\ Z_{qp} & Z_{qq} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1)$$

根据节点阻抗矩阵的物理意义, 保留节点相关阻抗矩阵元素在等值前后保持不变, 这是节点阻抗矩阵相对导纳矩阵的另外一个突出优势。因此 Π 型等值网络的节点阻抗矩阵元素可直接由原网络节点阻抗矩阵中节点 p 和 q 对应的矩阵元素构成。根据逆矩阵之间的数学关系, Π 型等值网络中节点 p 和 q 之间的互导纳 Y_{pq} 可以表示为

$$Y_{pq} = -Z_{pq} / (Z_{pp}Z_{qq} - Z_{pq}Z_{qp}) \quad (2)$$

进一步可以得到节点 p 、 q 之间等值支路的电抗参数 X_{pq} 为

$$X_{pq} = (Z_{pp}Z_{qq} - Z_{pq}Z_{qp}) / Z_{pq} \quad (3)$$

在物理意义上, 节点 p 、 q 之间等值支路的电抗参数 X_{pq} 定量描述了两节点之间等效电气耦合路径的电气参数。假如根据串、并联关系将原网络中节点 p 和 q 之间所有的电气物理耦合路径归并, 归并后得到的等效耦合路径的等值电抗即为 X_{pq} 。

当 Π 型等值网络中节点 p 和 q 之间的等值电抗满足等式

$$X_{pq} = x_L \quad (4)$$

式中: x_L 为线路 L 的正序电抗, 表明线路 L 为节点 p 和 q 之间唯一的电气耦合路径。当式(4)成立时, 开断线路 L 后, 节点 p 、 q 将失去所有的电气耦合联系, 如图 2(b) 所示。由于节点间的电气物理耦合联系一般都建立在电气元件几何连接的基础上, 式(4)的成立同时也表明切除线路 L 后, 原网络的几何拓扑也

将分割为两个互不连通的子网络。

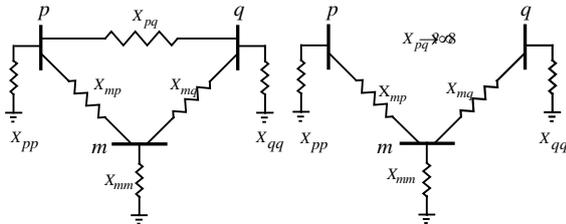
因此，根据线路 L 两端母线对应的自阻抗及互阻抗元素，基于式(5)即可快速判断线路 L 是否为割支路。

$$(Z_{pp}Z_{qq} - Z_{pq}Z_{qp}) / Z_{pq} = x_L \quad (5)$$

2.3 基于 3 节点等值网络的割节点辨识判据

假定 m 为系统中任意一个节点，为判断该母线是否为割节点，同上节所述，仍可采用等值网络的方法，只是需要将等值网络中保留节点的范围进一步扩大。

设 L_1 和 L_2 为与节点 m 相连的任意 2 条线路， p 和 q 分别为 2 条线路的另外一端母线。将整个系统等值到如图 3 所示的 3 节点等值网络，其中 X_{pq} 、 X_{mp} 、 X_{mq} 、 X_{pp} 、 X_{qq} 、 X_{mm} 分别表示等值网络中各等值支路的电抗参数。



(a) 3 节点等值网络 (b) 节点 p 仅通过节点 m 与节点 q 联系

图 3 3 节点网络等值图

Fig. 3 Three-node equivalence network diagram

3 节点等值网络的节点导纳矩阵和阻抗矩阵为

$$\begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{pq} & Y_{pm} \\ Y_{qp} & Y_{qq} & Y_{qm} \\ Y_{mp} & Y_{mq} & Y_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pq} & Z_{pm} \\ Z_{qp} & Z_{qq} & Z_{qm} \\ Z_{mp} & Z_{mq} & Z_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

