

DOI: 10.7667/PSPC170642

基于邻接矩阵的网络拓扑辨识算法

郭帅文¹, 燕跃豪², 蒋建东¹, 马梦茹¹, 鲍薇²

(1. 郑州大学, 河南 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 电力网络拓扑辨识是电网管理系统高级应用软件的重要组成部分, 是电力系统各种分析计算的基础。针对矩阵法计算量大、计算速度慢的缺点, 提出了一种加快网络拓扑辨识的新方法。该方法用节点一支路关联矩阵表示网络的基本拓扑结构, 通过定义矩阵的“或”、“与”运算和开关状态矢量, 利用对称消去法降低邻接矩阵的阶数, 并把对称性应用于求连通矩阵的过程中, 从而实现网络的动态拓扑。与传统算法相比, 该方法减少了计算量, 加快了计算的速度, 适用于复杂的网络拓扑辨识。

关键词: 网络拓扑辨识; 邻接矩阵; 节点消去; 对称性

Network topology identification algorithm based on adjacency matrix

GUO Shuaiwen¹, YAN Yuehao², JIANG Jiandong¹, MA Mengru¹, BAO Wei²

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. Zhengzhou Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Power grid topology identification is not only an important part of the advanced application software of the power network management system, but also the basis for a variety of analytical calculations. The paper proposes a new method to speed up the power grid topology identification, which solves the disadvantages of the matrix large computation and slow computation speed. The method uses the node-branch incidence matrix to represent the basic topological structure of the network, defines the matrix "or" or "and" operation and switch state vector, employs the symmetric elimination to reduce the order number of the adjacency matrix and applies the apply symmetry to the process of finding the connected matrix, thereby realizing the network dynamic topology. Compared with the traditional algorithm, the algorithm can reduce amount of calculation and accelerate the computation speed, which is suitable for topology identification of complex power grid.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 52171015023Z).

Key words: network topology identification; adjacency matrix; node elimination; symmetry

0 引言

电力网络拓扑辨识为潮流计算、停电范围分析、负荷转移^[1]等方面提供网络结构数据, 是电力系统分析高级应用软件的基础^[2-4], 其作用是把电力系统的物理模型转化为网络拓扑分析需要的数学模型。

电力网络拓扑辨识的实质是判断电网中各元件之间的连通关系, 根据开关的状态将网络进行母线的划分和电气岛的划分, 目前主要有树搜索法^[5-8]和矩阵法^[9-18]。树搜索法是把某一点作为起点, 按

规定的方法搜索连接在一起的母线和支路, 最后进行网络的分析。而矩阵法是在邻接矩阵的基础上, 通过各种方法求出网络的全连通矩阵, 文献[7-10]利用对矩阵求平方的方法求取全连通矩阵, 而文献[11]把对称性应用于平方方法中提出了准平方法, 这些方法虽然在一定程度上加快了计算速度、减少了计算量, 但是并没有降低矩阵的阶数, 形成的矩阵还是很大。文献[12]提出利用节点消去技术降低矩阵的阶数, 从而减少计算次数, 但在节点消去过程中和自乘运算中还需要大量运算。两种方法相比: 树搜索法原理相对简单、容易理解, 但编程复杂; 矩阵法相对直观清晰, 编程简单, 但是占用大量内

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目资助(52171015023Z)

存储空间, 计算量大。

对于矩阵法运算量大的特点, 本文在文献[10]的基础上提出了一种加快网络分析速度的算法, 利用开关变位后来简化节点-支路关联矩阵, 并把对称性应用于消去过程和邻接矩阵的自乘过程中, 减少了大量的冗余计算, 提高了计算速度。

1 关联矩阵及其简化

1.1 关联矩阵

根据图论的知识, 对于一个拓扑网络, 可以用节点-支路关联矩阵来描述其拓扑结构。如图 1 所示的主接线图, 当把物理模型抽象为计算用的数学模型时, 应把主接线的节点作为拓扑图的节点, 把开关元件作为拓扑图的支路(联络线也作为支路), 母线的每一进出线连接点也作为节点, 可以形成关联矩阵 $A=[a_{ij}]$ 。关联矩阵 A 的行为节点, 列为支路, a_{ij} 表示节点 i 和支路 j 的关联性, 当节点 i 和支路 j 相连时 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。

