

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181519

用于大规模电磁暂态模型自动生成的拓扑分层识别方法

唐伦¹, 丁理杰¹, 史华勃¹, 罗彬², 夏春³, 陈刚¹, 王曦¹, 孙昕炜¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610200;
3. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041)

摘要: 电力系统拓扑自动识别是实现大规模电力系统电磁暂态可视化仿真模型自动生成的重要基础。现有算法大多局限于单层拓扑描述, 难以满足大规模电磁暂态模型自动生成对模型分层清晰布局、模块化建模的应用需求。针对该问题提出一种基于关联矩阵压缩和支路指针矢量更新的电力系统拓扑分层识别方法。该方法避免了大量的图搜索和逻辑运算, 实现了基于大规模数据源的厂站节点搜索和“站间拓扑+站内拓扑”的自动分层识别, 为后续站点自动布局和元件参数自动映射工作提供拓扑基础。对简化系统算例和西南电网实际大规模系统算例进行算法测试分析, 验证了所提方法的正确性及适应性。算法可直接应用于省级或区域级复杂电力系统的拓扑分层识别及可视化模型自动生成工作。

关键词: 大规模电力系统; 模型自动生成; 拓扑分层识别; 关联矩阵; 支路指针矢量

Topology hierarchical identification method for automatic model generation of large-scale electromagnetic transient simulation

TANG Lun¹, DING Lijie¹, SHI Huabo¹, LUO Bin², XIA Chun³, CHEN Gang¹, WANG Xi¹, SUN Xinwei¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610200, China; 3. Southwest Subsection of State Grid, Chengdu 610041, China)

Abstract: Power system topology automatic identification is the important foundation of automatic visual model generation of electromagnetic transient simulation for large-scale power system. Most traditional algorithms for power system topology identification are limited to single-tier description, which is hard to meet the demands of hierarchical clear layout and modular modeling in large-scale automatic electromagnetic transient modeling. Therefore, a new method of power system topology hierarchical identification based on the compression of incidence matrix and the update of branch pointer vector is proposed in this paper. This method realizes automatic search of substation nodes and hierarchical identification of ‘inter-station topology + in-station topology’ based on large-scale data source, without massive graph search and logical operation, and lays a topology foundation for subsequent work of automatic substation layout and element parameter mapping. The method is tested on a simplified system case and the actual large-scale system case of Southwest Grid of China, with its validity and adaptability verified. The method proposed can be used directly in automatic topology hierarchical identification and visual modeling of complex power system in provincial or regional scale.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905200).

Key words: large-scale power system; automatic model generation; topology hierarchical identification; incidence matrix; branch pointer vector

0 引言

电磁暂态仿真是现代电力系统分析的必要手段。由于大规模电磁暂态建模工作量大、易出错,

利用已有机电暂态仿真数据自动生成电磁暂态仿真的基础数据文件和可视化仿真模型, 成为提高建模效率和准确性的有效方法。目前主流电磁暂态仿真程序(如 PSACD、ADPSS 等)均具备仿真数据的单线图交互及模块化封装功能, 当仿真节点数较少时, 仿真模型可用单线图清晰展示, 但在实际大规模电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905200)

磁暂态仿真时, 由于其节点数较多, 单线图将相互交织、难以清晰布局, 往往需按实际厂站对仿真节点进行封装, 以形成清晰的站间布局和站内布局。因此, 在模型自动生成时, 为保证生成的电磁暂态模型布局清晰、层次清楚、修改便捷, 有必要从大规模电网仿真数据中自动识别出所有节点的厂站归属、站内设备连接关系以及厂站之间的拓扑连接, 并根据“站间拓扑+站内拓扑”的分层结构进行厂站布局和参数映射。

电力系统“站间拓扑+站内拓扑”的分层识别问题, 本质上可归结为图的拓扑分析和连通片辨识问题。传统的拓扑分析算法一般包括图论搜索法^[1-9]、邻接矩阵法^[10-14]、关联矩阵法^[15-20]或其混合与改进算法^[21-24]。图论搜索法一般基于链表关系, 通过对节点路径的追踪实现对节点连通性的分析, 主要包括深度优先搜索^[4-7]和广度优先搜索算法^[8-9]。这类算法易于理解, 但在节点规模较大时搜索过程将变得较慢, 甚至陷入深度无限。邻接矩阵法将拓扑关系描述为节点之间的邻接关系, 通过矩阵的逻辑运算实现连通片的划分, 主要有行扫描法^[11]、行累加法^[11]、矩阵自乘法^[12]、平方法^[14]等。这类算法计算过程直观, 但需进行大量的逻辑运算。关联矩阵法利用回路-支路关联矩阵^[15-16]或支路-节点关联矩阵^[17-20]进行拓扑分析, 以实现拓扑结构中支路割集的完整辨识。文献[19]提出一种基于支路-节点关联矩阵 LU 分解的拓扑分析新型算法, 通过对关联矩阵 LU 分解后的上三角矩阵 U 进行节点换序、邻接辨识和节点归并计算, 可实现连通片的划分, 但归并计算较为繁琐。以上算法均限于网络的单层拓扑识别, 未涉及如何将站间拓扑和站内拓扑分层识别和布局的问题。文献[20]提出一种厂站拓扑和网络拓扑两级拓扑分析方法, 但其网络拓扑包含所有有阻抗元件的拓扑, 仅起到简化短接线的的作用, 无法将站间拓扑和站内拓扑区分开。文献[25]提出一种配电网分层拓扑模型, 但其研究对象为辐射型的中压配电网, 不适用于大规模复杂主网拓扑辨识。因此, 上述传统方法均难以直接适应现代大规模电磁暂态模型自动生成工作中电网拓扑分层识别的分析需要。

