

考虑多种运行状态的台区拓扑辨识

曾顺奇¹, 吴杰康², 李欣¹, 刘国新²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000;

2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:由于供电可靠性的要求提高以及电力用户的增加,导致配电网的规模和复杂程度不断加大,增大了配电网拓扑的难度与时间。因此,为了加快拓扑的速度,提出一种改进矩阵算法,将拓扑分为全局拓扑、局部拓扑,并对两种拓扑分别进行改进。针对全局拓扑,对邻接矩阵使用节点消去法,对连通矩阵使用行扫描法,对关联矩阵使用两次节点消去法,形成局部拓扑关联矩阵;全局拓扑后,针对变位断路器,进行局部拓扑。首先,根据遥信变化,获知网络中哪些断路器发生变位;再根据局部拓扑关联矩阵,得到变位断路器与局部网络节点的连接情况;最后,根据这些信息对连通矩阵进行局部修改并进行矩阵的行扫描、母线分析和电气岛分析,就可以得到网络的局部拓扑,进而反映网络的全局拓扑。该方法的可靠性高,适用范围广,并且可以充分提高拓扑计算的效率。

关键词:台区;拓扑辨识;全局拓扑;局部拓扑

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0020-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210405

Topology Identification of Power Distribution Area with Multi-operation Conditions

Zeng Shunqi¹, Wu Jiekang², Li Xin¹, Liu Guoxin²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000,

Guangdong, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology,

Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Due to the improvement of power supply reliability and the increase of power users, the scale and complexity of distribution network are increasing, which increases the difficulty and time of distribution network topology. Therefore, in order to speed up the topology identification, an improved matrix algorithm is proposed, which divides the topology into global topology and local topology, and improves the two topologies respectively. For global topology, node elimination method is used for adjacency matrix, row scanning method is used for connected matrix, and twice node elimination method is used for incidence matrix to form local topology correlation matrix. After global topology, local topology is carried out for displacement switch. Firstly, according to the change of remote signal, it is known which switches in the network are shifted. And then, according to local topology correlation matrix, the connection relationship between displacement switches and local network nodes is obtained. Finally, according to these information, the connection matrix is modified locally, and then the line scanning, bus analysis and electrical island analysis of the matrix are carried out to obtain the local topology of the network, which reflects the global topology of the network. The proposed method has a high reliability and wide application range, and can fully improve the efficiency of topology identification.

Key words: power distribution area (per transformer); topology identification; global topology; local topology

0 引言

配电网的拓扑辨识分析为电力系统的仿真、状

态估计、动态潮流计算和故障诊断等计算模块提供了基础的网络结构数据^[1],但随着城市人口数量的剧增以及人们对供电可靠性要求的日益提高,这导致了配电网接线的复杂程度与规模不断加大,进一步加大了配电网拓扑的难度,大大降低了配电网拓扑的效率。所以针对降低配电网拓扑难度,提高拓

扑效率的研究越来越多。

配电网拓扑辨识的实质就是根据网络中各个断路器的状态来判断网络中各个元件的连接关系,再将网络进行母线分析与电气岛分析^[2]。文献[1]运用了分布式网络拓扑并行加速的技术,将整个网络拓扑进行划分,由不同的服务器进行并行加速,充分提高了网络拓扑的效率。文献[2]针对邻接矩阵具有对称性,并将对称性应用到对邻接矩阵进行节点消去简化的过程中,相对于传统的矩阵法辨识,减少了一半左右的计算量,大大提高了拓扑效率。文献[3]针对邻接矩阵是稀疏矩阵,具有稀疏性,将稀疏矩阵技术应用到矩阵拓扑优化中提高拓扑效率。文献[4]针对邻接链表的储存图表示不够直观的缺点,提出了邻接矩阵染色法,使得拓扑过程直观、快速、有效。以上文献通过不同的方法对拓扑过程进行改进优化,也取得不错的效果,但是这些改进均局限于全局拓扑,而未对局部拓扑进行研究。当网络中某个断路器因为配电线路发生故障而导致变位,此时网络的结构可能发生了变化,需要重新拓扑,但直接进行全局拓扑会造成计算资源的浪费。因为变位断路器只影响同电压等级的母线形成^[5],即变位断路器只影响局部网络的拓扑,而非全局网络的拓扑。而且,在正常情况下,配电系统中多个断路器的状态同时发生变化的情况是极少的,就算是调度员进行调度,也不会一次性关断许多断路器,所以局部拓扑的适用范围广。文献[6]针对局部拓扑辨识,提出了树搜索法,以断路器断开的一端母线为起点进行树搜索,但并未考虑联络开关闭合的情况,这样会加大树搜索的难度,而且树搜索法面对配电网中复杂的节点和环网,拓扑时间也会大大加长,拓扑效率较差。因此,针对这些情况,需要对网络的局部拓扑进行研究。