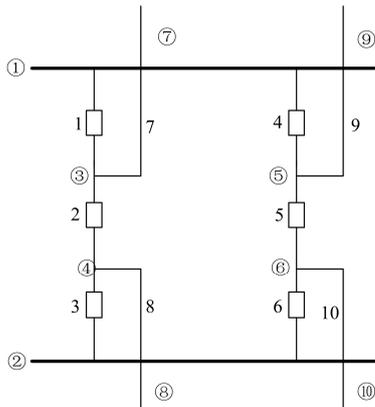


图 1 主接线图

Fig. 1 Main connection diagram

对于图 1 中所有开关都闭合时的关联矩阵为 A_0 , 则 A_0 为

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.2 关联矩阵的简化

实际的电网是一个动态变化的过程, 某些开关的变位必然引起矩阵中支路的断开或连接, 因此对电网的拓扑是一个动态拓扑的过程, 为了方便表示开关的位置, 定义开关的位置矢量 $S=[s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_m]$, m 为支路数, s_j 与开关 j 的状态相对应, 具体定义如下: ① 支路与开关的状态一致, 开关闭合时, $s_j=1$; 开关断开时, $s_j=0$ 。② 计算支路进行电气岛的分析时定义为闭合, 即 $s_j=1$; 进行厂站分析时定义为断开(如图 1 中编号为 7、8、9、10 的支路), 即 $s_j=0$ 。

对网络的拓扑分析包括母线的分析(厂站的分析)和电气岛的分析(系统的分析), 母线的分析是在厂站内对节点的逻辑关系分析形成母线; 电气岛的分析是对整个系统各个厂站之间的分析, 分析母线之间的逻辑关系从而形成各个电气岛。两种分析过程, 算法可以统一, 但数据不是统一的。为了使两种分析过程能够统一, 文中用一种特别的方式来定义计算支路, 在系统分析时开关为关闭状态, 在厂站分析时开关为分离状态。

通过规定如下的向量运算, 能够方便地表述网络的拓扑辨识方法。

设行向量 a 与行向量 b 的维数一样, 则 a 和 b 之间的“与”运算定义为 $a \otimes b$, 表达的意义为行向量中对应元素分别做“与”运算; a 和 b 之间的“或”运算定义为 $a \oplus b$, 表示为两向量中对应元素做“或”运算。

用开关状态 S 去修改节点-支路关联矩阵 A , 可以求得此时状态下的网络关联矩阵 A' , 则

$$A'(i) = A(i) \otimes S \quad (1)$$

式中, $A'(i)$ 和 $A(i)$ 分别表示开关发生变位后和没发生变位时关联矩阵的第 i 行的行向量。

根据布尔矩阵的运算规则, 当开关矢量 S 中的 $s_j=0$ 时, 在矩阵 A' 中的 j 列元素全部为 0, 表明 j 支路没有和其他节点相连接, 这也许存在两种状况: 1) 主接线中的逻辑支路, 其状态为断开; 2) 厂站的拓扑分析时, 计算支路设置为断开状态。

在形成的关联矩阵 A' 中可以将支路为 0 对应的列全部删去, 只保留有用支路, 形成简化的关联矩阵 A'' , 这样可以降低矩阵的阶数, 减少存储量, 加快网络拓扑速度。例如, 当开关的状态为 $S=[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1]$ 时, 此时的关联矩阵为 A'_0 , 简化矩阵为 A''_0 , 则

$$A'_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A''_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2 邻接矩阵及其简化拓扑

2.1 邻接矩阵的形成

邻接矩阵表示节点之间的连接关系，节点之间通过支路联系在一起，因此可以通过节点-支路矩阵和支路-节点矩阵相乘形成节点-节点邻接矩阵。同理，可以像定义关联矩阵一样定义邻接矩阵 $C=[c_{ij}]$ ，当两个节点连接时， $c_{ij}=1$ ，否则， $c_{ij}=0$ ，显然对于邻接矩阵对角线的元素全部为 1，并且 C 还是个对称矩阵。对于 n 个节点， m 条支路的网络，定义矩阵的乘法运算为