本文在文献[19-20]的基础上, 结合大规模电磁暂态模型自动生成的应用需求, 提出一种基于支路-节点关联矩阵压缩与支路指针矢量更新的电力系统拓扑分层识别方法。该算法避免了大量的图搜索和逻辑运算, 通过关联矩阵的压缩和支路指针矢量的更新即可快速实现站间拓扑及站内拓扑的分层识别, 可广泛应用于以分层拓扑分析为基础的各项电力系统计算任务。

下文先给出拓扑分层识别涉及的拓扑模型及其描述, 在此基础上给出基于支路-节点关联矩阵的连通片辨识算法, 进而给出适用于大规模电磁暂态模型自动生成的电力系统拓扑分层识别方法, 最后分别用 9 节点简化系统算例和西南电网实际大规模系统算例验证所提算法的正确性和适应性。

1 拓扑模型及描述

1.1 拓扑模型

电力系统拓扑的基本模型^[20]是元件和节点。元件对应电气设备, 按其端点数划分为单端点元件和双端点元件(含可等效为双端点元件的多端点元件)。单端点元件挂接在单个节点上, 如发电机、负荷、并联补偿器等; 双端点元件跨接在两个节点之间, 如变压器、线路、断路器、隔离开关等。也可按其阻抗分为有阻抗元件(线路、变压器等)和零阻抗元件(断路器、隔离开关等)。节点可分为电气节点和逻辑节点, 电气节点指实际存在元件间的物理连接点, 逻辑节点是指非实际存在但在某种逻辑意义上存在的节点。本文为分析需要, 将属于同一个发电厂或变电站的所有节点归并为一个厂站逻辑节点, 简称厂站节点或站点。

拓扑结构表示节点之间或节点与元件之间的连接或关联关系。厂站是一片不包含任何输电线路元件的连通区域^[20], 厂站内部的拓扑称为站内拓扑, 厂站之间的拓扑称为站间拓扑。本文中全拓扑结构是指由所有电气节点和全部元件确定的拓扑结构, 是包含了完整拓扑信息的单层拓扑结构; 下层拓扑结构是指由所有电气节点和非输电线路元件确定的拓扑结构, 任一站内拓扑结构是其子拓扑。上层拓扑结构是指由所有厂站逻辑节点和输电线路元件确定的拓扑结构, 即站间拓扑结构。

图 1 所示是一个简化电力系统的全拓扑结构模型, 图中 $v_1 \sim v_9$ 表示 9 个电气节点, 其中节点 v_1 、 v_2 上分别挂接一台发电机, 节点 v_8 、 v_9 上分别挂接一个负荷和一组并联电容器; 图中(1)~(9)表示 9 个双

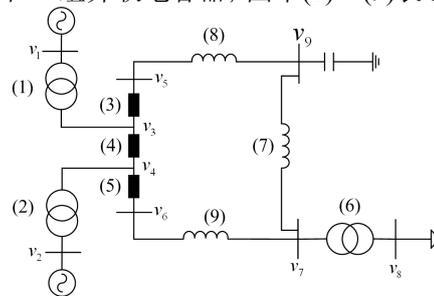


图 1 简化电力系统的全拓扑模型

Fig. 1 Topology model of a simplified power system

端点元件, 其中(1)、(2)、(6)为变压器, (3)、(4)、(5)是零阻抗元件, (7)、(8)、(9)为输电线路。

1.2 拓扑描述

若将元件和节点抽象为图论中支路(注: 其中单端点元件对应图论中的环, 本文中对其另行单独处理)和节点, 可用矩阵描述其拓扑结构。图的矩阵描述^[26]分为关联矩阵和邻接矩阵两类。本文拓扑分析算法基于支路-节点关联矩阵进行, 因拓扑布局等需要, 部分搜索结果的表达采用邻接矩阵。

若将电网抽象为无向图 $G(V, E, S)$, 其中标定顺序的集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 、 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 、 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 分别表示网络中的节点集、支路集、支路赋权集。支路赋值为 0 和 1 时分别表示移除和保留该支路, 其中移去支路时保留相关节点。两种矩阵描述的定义如下所述。

定义 1 支路-节点关联矩阵 R

支路-节点关联关系是在 S 的状态下 E 到 V 上的一个二元关系, 用 $m \times n$ 阶矩阵 R 表示, 当支路 i 和节点 j 相关联, 记为 1, 否则记为 0, 即

$$r_{i,j} = \begin{cases} 1, & i \in j \\ 0, & i \notin j \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$, $i \in j$ 表示支路 i 和节点 j 相关联。