综上所述,下面提出一种改进矩阵算法,将网络的拓扑辨识分为全局拓扑、局部拓扑两个过程,并对两种拓扑辨识分别进行改进。

1 考虑运行状态的全局拓扑辨识

矩阵法的全局拓扑辨识,即对得到的全连通矩阵进行分析,以此来对整个网络进行拓扑辨识。全局拓扑,首先将反映网络中节点-支路连接关系的关联矩阵与它的转置进行一次乘法运算得到邻接矩阵;然后使用邻接矩阵法,即对邻接矩阵进行最多次 $(n-1)$ 的自乘运算(n 为邻接矩阵的阶数),当任意

两次自乘运算得到的结果一致时,停止自乘运算,所得结果就是全局拓扑需要的全连通矩阵;最后对全连通矩阵进行行扫描、母线分析和电气岛分析,进而得到整个网络的拓扑分析。但是,当网络中节点数目非常多的时候,矩阵法需要占用大量的内存资源,而且拓扑速度变慢,拓扑效率变低。所以,要对矩阵法做出如下改进:

1)使用节点消去法代替邻接矩阵法来处理邻接矩阵,即对邻接矩阵中不重要的节点的行和列删除,只留下重要节点,减少邻接矩阵的阶数;

2)对使用节点消去法所求得的连通矩阵直接使用行扫描法,不要求取全连通矩阵。

通过这两个方面对矩阵法进行改进,可以很好地减少运算量,提高拓扑效率。

1.1 关联矩阵

在进行网络拓扑的过程中,可以用关联矩阵来表示网络中的连接情况。关联矩阵是描述网络中节点-支路(或者支路-节点)之间连接情况的矩阵。对于一个包含 n 个节点和 m 条支路的网络,可以用一个 $n \times m$ 阶矩阵 $A = [a_{ij}]$ 来表示,矩阵的每一行对应于网络中的一个节点,矩阵的每一列对应于网络中的一条支路。如图1所示的网络,从物理模型到数学模型的过程中,即从网络到关联矩阵的过程中,应该把网络中的节点作为关联矩阵的行,把网络中的支路作为关联矩阵的列。关联矩阵中的元素 a_{ij} 的取值表示节点 i 与支路 j 的连接情况。 $a_{ij} = 1$,即节点 i 与支路 j 相连接; $a_{ij} = 0$,则节点 i 与支路 j 不相连。

首先,进行全局拓扑的目的是获取整个网络的全局拓扑模型,为之后的局部拓扑提供必要的拓扑信息。所以,网络中所有的支路断路器(除联络断路器、厂站之间的支路断路器以及变压器之外)都默认为处于闭合状态。支路断路器状态矢量 S 为