$$C = A \cdot B \quad (2)$$

$$c_{ij} = \bigcup_{k=1}^m (a_{ik} \cap b_{kj}) \quad (3)$$

式中： A 表示节点-支路关联矩阵； B 表示支路-节点关联矩阵，其中 $B=A^T$ ； \cap 表示“与”运算； \cup 表示“或”运算。

将简化的关联矩阵 A''_0 代入式(2)可得邻接矩阵 $C^{(1)}$ ，则

$$C^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对网络的拓扑辨识就是要弄清楚节点之间的连接关系，而 $C^{(1)}$ 表示两个节点是通过支路直接相连接，称为一级连通关系，形成的邻接矩阵称为一级连通矩阵。 $C^{(1)}$ 自乘求得的矩阵为 $C^{(2)}$ ，表示节点的二级连接关系，称为二级连通矩阵；如果 $C^{(2)}$ 再乘以 $C^{(1)}$ ，形成的矩阵为三级连通矩阵。重复这个过程，对于 n 个节点最多有 $n-1$ 级连通关系。如果某级连通矩阵能够表示节点的所有连接关系，则称为全连通矩阵。当两次矩阵的计算结果一样时，这个矩阵便是网络的全连通矩阵，而网络的拓扑辨识就是对全连通矩阵的分析。

2.2 邻接矩阵的简化

矩阵法分析时，虽然算法简单清晰，但是网络中节点数目众多，形成的邻接矩阵非常庞大，且需要对矩阵进行 $n-1$ 次自乘运算，计算量大，增加了网络拓扑辨识的计算时间，不能达到网络动态拓扑的需求。因此，文中利用对称节点消去法，减少网络中节点的数量，并在此基础上，利用邻接矩阵的对称性和布尔运算简化运算过程，从而减少运算量，加快运算速度，缩短拓扑时间。

2.2.1 利用对称消去法消去中间节点

对网络进行拓扑辨识，由于配电网节点数量庞大，并不需要知道所有节点之间的连接情况，通常情况下，只是需要一些重要的节点之间的连接关系，因此对于不需要“过多关心”的节点和支路可以消去，从而减少网络中节点的数目，降低邻接矩阵的阶数^[19-20]。

节点消去过程就是对邻接矩阵简化的过程，每消去一个节点，邻接矩阵的阶数就降低一阶。例如，消去节点 k 的过程中，邻接矩阵中由节点 k 相连接的二级连接关系 i 和 j 必须变为直接连接，即 $c_{ij}=1$ 。节点消去的具体算法是：对于邻接矩阵 C 中的每个元素 $c_{ij}(i \neq j, i \neq k, j \neq k)$ 和 $(c_{ik} \cap c_{kj})$ 求“或”形成新的元素 c'_{ij} 。由于邻接矩阵具有对称性，则

$$c'_{ji} = c'_{ij} = c_{ij} \cup (c_{ik} \cap c_{kj}) \quad (4)$$

每更新一次矩阵中的元素, 就删掉 \mathbf{C} 中要消去的节点对应的行和列。就这样依次消去不需要考虑的节点, 留下需要保留的节点, 形成的矩阵为节点消去矩阵 \mathbf{T} 。节点消去的 c 程序如下:

```
for (i=1, i ≤ n, i++)
  for (j=1, j ≤ n, j++)
    c'_{ji} = c'_{ij} = c_{ij} ∪ (c_{ik} ∩ c_{kj})
```

2.2.2 利用连通矩阵对称性求全连通矩阵

由节点消去矩阵自乘求全连通矩阵的过程中, 每计算一个元素需要进行 $(2n-1)$ 次运算, 而矩阵中有 n^2 个元素, 因此计算一次自乘运算需要 $n^2(2n-1)$ 次运算, 计算量较大。利用邻接矩阵的对称性, 求其连通矩阵时可以降低一半的运算量, 对于矩阵中为 1 的元素, 不用再进行计算, 因为之前是连通的, 计算之后一定还是连通的, 而且对称性还可以用在节点消去的过程中。这样, 进一步减少了计算量, 利用对称性计算连通矩阵元素的计算公式为

$$c_{ji} = c_{ij} = \bigcup_{k=1}^m (c_{ik} \cap c_{kj}) \quad (5)$$

求取连通矩阵元素的流程框图如图 2 所示, 而网络拓扑辨识的总流程图如图 3 所示。

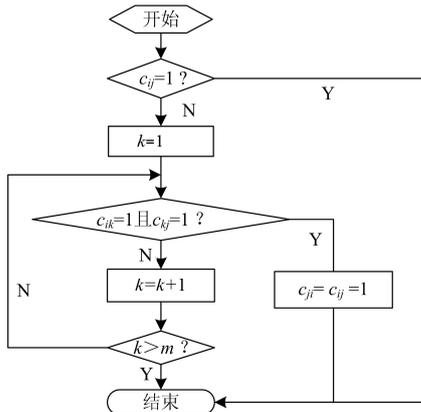


图 2 连通矩阵元素计算流程图

Fig. 2 Flow chart of element computation of the connectivity matrix

3 算例分析

图 4 所示为变电站的接线图, 图中是单母分段接线形式, 有 4 条进线连接到母线, 通过两台变压器向低压侧供电。将图中的进线端、出线端、隔离开关、断路器、变压器和母线之间的连接点作为节点, 其中变压器连接的节点为断开状态, 通过划分图中一共有 38 个节点, 以次接线方式为例来说明网络拓扑的过程。