根据等值网络中节点 p 和 q 之间的互导纳，可进一步求取 p 和 q 之间的等值电抗 X_{pq} 为

$$X_{pq} = -\frac{1}{Y_{pq}} = d \left/ \begin{matrix} Z_{qp} & Z_{qm} \\ Z_{mp} & Z_{mm} \end{matrix} \right. \quad (7)$$

式中： d 为式(6)右边 3 维阻抗矩阵对应行列式的值，为

$$d = |\mathbf{Z}| = Z_{pp}Z_{qq}Z_{mm} + Z_{pq}Z_{qm}Z_{mp} + Z_{qp}Z_{qq}Z_{pm} - Z_{mp}Z_{qq}Z_{pm} - Z_{qp}Z_{pq}Z_{mm} - Z_{pp}Z_{qm}Z_{mq} \quad (8)$$

在物理意义上，节点 p 和 q 之间等值支路的电抗 X_{pq} 定量描述了 2 点之间不经过节点 m 的等效电气耦合路径的电气参数。假如将原网络节点 p 和 q 之间不包含经过节点 m 的所有其他电气物理耦合路径进行归并，归并后得到的等效电气耦合路径的电抗参数即为 X_{pq} 。

当 3 节点等值网络中节点 p 和 q 之间的等值电抗

趋近于无穷大时，即 $X_{pq} \rightarrow \infty$ ，表明节点 p 和 q 之间不存在不经过节点 m 的电气耦合路径，如图 3 所示，此时可以断定从节点 p 到达节点 q 的物理耦合路径和几何连通路程都必须经过节点 m 。当式(9)成立时，必定有 $X_{pq} \rightarrow \infty$ 。因此，根据母线 m 及其直接相连接的母线对应的自阻抗及互阻抗，基于式(9)即可快速判断母线 m 是否为割节点，并同时得到割节点断开后的网络分解方式：

$$Z_{qp}Z_{mm} - Z_{qm}Z_{mp} = 0 \quad (9)$$

假设与节点 m 直接相连接的线路有 k 条。其具体的算法步骤：依次取 k 条线路中的 2 条，假定其另外一端的母线分别为 p 和 q ，基于式(9)进行判断：①当等式成立时，将节点 p 和 q 标记为不同的两组连通子图节点；②当等式不成立时，将节点 p 和 q 标记为相同的一组连通子图节点。

当 k 条线路两两判断完毕后，假定连通子图节点的组数等于 1 时，表示节点 m 为非割节点；当连通子图节点的组数大于 1 时，则节点 m 为割节点，且通过各组的连通节点可以很快确定断开割节点 m 的网络分裂方式，即断开节点 m 后分解的各连通子图包含节点为：①各组连通节点；②与各组连通节点直接或间接连通的其他节点(连接分析时排除割节点和割支路)；③节点 m 。

3 割节点判断的优化

3.1 判断优化的理论依据

在几何网络拓扑中，节点之间的连接关系具有传递性，即假定从节点 i 有路径到达 k ，从节点 k 有路径到达节点 j ，则从节点 i 必有路径到达节点 j 。这种传递性是很多几何优化搜索算法的理论依据^[14,21]。节点之间的电气物理耦合路径同样具有类似的传递性，且这种传递性反映的节点间的连接关系与其相应的几何网络拓扑中节点之间的连接关系是一一对应的。

假如 3 个节点 p 、 q 、 t 与节点 m 直接相连接，且节点间的阻抗矩阵元素满足式(10)：

$$\begin{cases} Z_{qp}Z_{mm} - Z_{qm}Z_{mp} \neq 0 \\ Z_{qt}Z_{mm} - Z_{qm}Z_{mt} \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

则上述 2 个不等式的成立，表明节点 p 和 q 之间、节点 t 和 q 之间都至少存在一条电气耦合路径，且耦合路径不经过节点 m 。因此从节点 p 出发至少也存在一条电气耦合路径，该路径经过节点 q ，然后到达节点 t ，并且该路径不经过节点 m 。在节点 p 、