$$S = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (1)$$

对于图1中网络,关联矩阵 A 为

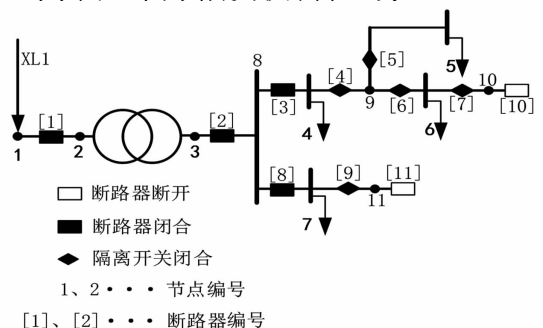


图1 正常的低配电网台区网络

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 邻接矩阵

1.2.1 邻接矩阵与关联矩阵的联系

邻接矩阵是描述网络图中节点-节点之间连接情况的矩阵。对于一个包含 n 个节点的网络,可以用一个 $n \times n$ 阶矩阵 $B = [b_{ij}]$ 来表示。如果两个节点之间通过一条支路直接连接,则 $b_{ij} = 1$, 否则 $b_{ij} = 0$; 而对角线的元素则恒等于 1, 即 $b_{ii} = 1$, 因此邻接矩阵一定是对称矩阵。因为相连节点之间是靠支路来连接的, 所以可以通过反映节点-支路连接关系的关联矩阵来得到相对应的邻接矩阵。对于有个 n 节点、 m 条支路的网络, 关联矩阵与邻接矩阵的运算式为:

$$B = A \cdot A^T \quad (3)$$

$$b_{ij} = \bigcup_{k=1}^m (a_{ik} \cap a_{jk}) \quad (4)$$

式中: A 为节点-支路的关联矩阵; B 为节点-节点的邻接矩阵。

对于图 1 中网络, 邻接矩阵 B 为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2.2 邻接矩阵的简化

在用矩阵法对网络进行拓扑时, 虽然矩阵的数据结构简单, 易于理解, 不受接线方式变化的影响,

适用于复杂的接线网络。但网络中的节点众多, 所形成矩阵的阶数十分大, 这将给存储空间带来巨大的压力, 使邻接矩阵自乘法的运算量呈爆炸式增长, 导致网络拓扑的速度变慢。而网络拓扑就是要求实时性, 所以需要矩阵法进行一些改进。

由于网络拓扑并不需要知道所有节点之间的连接情况, 其目标就是将重要节点(厂站之间的支路节点、变压器节点、供电电源节点、负荷节点)之间的连接情况反映出来。所以可以将剩下的节点消去降低邻接矩阵的阶数, 减轻存储压力, 加快拓扑速度。

若两个节点通过一条支路直接连接, 则称这种连接关系为一级连通关系; 若节点 i 和节点 j 通过节点 k 间接连接, 则称这种连接关系为二级连通关系, 以此类推。

如图 1 所示, 图中有 11 个节点, 其中属于重要节点的有 1、2、3、4、5、6、7, 也就是说, 只需要知道节点 1—7 的连接情况, 其他的节点都可以消去。将矩阵中的元素更新后, 就将矩阵中要消去节点的行和列删去, 则矩阵的阶数降低一阶。节点消去的运算式为

$$b'_{ij} = b'_{ii} = (b_{ik} \cap b_{jk}) \quad (6)$$

式中: b'_{ij} 、 b'_{ii} 为邻接矩阵中更新的元素, 因为邻接矩阵具有对称性; k 为将要被消去的节点; i 、 j 为与节点 k 相连接的节点。

邻接矩阵元素更新后, 将矩阵中的第 k 行、第 k 列删去。

若将节点 8 消去, 根据邻接矩阵 B 可知, 节点 3、节点 4、节点 7 这些重要节点通过节点 8 形成二级连通关系, 所以将节点 8 消去后, 可得矩阵 B' 为

$$B' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将 B' 所有不重要的节点都消去后, 就可得到连通矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 全连通矩阵

所得到的连通矩阵 C 并不是想要得到的全连通矩阵,还需对连通矩阵 C 进行最多 $(n-1)$ 次自乘运算 (n 为连通矩阵的阶数),当任意两次自乘运算的结果都一样时,则得到了全连通矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最后对全连通矩阵进行行扫描、母线分析和电气岛分析。