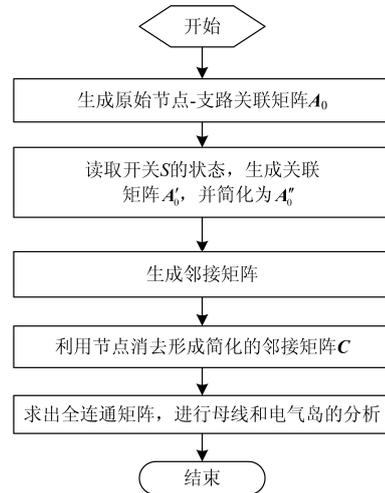


图 3 网络拓扑流程图

Fig. 3 Flow chart of network topology

- 1) 读取此时开关 \mathbf{S} 的状态, 形成简化关联矩阵。
- 2) 由简化的关联矩阵求得包含 38 个节点的网络的邻接矩阵 \mathbf{C}_0 。
- 3) 利用对称消去法把邻接矩阵 \mathbf{C}_0 中需要消去的节点消去, 形成一个最终需要关心的节点之间的邻接矩阵 \mathbf{C} 。
- 4) 利用对称性对 \mathbf{C} 进行自乘运算, 求得全连通矩阵, 通过对全连通矩阵的分析从而对电网进行拓扑辨识。

下面将对图 4 的网络针对所关心的不同节点的数目来说明各种不同的计算方法下运算量的比较。其中邻接矩阵法的计算量 $M=4\ 007\ 100$ 次, 表 1 中列出了不同节点数时消去法和对称消去法的计算次数以及与邻接矩阵法的比较。

表 1 邻接矩阵法与节点消去法和对称节点消去法计算量的比较

Table 1 Comparison of calculation amount of adjacency matrix method, node elimination and symmetric

进出线 节点数	节点消去法 计算量 R	node elimination method		
		对称节点 消去法计 算量 S	计算量的 比较 M/R	计算量的 比较 M/S
35	2 881 630	1 399 652	1.39	2.86
30	1 557 940	753 037	2.57	5.32
25	760 350	365 072	5.27	11.00
20	326 610	155 382	12.3	25.79
15	124 470	58 592	32.20	68.39
10	51 680	24 327	77.54	164.72