可见, 支路-节点关联矩阵的每一行仅有两个非零元素, 分别对应支路两端的节点; 全为零的列对应孤立节点。为表述方便, 下文又简称之为关联矩阵。

定义 2 邻接矩阵 A

节点的邻接关系是 E 到 E 自身的一个二元关系, 用 $n \times n$ 阶矩阵 A 表示, 当节点 i 和节点 j 相连接, 记为 1, 否则记为 0, 即

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & i \in j \\ 0, & i \notin j \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, n$ 。 $i \in j$ 表示节点 i 和节点 j 相连接。特别地, 当节点 i 和节点 j 之间由 n 重边(对应 n 回并列元件)相连时, 令 $a_{i,j} = n$; 邻接矩阵的对角元素 $a_{i,i}$ 可用于表达节点 i 关联的环(对应单端点元件), 其值由元件类型编号确定。

2 基于关联矩阵的网络连通片辨识算法

通过电力系统网络拓扑分析算法实现网络中连通片的辨识是本文方法的核心和基础。因此本节先提出一种基于关联矩阵的网络连通片辨识算法, 以此为基础的完整拓扑分层识别方法在第 3 节给出。

设 $m \times n$ 阶矩阵 R 是图 $G(V, E, S)$ 的支路-节点关联矩阵, 则其具有以下特点。

1) R 中的每一行, 实际上都确定了两个节点之间的一对连通关系, m 行则确定了 m 对节点的连通关系, 可自然地构成 m 个二元连通集合, 集合内的成员节点相互连通。

2) R 的每一列, 则确定了部分二元连通集合之间的连通关系, 这些连通关系的纽带是它们共同包含的该列对应的节点。通过遍历每一列, 可使二元连通集合之间逐渐融合增长, 得到最终的连通片集合。

3) 一般地, R 可能包含零列, 零列所对应的节点不与任何支路相关联, 因而为孤立节点。

根据以上特点, 可采取以下方法进行连通片的辨识: 首先搜索关联矩阵的零列, 辨识孤立节点; 然后对关联矩阵按行进行“压缩”, 仅保留非零元素的列标, 得到 m 个二元连通集合; 最后对关联矩阵进行列扫描, 逐渐进行连通集合的融合增长, 从而获得最终的连通片集合。

下面分述这几个步骤。

2.1 孤立节点的搜索

关联矩阵按列分块^[27]可写为

$$R = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n] \quad (3)$$

扫描列向量 $r_i (i=1, 2, \dots, n)$, 若 $r_i = 0$, 则节点 v_i 为孤立节点。孤立节点的搜索可在算法始初进行, 为避免重复搜索, 也可在下述列扫描过程顺带完成。

2.2 二元连通集合的生成

对关联矩阵的第 k 行进行扫描, 若该行非零元素分别为 r_{kp} 、 r_{kq} , 则支路 e_k 对应的二元连通集合为 (p, q) 。所有支路的二元连通集合形式如下。

$$e_k \begin{bmatrix} \vdots \\ (p, q) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

二元连通集合可视关联矩阵按行进行压缩所得, 其仅保留非孤立节点之间的连接信息。

2.3 支路指针矢量的更新

得到二元连通集合后, 若对支路-节点关联矩阵的第 q 列进行扫描, 假设该列的非零元素分别为 r_{kq} 、 r_{yq} , 则支路 e_k 和支路 e_y 所对应的二元连通集合 (p, q) 和 (s, q) 可合并为一个新的连通集合 (p, q, s) 。

为避免在每次列扫描后都进行集合间的合并操作, 同时又可记录当前二元连通集合之间的连通信息, 可定义一个 $m \times 1$ 阶的支路指针矢量 $Z = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$, Z 中每个元素表示相应二元连通集合(或支路)当前指向的连通片号。其初始值为 θ ,

在每次列扫描后进行一次更新, 连通片号与当前扫描列的列标保持一致, 显然, 指向相同连通片号的二元连通集合之间相连通。

假设在对关联矩阵的第 j 列进行扫描时, 该列非零元素的行标按升序排列为 (h_1, h_2, \dots, h_i) , 则支路指针矢量的更新策略如下:

- 1) 检查当前 e_{h_i} 支路对应的支路指针矢量 \mathbf{Z} 的第 h_i 个分量 z_{h_i} 是否为 0, 若 z_{h_i} 为 0, 则令 $z_{h_i} = j$;
- 2) 若 z_{h_i} 不为 0, 则将支路指针矢量 \mathbf{Z} 中所有等于 z_{h_i} 的分量全部置为 j , 即 $z_i = j$, 其中 i 是所有满足 $z_i = z_{h_i}$ 的行标;
- 3) 对 $h_2 \sim h_i$ 重复步骤 1) 和步骤 2)。

支路指针矢量的更新策略是网络连通片辨识算法的关键和核心。

2.4 二元连通集合的合并

支路指针矢量更新结束后, 将指向相同连通片号的二元连通集合取并集, 可得 E 个新的连通集合 L_i , 其中 $i=1, 2, \dots, E$, 这些集合内的节点之间相互连通、集合之间互不连通, 每一集合即为初始拓扑中一个独立的连通片。因此完成二元连通集合的合并即实现了网络中连通片的划分和辨识。