在上述步骤中,可以将求取全连通矩阵的步骤删去。因为对全连通矩阵进行行扫描,即是对矩阵中行向量的线性相关性进行判别,而这些行向量的线性相关性在所得到的连通矩阵中就已经存在了,而不是在求取全连通矩阵的过程中出现的。所以,可以直接对连通矩阵使用行扫描法。行扫描法的运算式为

$$C'(i) = C'(j) = [C(i) \oplus C(j)] \quad (10)$$

式中: $C(i)$ 、 $C(j)$ 为连通矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $C'(i)$ 、 $C'(j)$ 为连通矩阵中元素更新后的第 i 行行向量、第 j 行行向量。

通过直接对连通矩阵 C 使用行扫描法,就可以进一步减少矩阵法的运算量,减轻存储压力,加快拓扑速度。

通过对网络进行全局拓扑辨识,可以将图 1 网络分为两个部分,在进行母线分析时,每一部分形成一条母线。第一部分是(节点 1、2),编号为母线 1 号;另一部分是(节点 3、4、5、6、7),编号为母线 2 号。在进行电气岛分析时,将变压器以及厂站之间的支路视为闭合支路,即可得到整个网络的连通模型,如图 2 所示。通过观察图 2,发现母线 1 号、母线

2 号形成一个电气岛;然后返回到图 1,可以知道:进线 XL1,通过变压器向负荷 4、5、6、7 供电。

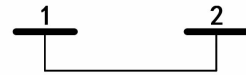


图 2 正常的网络连通模型

2 考虑故障状态的局部拓扑辨识

在网络拓扑的过程中,网络中的支路断路器会因为各种各样的原因,如线路发生故障、断路器本身发生故障、调度员调度等,使得断路器状态发生变化。断路器状态发生变化后,可能会使之前的网络全局拓扑模型发生变化,一般情况下,为了保险起见,只能对整个网络再进行一次全局拓扑。但是,当网络中节点数目太多时,则全局拓扑的速度就会变慢,时效性就比较差。如果能围绕状态发生变化的断路器进行局部拓扑,那么就可以节省拓扑时间,加快拓扑速度。

在网络的拓扑中,每个电气岛中的母线分为一个或几个电压等级,不同电压等级的母线之间是不能通过断路器直接连接的。所以,当网络中某个断路器状态发生变化时,只会对断路器所处电压等级的母线的拓扑造成影响,而不会对不同电压等级的母线造成影响。也就是说,断路器状态发生变化对网络拓扑的影响只是局部的。基于这一点,可以在断路器状态发生变化时,只对网络进行局部拓扑,而不是全局拓扑。这样就可以进一步减少拓扑时间,提升拓扑效率。

2.1 局部拓扑关联矩阵的形成

2.1.1 对关联矩阵进行第 1 次节点消去

在全局拓扑中获得的关联矩阵,如式(2)所示。关联矩阵表示配电网系统中节点-支路的连接关系。根据节点消去法的目的,即将矩阵中不重要的节点消去,降低矩阵的阶数,减少运算量。而关联矩阵中也存在许多不重要的节点,需对其行向量进行节点消去处理。但是对关联矩阵进行节点消去时,对重要节点的定义与邻接矩阵不尽相同,还要加上母线节点,即关联矩阵中的重要节点包括:厂站之间的支路节点、变压器节点、供电电源节点、负荷节点以及母线节点。

对邻接矩阵进行消去时,图 1 中的重要节点为节点 1—7,现在对关联矩阵进行节点消去时,重要

节点还需增加节点8、节点9这两个母线节点,所以需要消去的节点为节点10、节点11。对关联矩阵进行第1次节点消去处理的公式为

$$\mathbf{A}'(i) = [\mathbf{A}(i) \oplus \mathbf{A}(j)] \quad (11)$$

式中: j 为将要被消去的节点; i 为被留下的重要节点; $\mathbf{A}(i)$ 、 $\mathbf{A}(j)$ 为关联矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $\mathbf{A}'(i)$ 为关联矩阵中元素更新后的第 i 行行向量。