之间仅由三绕组变压器(尤其是自耦变压器)等值电路的中压支路或未合并节点间的虚拟支路等无穷小电抗支路直接连接, 或者其间连接的多个元件根据串、并联关系归并后的等效支路相当于一个无穷小电抗支路, 这种薄弱的电气耦合联系可能会导致割支路判断错误。针对类似前者的电网拓扑结构, 可以通过在式(5)或式(9)成立时, 追加判断 2 节点之间是否直接连接有无穷小电抗支路, 从而有效避免误判; 而后者出现的拓扑结构在实际电网中则较为少见。

表 1 割支路的判断

Tab. 1 Judgment of cut edges

支路	判据表达式	计算结果	是否割支路
L_3	$\left \frac{Z_{66}Z_{44}}{Z_{64}} - Z_{64} - x_{L_3} \right $	0.003 237	否
L_8	$\left \frac{Z_{55}Z_{33}}{Z_{53}} - Z_{53} - x_{L_8} \right $	2.5×10^{-6}	是
L_9	$\left \frac{Z_{77}Z_{55}}{Z_{75}} - Z_{75} - x_{L_9} \right $	0.023 696	否

表 2 割节点的判断

Tab. 2 Judgment of cut vertices

母线	母线对	判据表达式	计算结果	是否割节点
B_3	B_2-B_5	$ Z_{52}Z_{33} - Z_{53}Z_{32} $	2.64×10^{-9}	是
	B_3-B_1	$ Z_{31}Z_{55} - Z_{53}Z_{51} $	1.93×10^{-9}	
	B_3-B_4	$ Z_{43}Z_{55} - Z_{54}Z_{53} $	6.14×10^{-9}	
B_5	B_1-B_4	$ Z_{41}Z_{55} - Z_{54}Z_{51} $	5.26×10^{-10}	是
	B_4-B_7	$ Z_{74}Z_{55} - Z_{75}Z_{54} $	1.88×10^{-6}	
	B_4-B_6	$ Z_{64}Z_{55} - Z_{65}Z_{54} $	3.83×10^{-6}	
B_7	B_5-B_6	$ Z_{65}Z_{77} - Z_{76}Z_{75} $	1.83×10^{-4}	否

另外, 在辨识算法计算时间上, 基于广度和深度优先改进搜索的连通性判断辨识算法的时间复杂性为 $O(N(N+E))$ (其中, N 和 E 分别为网络的节点数目和边数目), 基于 Tarjan 割点辨识算法的时间复杂性为 $O(N+E)$ 。而本文算法充分利用了节点阻抗矩阵元素能反映在系统全局范围内节点间所有电气耦合的综合体现这一特性, 无需全网搜索, 仅根据局部元素即可快速实现割点或割支路辨识, 且其计算时间与系统规模无关。但如果考虑节点阻抗矩阵形成的时间, 则本文的算法无时间优势可言。本文算法的价值体现更多的在于其蕴含的物理含义以及其在电网拓扑结构分析中的尝试和探索。

5 结论

提出了一种利用电力系统物理网络拓扑分析其几何网络拓扑结构特点的新思路。基于节点阻抗矩

阵元素能够反映在系统全局范围内节点间所有电气耦合的综合体现这一特性, 利用其蕴含的物理网络拓扑连接关系, 实现了一种辨识割支路和割节点的物理拓扑分析算法。算法根据局部节点及其阻抗矩阵元素构成的等值网络及其电气参数, 建立了 2 个简单的数学等式判据, 不必进行类似几何网络拓扑分析算法中的全局搜索。同时, 基于节点之间电气耦合路径存在的传递性, 进一步优化和加速了割节点的判断过程。算例证明了几何网络拓扑结构和电气物理耦合拓扑关系的一致性。

相对基于图论的拓扑分析算法, 本文算法具有明确的物理含义, 对于分析线路在环网电气耦合中的比重、理解和研究电力系统网络的几何拓扑和电气耦合之间的联系具有一定的借鉴价值。