3 适用于大规模电磁暂态模型自动生成的拓扑分层识别方法

在进行大规模电磁暂态模型自动生成时, 鉴于所依据数据源的差异性, 首先需对源数据进行预处理, 以获得统一结构的全拓扑信息和节点信息。然后, 从全拓扑结构中移除输电线路支路, 可得到若干彼此孤立的连通片, 显然, 每一个连通片即代表一个厂站逻辑节点。利用第 2 节所述连通片辨识方法可完成厂站逻辑节点的搜索, 进而实现站内拓扑和站间拓扑的识别和描述。

下面先简要介绍源数据预处理过程, 再给出厂站逻辑节点搜索的具体方法, 以及站内和站间拓扑识别的具体方法及数学描述。

3.1 源数据的预处理

电磁暂态模型自动生成的数据源常为已有机电暂态仿真数据(PSASP/BPA/PSSE 等数据形式), 其预处理过程主要包括以下几个部分。

1) 全拓扑信息的拼合。由于机电暂态仿真数据常采用“多数据表/卡”数据结构, 使得描述电力系统拓扑的完整信息分散在不同的数据表中, 以 PSASP 7.3 格式数据为例, 系统全拓扑信息分散于“交流线表”、“变压器表”、“直流线表”等多张数

据表中, 故需将这些数据表中所包含的拓扑信息自动拼合, 以获得完整的全拓扑结构。

2) 支路类型的解构。为便于站内拓扑识别及元件参数映射, 还需给出全拓扑结构中每条支路的元件类型。因此需基于支路阻抗信息、节点电压及其他特征进行综合判断, 将原始支路自动解构为交流输电线、短接线、两绕组变压器、三绕组变压器、串联电抗器、串联电容器、高压并联电抗器、低压并联电抗器、低压并联电容器等支路, 并进行标记。具体解构方法视源数据特点而定, 此处不予赘述。

3) 单端点元件的处理。由于关联矩阵仅描述双端点元件拓扑, 单端点元件的识别需单独处理。根据节点上单端点元件的挂接情况, 将节点分为发电机节点、负荷节点、并联补偿节点、联络节点和复合节点, 其中联络节点不挂接单端点元件, 复合节点挂接两个及以上单端点元件。单端点元件的相关信息可写入节点数据表予以记录。

4) 孤岛搜索及处理。对于原始全拓扑中可能含有孤岛的情况, 可先运用第 2 节方法进行连通片辨识, 搜索出原始拓扑中的孤岛, 再选取最大连通片作为 3.2—3.4 节的初始拓扑。

综上, 通过预处理过程, 可将不同的数据源整理生成用作拓扑分析的统一数据结构: 全拓扑信息表 \mathbf{T} 和节点信息表 \mathbf{F} 。其中全拓扑信息表隐含了所有节点间的拓扑关系及双端点元件的支路类别、原始编号等信息; 节点信息表包含了所有节点的额定电压、编号等信息及单端点元件的挂接情况。

3.2 厂站逻辑节点搜索

厂站逻辑节点搜索不仅需从大规模数据节点中辨识出哪些节点属于同一个厂站、有多少个厂站, 还需判定厂站电压等级、厂站类别等信息并进行厂站自动命名, 是拓扑分层识别的关键步骤。

厂站逻辑节点搜索的步骤如下:

1) 根据全拓扑信息表 \mathbf{T} 生成描述全拓扑结构的关联矩阵 \mathbf{R}_0 。

2) 从关联矩阵 \mathbf{R}_0 中将输电线路支路移除, 得到描述下层拓扑的关联矩阵 \mathbf{R}_1 。

3) 利用第 2 节所提算法对关联矩阵 \mathbf{R}_1 进行连通片辨识, 搜索出所有厂站逻辑节点, 并形成图 2(a) 所示的电气节点-站点对应表。

4) 搜索站内节点类型, 如存在发电机节点, 则站点归为发电厂, 否则归为变电站; 搜索站内节点的最高电压等级, 令其为厂站电压等级; 然后根据特定规则对站点进行自动命名, 即可形成如图 2(b) 所示的站点信息表。

原始节点名	对应站点名
Node	Station
SA500-1	SA 500 kV
SA500-1B	SA 500 kV
SA66-1	SA 500 kV
...	...

Station	baseV	Type	sNum	NodesContained
SA500	525	变电站	1	SA500-1, SA500-1B, SA66-1
GA220	230	发电厂	2	GA1#, GA2#, GA220
...