关联矩阵元素更新后,将矩阵的第 j 行进行删去处理。

所以,对关联矩阵进行第1次节点消去处理后,可以得到关联矩阵 \mathbf{A}' 为

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.1.2 对关联矩阵进行第2次节点消去

当得到关联矩阵 \mathbf{A}' 后,就可以对这个关联矩阵进行第2次节点消去,将矩阵中的母线节点消去,即将节点8、节点9进行消去处理。对关联矩阵进行第2次节点消去处理的公式为

$$\mathbf{A}''(i) = [\mathbf{A}'(i) + \mathbf{A}'(j)] \quad (13)$$

式中: j 为将要被消去的母线节点; i 为被留下的重要节点; $\mathbf{A}'(i)$ 、 $\mathbf{A}'(j)$ 为关联矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $\mathbf{A}''(i)$ 为关联矩阵中元素更新后的第 i 行行向量。

关联矩阵元素更新后,将矩阵的第 j 行进行删去处理。

所以,对关联矩阵进行第2次节点消去后,可以得到关联矩阵 \mathbf{A}'' 为

$$\mathbf{A}'' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

关联矩阵 \mathbf{A}'' 的行代表网络中的重要节点,列代表网络中的支路断路器。矩阵任意一行中,元素值不为0且相等的行,表示支路断路器与这些节点直接相连,以矩阵的第1列为例,断路器[1]处于关断状态时,节点1与节点2断开连接;矩阵任意一行中,元素值不为0且不相等的行,元素值最大的行表示与支路断路器直接相连的节点,以矩阵的第2列为例,断路器[2]处于关断状态时,节点3与节点4之间、节点3与节点7之间断开连接。

2.2 局部拓扑关联矩阵的使用

配电网系统中任意一个断路器都可能会因为各种各样的原因导致断路器状态发生改变,进而可能导致系统的拓扑发生变化,这时可以通过遥信获取故障断路器的信息,根据局部拓扑关联矩阵,针对变位断路器进行一次局部拓扑即可。