注: 1) 一次“与”和“或”运算分别作为一次运算; 2) 表中的计算次数为最大计算次数。

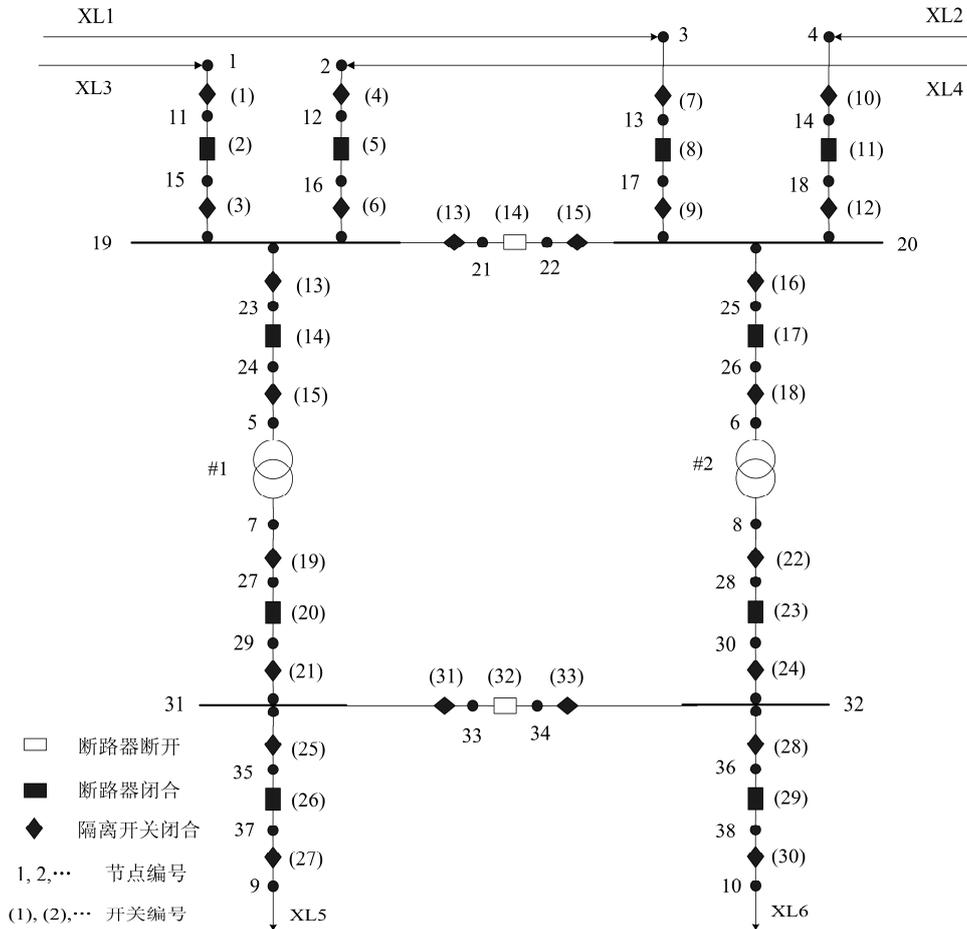


图 4 变电站接线图

Fig. 4 Substation connection diagram

通过表格可以知道，消去的节点越多，保留的节点数越少，网络拓扑分析的运算量就越少。消去图中 11—38 节点，只保留 1—10 节点之间的关系，如拓扑过程中的(3)所描述的形成邻接矩阵 C 。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对网络的拓扑分析就是对全连通矩阵的分析，对求出的邻接矩阵 C 进行自乘求取全连通矩阵，可

知 C 就是全连通矩阵。对 C 分析可知，网络分为四个部分，分别为(1、2、5)、(3、4、6)、(7、9)、(8、10)。在上面算例中，对于最终分析 10 个节点之间的拓扑结构，从表 1 中可知，用邻接矩阵分析时需要 4 007 100 次运算，节点消去法也要 51 680 次计算，而对称节点消去法计算次数为 25 182 次。由此可知，邻接矩阵的计算次数是节点消去的 77 倍，是对称节点消去法的 164 倍。而实际的计算中并不需要进行 $n-1$ 次自乘运算形成全连通矩阵，如上面经过对称消去的矩阵 C 就是全连通矩阵，不需要自乘计算，只需要 16 532 次计算，运算量是邻接矩阵法的 1/242。

为了能够直观清晰地比较不同节点时消去法和对称消去法的运算量，将表 1 中的消去法和对称消去法的运算量提取出来，制作了图 5 的柱状图，从中可以清楚地看到对称消去法的运算量是消去法的一半，由此可以体现出对称消去法的优越性。

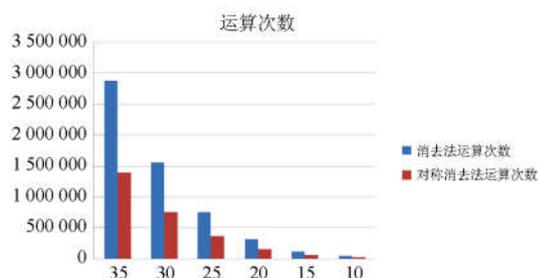


图 5 消去法和对称消去法计算量的比较

Fig. 5 Comparison of calculation amount of node elimination and symmetric node elimination method

4 总结

矩阵法应用于网络拓扑辨识时有节点多、内存占用量大、计算速度慢的特点。本文首先利用开关的状态变量来简化关联矩阵,降低矩阵阶数;然后再利用对称节点消去法消去不需要考虑的节点,进一步减少矩阵的阶数;最后在求全连通矩阵的过程中,利用矩阵的对称性以及布尔运算原则,减少了运算量,加快了计算过程中元素的更新速度,提高了网络的拓扑分析速度。通过举例验证了对称消去法的优越性。