图2 节点-站点对应表及站点信息表

Fig. 2 Schematic diagram of node-station mapping table and station table

为便于下文描述,假设通过对 $m \times n$ 阶 \mathbf{R}_1 的连通片辨识,共搜索出 M 个站点,其中站点 S_i 包含 s 个电气节点,节点编号记为 $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is})$ 。

3.3 站内拓扑识别及描述

厂站逻辑节点搜索可给出每个站点内部的成员节点,但站内元件类型及其连接关系仍需通过进一步站内拓扑识别获得,有时根据需要还需简化站内短接线等零阻抗支路,得到不含零阻抗支路的站内拓扑,具体方法如下。

3.3.1 站内全拓扑识别

站点 S_i 的站内拓扑关系可直接从下层拓扑关联矩阵 \mathbf{R}_1 中选取相关行和列得到,选取 \mathbf{R}_1 中与站内节点相关的第 v_{i1} 、 v_{i2} 、 \dots 、 v_{is} 列,构成子关联矩阵:

$$\mathbf{R}_{i1} = \begin{bmatrix} r_{v_{i1}} & r_{v_{i2}} & \dots & r_{v_{is}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

移除 \mathbf{R}_{i1} 中的零行(假设有 $(m-t)$ 条),即可得到描述站点 S_i 站内拓扑的 $t \times s$ 阶站内关联矩阵:

$$\mathbf{R}'_{i1} = \begin{bmatrix} r'_{v_{i1}} & r'_{v_{i2}} & \dots & r'_{v_{is}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

在此基础上,选取全拓扑信息表 \mathbf{T} 中与站内支路相关的 t 行,形成站点 S_i 的站内双端点元件信息表 \mathbf{T}'_{i1} ; 选取节点信息表 \mathbf{F} 中与站内节点相关的 s 行,形成站点 S_i 的站内单端点元件和节点信息表 \mathbf{F}'_{i1} 。

站内关联矩阵 \mathbf{R}'_{i1} 与信息表 \mathbf{T}'_{i1} 、 \mathbf{F}'_{i1} 一起,即可完整描述站点 S_i 内部的拓扑、支路和节点信息。

3.3.2 零阻抗支路简化处理

对于需简化站内零阻抗支路的情况,可先从站内关联矩阵 \mathbf{R}'_{i1} 中选取所有零阻抗支路所在的行,构成零阻抗支路-节点关联矩阵 \mathbf{R}'_{i0} ,基于 \mathbf{R}'_{i0} 可得仅含零阻抗支路的连通片(设共有 d 个),其中第 k 个零阻抗支路连通片包含节点 v_{ikm} 、 v_{ikn} 、 \dots 、 v_{ikp} ,将 \mathbf{R}'_{i1} 中对应的列(第 v_{ikm} 、 v_{ikn} 、 \dots 、 v_{ikp} 列)进行逻辑或运

算(记为 \parallel),合成列向量 \mathbf{rr}'_k :

$$\mathbf{rr}'_k = r'_{v_{ikm}} \parallel r'_{v_{ikn}} \dots \parallel r'_{v_{ikp}} \quad (7)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, d$ 。用 \mathbf{rr}'_k 替换站内关联矩阵 \mathbf{R}'_{i1} 中的列 $r'_{v_{ikm}}$ 、 $r'_{v_{ikn}}$ 、 \dots 、 $r'_{v_{ikp}}$,并移除站内关联矩阵中零阻抗支路所在的行,即得到不含零阻抗支路的站内关联矩阵 \mathbf{R}''_{i1} 。简化零阻抗支路后,相当于将原零阻抗支路连通片中的若干节点替换为一个新的简化节点,对应修改信息表 \mathbf{T}'_{i1} 、 \mathbf{F}'_{i1} ,得到 \mathbf{T}''_{i1} 、 \mathbf{F}''_{i1} ,即可得到简化后站内拓扑的完整描述。

3.4 站间拓扑识别及描述

完成厂站逻辑节点搜索和站内拓扑识别后,需进一步识别厂站之间的连接关系,方法如下。

在全拓扑结构的关联矩阵 \mathbf{R}_0 中,将站点 S_i 所有站内节点对应的列(第 v_{i1} 、 v_{i2} 、 \dots 、 v_{is} 列)进行逻辑或运算,合成列向量 \mathbf{P}_i ,即

$$\mathbf{P}_i = r_{v_{i1}} \parallel r_{v_{i2}} \dots \parallel r_{v_{is}} \quad (8)$$

不同厂站节点对应的合成列向量组成矩阵:

$$\mathbf{R}'_2 = [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \dots \quad \mathbf{P}_M] \quad (9)$$

移除 \mathbf{R}'_2 中的非输电线路支路,即得到输电线路支路与厂站节点之间的关联矩阵 \mathbf{R}_2 。

为便于厂站节点的自动布局,站间拓扑用邻接矩阵 \mathbf{A}_2 描述, \mathbf{A}_2 可由关联矩阵 \mathbf{R}_2 直接转换生成,其中邻接矩阵的非零元素用以记录站间线路回数。

$$a_{ij} = \begin{cases} n, & i \in j \\ 0, & i \notin j \end{cases} \quad (10)$$

式中, n 表示节点 i 与节点 j 相连线路的回数, $i \in j$ 表示节点 i 与节点 j 相连, $i \notin j$ 表示节点 i 与节点 j 不相连。

至此,适用于大规模电磁暂态模型自动生成的电力系统拓扑分层识别工作完成。站点间的拓扑由邻接矩阵 \mathbf{A}_2 确定,站内拓扑由关联矩阵 \mathbf{R}'_{i1} 与信息表 \mathbf{T}'_{i1} 、 \mathbf{F}'_{i1} (或关联矩阵 \mathbf{R}''_{i1} 与信息表 \mathbf{T}''_{i1} 、 \mathbf{F}''_{i1}) 确定,其中 $i = 1, 2, \dots, M$ 。由于关联矩阵为稀疏矩阵,在算法处理中可运用稀疏技术^[28-29]进行运算加速。