2.2.1 获取变位断路器信息

假设图1的网络出现异常情况,网络中断路器[3]、断路器[4]状态发生改变,从闭合状态变为关断状态,如图3所示。

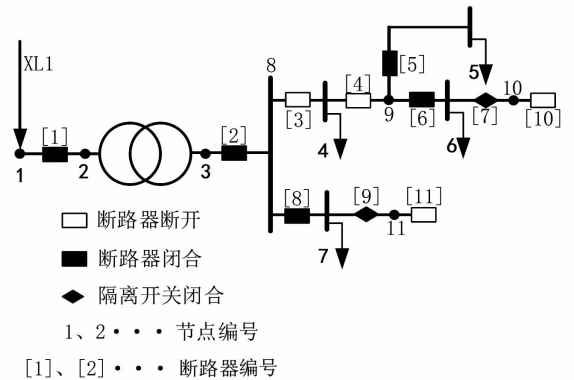


图3 异常的配电网台区网络

通过遥信获取的当前网络支路断路器状态矢量 \mathbf{S}' 为

$$\mathbf{S}' = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (15)$$

通过与初始支路断路器状态矢量 \mathbf{S} 形成对比,很容易发现网络中的断路器[3]、断路器[4]状态发生变化。

2.2.2 获取变位断路器连接信息

当知道网络中断路器[3]、断路器[4]状态发生变化后,可通过局部拓扑关联矩阵 \mathbf{A}'' ,获取变位断路器的连接信息。

由变位断路器[3]对应矩阵的第3列,可知节点4与节点3之间、节点4与节点7之间断开连接;由变位断路器[4]对应矩阵的第4列,可知节点4

与节点5之间、节点4与节点6之间断开连接。

2.2.3 对连通矩阵进行局部修改

当知道变位断路器的连接信息后,就可以根据所得到的信息,对连通矩阵 C (如式(8)所示)进行局部修改,得到修改后的连通矩阵 C' 为

$$C' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.2.4 对连通矩阵直接进行矩阵行扫描

由于连通矩阵 C' 与全连通矩阵 T' 相同,所以直接对连通矩阵 C' 进行母线分析,可以将图3网络分为4部分。第1个部分为(节点1,2),编号为母线1号;第2部分为(节点3,7),编号为母线2号;第3部分为(节点4),编号为母线3号;第4部分为(节点5,6),编号为母线4号。进行电气岛分析,即可得到断路器[3]、断路器[4]状态发生变化的异常网络连通模型,如图4所示。通过观察图4,发现母线

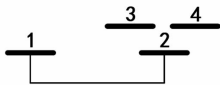


图4 异常的网络连通模型

1号、母线2号形成一个电气岛,母线3号和母线4号分别形成一个电气岛;然后返回到图3,可以知道:进线XL1,通过变压器,向负荷7供电;负荷4连接的配电线路可能发生故障,所以被隔离开来,需要电力部门进行检修;负荷5、负荷6处于停电状态,调度员可以根据局部拓扑关联矩阵 A'' ,对最近的联

络开关(断路器[10])进行道闸操作,恢复供电,保证供电的可靠性。

通过局部拓扑辨识,可以发现网络中断路器状态发生变化,只会影响电压等级相等的母线,而不会影响到电压等级不相等的母线,所以,当网络中断路器状态发生变化时,对网络进行局部拓扑是可行的。通过局部拓扑来代替全局拓扑,可以大大提高网络拓扑的效率。

3 算例分析

如图5所示的配电网台区网络,该配电网台区网络中包含45个节点、47个断路器。首先,对该网络进行全局拓扑,全局拓扑流程如图6所示。

然后,将节点消去法的运算量与邻接矩阵法的运算量进行对比。其中邻接矩阵法在最坏的情况下需要进行 $(n-1)$ 次自乘运算,所以对于图5中的网络,邻接矩阵法的最大运算量为4 009 500次。但是通过仿真可知,邻接矩阵法只需要进行20次自乘运算即可得到全连通矩阵,则邻接矩阵法的实际运算量为1 822 500次。图5中的网络,有13个重要节点,即节点1—13,所以利用节点消去法将其余的节点消去。