参考文献

- [1] 王勇, 朱红, 周冬旭, 等. 基于多业务互动城市配电网负荷转供策略[J]. 电网与清洁能源, 2016, 33(2): 75-82. WANG Yong, ZHU Hong, ZHOU Dongxu, et al. Load transfer strategy in urban distribution network based on multi-business interaction[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 75-82.
- [2] 于尔铿, 刘广一, 周京阳, 等. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 王昊, 夏慧, 陈威, 等. 基于分治策略的分布式调度自动化系统稳态监控网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 101-107. WANG Hao, XIA Hui, CHEN Wei, et al. Analysis of distributed dispatching automation system stability monitoring of topology based on divide-and-conquer strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 101-107.
- [4] 齐林海, 刘超, 任旭. 基于 IEC61970 的电网拓扑分析结果共享技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 146-150. QI Linhai, LIU Chao, REN Xu. Research on sharing technology of power grid topology analysis result based on IEC61970[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 146-150.
- [5] 陶华, 杨震, 张民, 等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 120-124. TAO Hua, YANG Zhen, ZHANG Min, et al. A depth-first search algorithm based implementation approach of spanning tree in power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 120-124.
- [6] 张宏, 郭宗仁. 配电网拓扑结构等效解耦的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 88-91. ZHANG Hong, GUO Zongren. Methods for topology equivalent uncoupling of distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 88-91.
- [7] 陈星莺, 孙恕坚, 钱峰. 一种基于追踪技术的快速电力网络拓扑分析方法[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24, 34. CHEN Xingying, SUN Shujian, QIAN Feng. A fast power system network topology based on tracking technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-24, 34.
- [8] 程延远, 杨选怀, 苏晓, 等. 基于拓扑分析的二次回路仿真算法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 57-61. CHENG Yanyuan, YANG Xuanhuai, SU Xiao, et al. Study of secondary circuit simulation algorithm based on topology analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 57-61.
- [9] GODERYA F, MENTWALLY A A, MANSOUR O. Fast detection and identification of islands in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 217-221.
- [10] 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 network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-16.
- [11] 姚玉斌, 宣俭, 于娜, 等. 连通矩阵准平方法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2001, 39(5): 31-34, 40. YAO Yubin, XUAN Jian, YU Na, et al. Determination of network topology by quasi-square of the connectivity matrix[J]. Power System Protection and Control, 2001, 39(5): 31-34, 40.
- [12] 苏义荣, 邱淘西, 邱家驹. 配电网拓扑分析方法的的研究[J]. 浙江电力, 2001, 20(5): 9-13. SU Yirong, QIU Taoxi, QIU Jiaju. Study on topology analysis for distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2001, 20(5): 9-13.
- [13] 姚玉斌, 叶爽利, 吴志良, 等. 稀疏矩阵法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 31-34. YAO Yubin, YE Shuangli, WU Zhiliang, et al. Analysis of network topology by the matrix method with sparse matrix techniques[J]. Power System Protection and

- Control, 2011, 39(5): 31-34.
- [14] 杨冬锋, 周苏荃, 刘隽, 等. 基于关联矩阵化简的电网拓扑辨识新方法[J]. 华东电力, 2014, 42(11): 2254-2259.
YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, LIU Jun, et al. A novel method for power grid topology identification based on incidence matrix simplification[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2254-2259.
- [15] 周琰, 周步祥, 邢义. 基于邻接矩阵的图形化网络拓扑分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 49-52, 56.
ZHOU Yan, ZHOU Buxiang, XING Yi. Graphical power network topology analysis based on adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 49-52, 56.
- [16] 崔岩. 邻接矩阵染色法及其在电力系统网络拓扑分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 52-56.
CUI Yan. Matrix coloring method and its application in network topology analysis of power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 52-56.
- [17] 王小飞, 胡志坚, 吴方劫, 等. 基于改进邻接矩阵的稀疏技术及其在电力系统计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 50-56.
WANG Xiaofei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Improved adjacent matrix based sparse technology and its application in power system calculation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 50-56.
- [18] 王建, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 117-122.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distribution parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 117-122.
- [19] 祖凯涛, 林卓琼. 配电网精细化线损计算及降损分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 60-64.
ZU Kaitao, LIN Zhuoqiong. Line loss fine calculation and loss-reducing analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 60-64.
- [20] 许晓慧, 苏义荣, 施勇, 等. 并网运行模式下微网能量优化调度算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 117-122.
XU Xiaohui, SU Yirong, SHI Yong, et al. Real-time energy optimization management algorithm of microgrid in the grid-connected mode[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 117-122.

收稿日期: 2017-05-02; 修回日期: 2017-08-21

作者简介:

郭帅文(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事配电网自动化方面的研究工作; E-mail: 1060271964@qq.com

燕跃豪(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电网安全控制、配电网自动化及分布式电源并网方面的研究工作; E-mail: yanyuehao@163.com

蒋建东(1975—), 男, 教授, 主要从事电力系统电能质量分析相关的教学科研工作。

(编辑 周金梅)