4 算例分析

为验证所提方法的正确性及对实际系统的适应性,下面分别对 9 节点简化系统算例及西南电网实际大规模系统算例进行测试分析。

4.1 简化系统算例

对图 1 所示 9 节点简化系统进行分析。限于篇幅,分析过程中略过数据预处理过程,直接基于关联矩阵阐明拓扑分层识别的方法。为便于描述,在

矩阵(或矢量)的右侧(或左侧)标注每一行对应的支路, 在其上方标注每一列对应的节点或列属性。

4.1.1 厂站逻辑节点搜索

图 1 所示的 9 节点系统包含 9 个电气节点和 9 条支路, 其全拓扑结构的支路-节点关联矩阵 \mathbf{R}_0 为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 & \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & e_1 \\ & e_2 \\ & e_3 \\ & e_4 \\ & e_5 \\ & e_6 \\ & e_7 \\ & e_8 \\ & e_9 \end{matrix} \quad (11)$$

从上述矩阵中移除输电线路支路 e_7 、 e_8 、 e_9 , 得到一个 6×9 阶的下层拓扑结构关联矩阵 \mathbf{R}_1 , 如式 (12) 所示。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 & \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & e_1 \\ & e_2 \\ & e_3 \\ & e_4 \\ & e_5 \\ & e_6 \end{matrix} \quad (12)$$

搜索矩阵 \mathbf{R}_1 中全为 0 的列, 得到节点 v_9 为孤立节点, 其站内拓扑和站外拓扑相同, 均为其本身, 令其为厂站节点 S_1 。

将关联矩阵 \mathbf{R}_1 按行进行压缩, 每一行仅保留该支路关联的两个节点的列标, 得到一个 6 行的二元连通集合表, 如图 3(a) 所示, 该表仅保留了非孤立节点之间的连接信息。对关联矩阵 \mathbf{R}_1 进行列扫描, 可逐步得到这些二元连通集合之间的连通关系, 从而实现连通片的辨识。

为跟踪列扫描的状态, 定义一个 6×1 阶支路指针矢量 \mathbf{Z} , 用以保存每个二元连通集合当前所指向的连通片号, 连通片号与当前扫描列的列号保持一致, 通过有限次的列扫描逐渐使孤立的二元集合之间建立连通关系。列扫描中二元连通集合的融合情况和支路指针矢量的更新过程分别如图 3(b) 和图 4 所示, 由图可知, 列扫描过程中支路指针矢量共需更新 8 次(孤立节点对应的列不更新), 其中第 3 次更新使 e_1 、 e_3 、 e_4 连通, 第 4 次更新使 e_4 与 e_2 、 e_5 连通, 第 7 次更新使 e_7 、 e_8 连通。

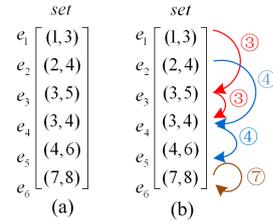


图 3 二元连通集合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dual-connection sets

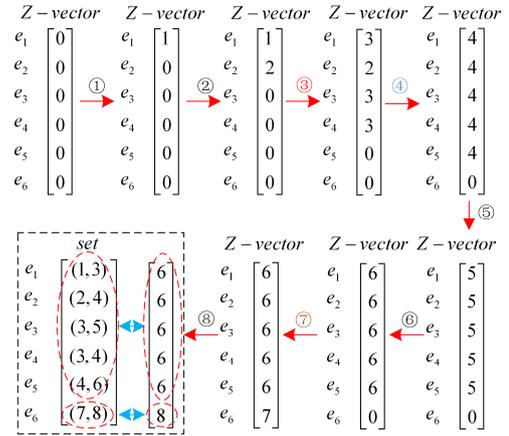


图 4 支路指针矢量更新过程

Fig. 4 Schematic diagram of branch pointer vector update

完成搜索以后, 将所有连通片号相同的二元连通集合中的相异节点合并为一个连通片, 即完成连通片辨识。如图 4 左下所示, 根据支路指针矢量结果, 支路 $e_1 \sim e_5$ 对应的二元连通集合指向的连通片号均为 6, 故成员节点 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 、 v_6 相互连通, 归并为厂站节点 S_2 ; 同理, 节点 v_7 、 v_8 相互连通, 归并为厂站节点 S_3 。

4.1.2 站内拓扑识别及描述

从关联矩阵 \mathbf{R}_1 中分别选取与本厂站内部节点相关的列, 并删除无关支路(即 \mathbf{R}_1 的零行)后, 即可得出描述每个厂站内部拓扑的站内关联矩阵 \mathbf{R}'_{i1} (若需简化零阻抗支路则生成 \mathbf{R}''_{i1} , 处理方法参照 3.3 节); 进一步查询站内全拓扑信息表 \mathbf{T} 和节点信息表 \mathbf{F} , 可识别出厂站内部支路的类型及节点上单端元件的挂接情况, 从而完成下层拓扑的完整识别。限于篇幅, 此处仅给出下层拓扑的识别结果。图 5(a) 是所有站点的站内全拓扑识别结果, 图 5(b) 是站内零阻抗支路简化后的结果。