参考文献

- [1] 栾军, 张智刚, 寇惠珍, 等. 提高 500kV 电网输电能力的技术研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 15-17.
Luan Jun, Zhang Zhigang, Kou Huizhen, et al. A study on improving transmission ability of 500 kV power network[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 15-17(in Chinese).
- [2] 张勇军, 任震. 无功电压动态控制的分布式协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 34-38.
Zhang Yongjun, Ren Zhen. Distributed cooperation optimization for reactive power voltage dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 34-38(in Chinese).
- [3] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.
Xie Yinghua, Wang Chengshan. Reliability evaluation of medium voltage destitution system based on feeder partition method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39(in Chinese).
- [4] 陈允平, 周泽昕, 李强. 继电保护定值计算机计算中的图论新算法[J]. 电网技术, 1995, 19(4): 31-37.
Chen Yunping, Zhou Zexin, Li Qiang. The new graph algorithm for computer-aided design of protection system coordination[J]. Power System Technology, 1995, 19(4): 31-37(in Chinese).
- [5] 李银红, 段献忠. 继电保护整定计算中形成简单回路的方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 21-25.
Li Yinhong, Duan Xianzhong. Study on simple loop formation method in relay coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 21-25(in Chinese).
- [6] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51-56.
Cao Guochen, Cai Guowei, Wang Haijun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 51-56(in Chinese).
- [7] 王朝瑞. 图论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [8] Goderya F, Metwally A A, Mansour O. Fast detection and identification islands in power networks[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1980, 99(1): 217-221.
- [9] Lagonotte P, SabonnadiGre J C, LCost J Y. Structural analysis of the electrical system application to secondary voltage control in

- France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [10] Madani S M, Rijanto H. A new application of graph theory for coordination of protective relays[J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 6(18): 43-45.
- [11] 陈惠开[美]. 应用图论-图与电网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.
- [12] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-16.
Wang Xiangzhong, Li Xiaolan. Topology identification of power system based on incidence matrix [J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-16(in Chinese).
- [13] Tarjan R. Depth-first search and linear graph algorithms[J]. S IAM J. Compute, 1972, 1(2): 146-160.
- [14] Tsai Men Shen. Development of islanding early warning mechanism for power systems[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, Settle, USA, 2000.
- [15] Xu Cheng, Overbye T J. PTDF-based power system equivalents [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1868-1876.
- [16] Bertran M, Corbella X. On the validation and analysis of a new method for power network connectivity determination[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1982, 101(2): 316-324.
- [17] Montagna M, Granelli G P. Detection of jacobian singularity and network islanding in power flow computations[J]. IEE Proceedings-C, 1995, 142(6): 589-594.
- [18] Jang Sung Il, Kim Kwang Ho. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004, 19(2): 745-752.
- [19] Chan K W, Dunn R W, Daniels A R. Efficient heuristic partitioning algorithm for parallel processing of large power systems network equations[J]. IEE Proc. -Gener. Trans. Distrib, 1995, 142(6): 625-630.
- [20] Madani S M, Rijanto H. Protection co-ordination: determination of the break set[J]. IEE Proc. -Gener. Trans. Distrib. 1998, 145(6): 717-721.
- [21] Ravindra K, Ahuja T Magnati, Orlin J B. Network flows theory, algorithms and applications[M]. New Jersey: Prentice-Hall international, Inc., 1993.

收稿日期: 2007-04-17。

作者简介:

段献忠(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 目前从事电力系统分析计算、调度及变电站自动化等方面的研究工作, xzduan@263.net;

杨雄平(1978—), 男, 博士研究生, 从事电力系统网络拓扑分析及继电保护整定计算理论研究;

石东源(1974—), 男, 博士, 研究方向为电力系统二次系统自动化、电力系统软件技术等。

(编辑 王剑乔)