表1列出了针对图5的网络求取全连通矩阵所用方法的运算量。

表1 邻接矩阵法与节点消去法运算量的比较

网络中重要节点数	邻接矩阵法运算量	节点消去法运算量	两种运算量比例
13	1 822 500	25 801	70.7:1

注:一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

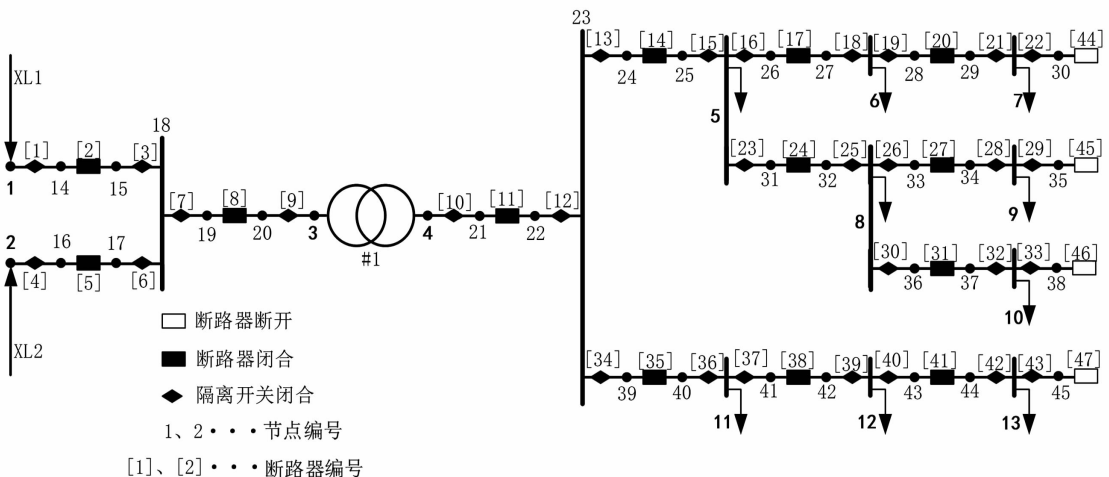


图5 配电网台区网络

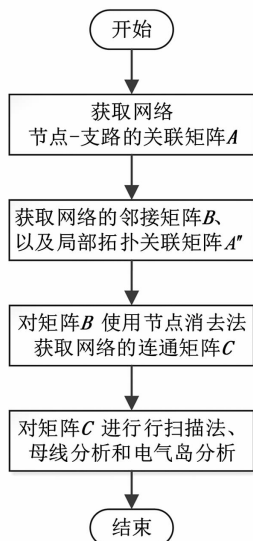


图6 全局拓扑流程

表2列出了采用节点消去法所获得的连通矩阵 C 用不同的方法进行母线分析和电气岛分析的运算量。

表2 间接行扫描法与直接行扫描运算量的比较

连通矩阵	自乘及行扫描法	直接行扫描法	运算量比例
C	11 258	1248	9.02:1

注:一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

表3列出了求取局部拓扑关联矩阵 A'' 时,第1次节点消去以及第2次节点消去的运算量。针对图5网络,第1次节点消去需要将除重要节点1—13以及母线节点18和母线节点23之外的节点消去;第2次节点消去再将母线节点18、母线节点23消去。

表3 关联矩阵节点消去法运算量

关联矩阵	第一次节点消去法	第二次节点消去法	总运算次数
A	20 445	1269	21 714

注:一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

全局拓扑完毕后,针对网络中状态发生变化的断路器进行局部拓扑,局部拓扑的流程如图7所示。

表4列出了针对图5网络中断路器状态发生变化时,进行全局拓扑、局部拓扑仿真得到准确结果所用的时间。

表4 全局拓扑与局部拓扑的仿真时间

拓扑类型	仿真时间/ms
全局拓扑	65
局部拓扑	25

通过仿真结果,节点消去法相对于邻接矩阵法,可以减少许多的运算量;直接对连通矩阵使用行扫描法是可行的,相对于连通矩阵自乘获取全连通矩阵再进行行扫描来说,也可以减少一定的运算量;针

对图5中的网络使用局部拓扑所用的时间是全局拓扑的1/3左右,使拓扑的效率更高了。

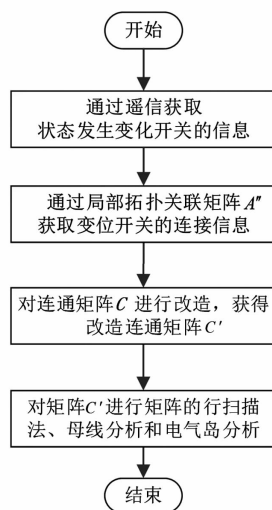


图7 局部拓扑流程

4 结 语

对配电网台区用矩阵法进行拓扑辨识,针对矩阵法拓扑辨识存在的运算量大、拓扑效率低的问题,提出了解决方案。通过全局拓扑、局部拓扑两个方面来解决这些问题。针对以往全局拓扑中最耗时的邻接矩阵法,选择用节点消去法来替代;然后,对从全连通矩阵到行扫描法、母线分析和电气岛分析的过程进行简化;最后,针对关联矩阵进行两次节点消去,获取局部拓扑关联矩阵,大大减小了全局拓扑运算量。全局拓扑后,在网络中断路器状态发生变化时,对断路器进行局部拓扑,虽然仿真结果显示局部拓扑用时是全局拓扑的1/3左右,效果并不算特别好,这是由于所选网络节点数少以及网络结构简单所导致的。如果选用节点数多、结构复杂的网络,则全局拓扑时间会大大加长,这时,局部拓扑的优势就能体现出来了。

参考文献

- [1] 王健,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(2): 117-122.
- [2] 郭帅文,燕跃豪,蒋建东,等. 基于邻接矩阵的网络拓扑辨识算法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12): 50-56.