4.1.3 站间拓扑识别及描述

在全拓扑结构的关联矩阵 \mathbf{R}_0 中将所有节点替换为厂站逻辑节点, 并将相同节点所对应的列进行

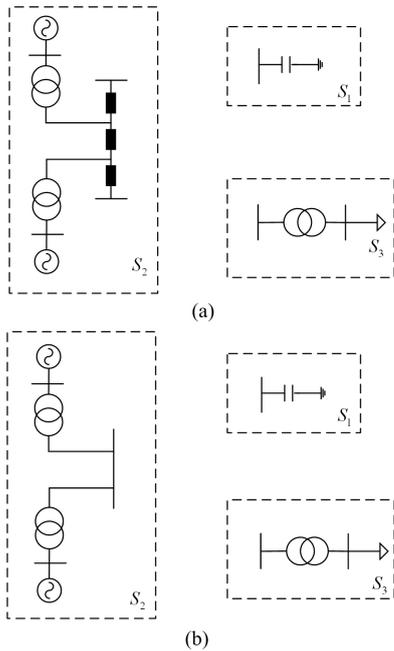


图 5 本文算法得出的下层拓扑识别结果

Fig. 5 Lower topology searched by the algorithm proposed

逻辑或运算，同时移除非输电线路支路，可得到站间拓扑的关联矩阵 R_2 为

$$R_2 = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} e_7 \\ e_8 \\ e_9 \end{matrix} \quad (13)$$

考虑到站点布局算法的需要，将站间拓扑关系用邻接矩阵 A_2 描述如下。

$$A_2 = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{matrix} \quad (14)$$

上层拓扑的识别结果如图 6 所示。

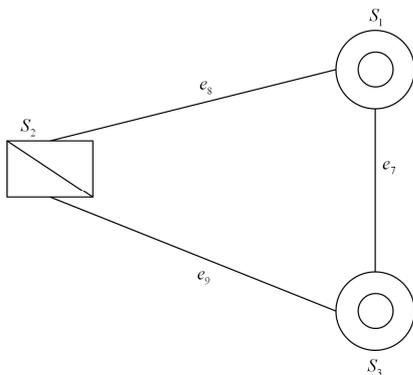


图 6 本文算法得出的上层拓扑识别结果

Fig. 6 Upper topology searched by the algorithm proposed

至此，拓扑分层识别工作完成。得到厂站逻辑节点之间的邻接矩阵 A_2 后，即可据其进行站点布局，同时根据识别出的站内拓扑(用关联矩阵 R_{i1}' 与信息表 T_{i1}' 、 F_{i1}' ，或关联矩阵 R_{i1}'' 与信息表 T_{i1}'' 、 F_{i1}'' 描述， $i=1,2,\dots,M$) 自动进行站内模块化建模和参数映射工作。

4.2 大规模实际系统算例

用西南电网实际系统机电暂态仿真数据对本文算法进行测试和适应性验证。测试数据为 PSASP 7.34 格式，涵盖西南电网中四川电网、重庆电网 220 kV 及以上电网数据及西藏电网 110 kV 及以上电网数据(含部分 35 kV 数据)(注：为验证算法适应性，此处取全网数据作为测试，实际电磁暂态建模规模为其子集。测试数据不代表电网真实数据)。原始数据共有 4 705 个电气节点，其中含发电机节点 739 个、等效负荷节点 644 个。全拓扑结构中共有 7 126 条支路，其中交流线路支路 3 603 条、变压器支路 3 523 条。

运用本文所提算法基于该仿真数据中的丰大潮流作业，可自动进行电力系统拓扑的分层识别，快速将原 4 705 个电气节点归并为 845 个厂站逻辑节点，搜索结果统计如表 1 所示。

表 1 西南电网实际仿真数据站点搜索结果

Table 1 Results of station search of Southwest

Grid actual simulation data		
电压等级	变电站数量/座	发电厂数量/座
500 kV	72	34
220 kV	433	188
110 kV	63	24
35 kV	12	19

同时，可自动给出每个厂站内部的元件类型及其连接关系，并根据建模需要简化厂站内部的短接线(零阻抗支路)。测试数据中站点内部电气节点数的分布情况如图 7 所示。

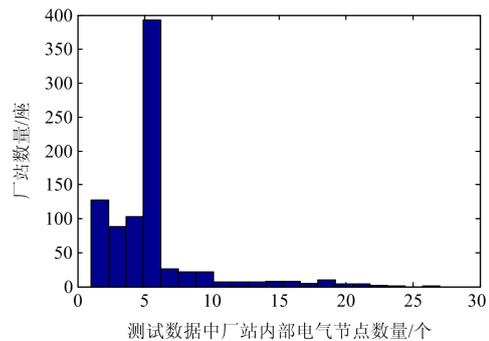


图 7 西南电网实际仿真数据中站内节点数分布图

Fig. 7 Distribution chart of in-station nodes number of actual Southwest Grid simulation data