2012、IEEE 605—2008、IEC 61597—1995 等 5 个规程规范给出的交流导体载流量计算方法及其计算结果,重点对比不同的对流散热功率计算方法。分析表明,对于适用于户外导体的强迫对流散热功率,IEEE 738—2012 给出的计算方法综合考虑了温度、海拔等因素的影响,比《电气一次设计手册》计算方法更为完备,而根据其原理修正的《电气一次设计手册》计算方法的计算结果则最为保守。考虑 IEEE 738—2012 不适用于外径大于 150 mm 的导体,结合国内工程设计实际情况,建议采用修正的《电气一次设计手册》计算方法计算换流站户外导体载流量。对于适用于户内导体的自然对流散热功率,导体外径大于 100 mm 时采用 IEEE 738—2012 计算方法更保守;导体外径小于等于 100 mm 时,采用 DL/T 5222—2005 计算方法更保守。相关研究结论可供涉外工程设计及换流站导体选择设计相关规程规范的编制参考使用。

参考文献

[1] 水利电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,1989.

(上接第 26 页)

- [3] 王惠中,朱宏毅,张茨,等. 稀疏矩阵在电网网络拓扑分析中的应用与研究[J]. 电网与清洁能源,2014,30(12):1-4.
- [4] 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.
- [5] 朱文东,刘广一,于尔铿,等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术,1996,20(3):30-33.
- [6] 苏义荣,邱淘西,邱家驹. 配电网拓扑分析方法的研究[J]. 浙江电力,2001,20(5):10-14.
- [7] 李盟,秦立军,郭庆,等. 基于 CIM 模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22.
- [8] 王明鸣,孟相如,李纪真,等. 基于着色树优化的网络并发链路故障快速恢复方法[J]. 计算机应用研究,2015,32(6):1822-1825.
- [9] 王小飞,胡志坚,吴方劼,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.
- [10] 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(23):1-5.
- [11] 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.

- [2] 导体和电器选择设计技术规定:DL/T 5222—2005[S],2005.
- [3] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors:IEEE 738-2012[S],2012.
- [4] IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations:IEEE 605-2008[S],2008.
- [5] Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors:IEC 61597-1995[S],1995.
- [6] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors:IEEE 738-2006[S],2006.
- [7] 邱岭. 导体载流量计算:导体及电气设备选择文集(第三集)[C]. 北京:全国电气工程标准技术委员会导体及电气设备选择分委员会,1999.
- [8] 刘士樟. 铝绞线钢芯铝绞线交直流电阻及载流量的计算[J]. 电线电缆,1988(6):6-12.
- [9] 王飞,张浏骏,许佩佩,等. 海拔高度对变频器散热影响的研究[J]. 电子机械工程,2016,32(1):9-15.
- [10] 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

作者简介:

韩毅博(1991),男,硕士,工程师,主要从事换流站和变电站的设计研究工作。 (收稿日期:2021-04-27)

- [12] 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.
- [13] 黄佳乐,杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.
- [14] 徐彪,尹项根,张哲,等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):152-161.
- [15] 卢虹宇,蔡月明,刘明祥,等. 低压配电台区拓扑辨识及校核方法[J]. 电气自动化,2020,42(3):95-98.
- [16] 蒋玮,汤海波,祁晖,等. 基于集成深度神经网络的配电网联络关系辨识技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):101-108.

作者简介:

曾顺奇(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

吴杰康(1965),男,工学博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等;

李欣(1981),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

刘国新(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制、冷热电联供运行优化等。

(收稿日期:2021-04-02)