由图7可知,该仿真数据中厂站内部电气节点数(注:站内节点数与原机电暂态仿真数据建模详细程度相关,不代表算法处理能力。若源数据对站内详细建模,本文算法仍能处理。)大多集中在5~20,其中站内电气节点数最多为27个。

由以上结果可见,基于该仿真数据进行电磁暂态模型自动生成时,采用本文提出“站间拓扑+站内拓扑”的分层拓扑识别方法,可将原4705个节点之间的拓扑简化为845个站点(非全网电磁暂态建模时,站点数将更少)之间的拓扑连接和每个厂站内不足30个节点之间的拓扑连接,使得拓扑布局层次清晰,可极大地避免单层拓扑识别造成节点布局错综交织的弊端。测试表明,本文算法在处理省级和区域级规模的电网可取得较好效果,具有较好适应性。

5 结论

本文结合大规模电力系统电磁暂态可视化模型自动生成的应用需求,针对现有拓扑识别算法不能区分站间拓扑和站内拓扑的不足,提出一种基于关联矩阵压缩和支路指针矢量更新的电力系统拓扑分层识别算法,实现了基于大规模电网仿真数据的“站间拓扑+站内拓扑”自动分层识别,可为电磁暂态模型自动布局和参数自动映射提供拓扑基础和索引信息。算法通过西南电网实际仿真数据的验证和测试,具有较好适应性。在算法中运用稀疏技术可进一步提高运算效率。

本文算法可直接运用于省级和区域级规模电网的电磁暂态可视化模型自动生成工作,也适用于机电-电磁混合暂态仿真的电磁模型自动生成,以及大规模电网的其他可视化建模和自动成图工作。

参考文献

- [1] WENG Y, LIAO Y, RAJAGOPAL R. Distributed energy resources topology identification via graphical modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2682-2694.
- [2] CAVRARO G, KEKATOS V. Graph algorithms for topology identification using power grid probing[J]. IEEE Control Systems Letters, 2018, 2(4): 689-694.
- [3] ZHOU L, JU R, JU Y. Research on power system network topology analysis using the object-oriented technology[J]. Advanced Materials Research, 2012, 433-440: 7234-7239.
- [4] BOSE A, CLEMENTS K. A real-time modeling of power networks[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(12): 1607-1622.
- [5] YEHSAKUL P D, DABBAGHCHI I. A topology-based algorithm for tracking network connectivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 339-346.
- [6] PARIS M, BOSE A. A topology processor that tracks network modifications over time[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 992-998.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [8] 陈星莺, 孙恕坚, 钱锋. 一种基于追踪技术的快速电力网拓扑分析方法[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24.
- [8] 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.
- [9] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 35-39.
- [9] MEI Nian, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 35-39.
- [10] 姚玉斌, 王丹, 吴志良, 等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力系统自动化设备, 2010, 30(1): 79-83.
- [10] YAO Yubin, WANG Dan, WU Zhiliang, et al. Network topology analysis by solving equations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 79-83.
- [11] GODERYA F, METWALLY 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.
- [12] 吕昊, 付立军, 叶志浩, 等. 几种电力网络图的连通路径拓扑算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 81-85.
- [12] LÜ Hao, FU Lijun, YE Zhihao, et al. Some topology algorithm research of power network connectivity path[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 81-85.
- [13] 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.
- [13] GUO Shuaiwen, YAN Yuehao, JIANG Jiandong, et al. Network topology identification algorithm based on adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 50-56.
- [14] 姚玉斌. 基于邻接矩阵平方方法网络拓扑分析[J]. 电

- 力系统保护与控制, 2012, 40(6): 17-21.
YAO Yubin. Determination of network topology by fast quasi-square of the adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 17-21.
- [15] 马静, 张侯好, 马伟, 等. 一种新型电网拓扑错误辨识方法[J]. 电力系统自动化设备, 2016, 36(1): 82-88.
MA Jing, ZHANG Yuyu, MA Wei, et al. Topology error identification of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 82-88.
- [16] 马静, 张侯好, 马伟, 等. 基于关联矩阵标记法与回路矩阵的电网拓扑分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 74-80.
MA Jing, ZHANG Yuyu, MA Wei, et al. Power network topological analysis based on incidence matrix notation method and loop matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 74-80.
- [17] ZHANG Liuxi, ABUR A. Single and double edge cutset identification in large scale power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 510-516.
- [18] 贺宏锟, 史浩山. 基于关联矩阵的网络拓扑辨识方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4): 477-479, 493.
HE Hongkun, SHI Haoshan. Method for network topology identification based on incidence matrix[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(4): 477-479, 493.
- [19] 刘鲁锋, 付立军. 电力系统拓扑分析的LU矩阵分解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2869-2874.
LIU Lufeng, FU Lijun. LU matrix factorization algorithm for power system topology analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2869-2874.
- [20] 华健, 韩学山, 王锦旗, 等. 改进高斯消元算法在电力系统拓扑结构分析中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 57-61.
HUA Jian, HAN Xueshan, WANG Jinqi, et al. Application of improved Gaussian elimination algorithm in power system topology analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 57-61.
- [21] 张晋芳, 钱诚, 王增平, 等. 基于广义基尔霍夫电流定律的电网系统拓扑分析新算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 43-49.
ZHANG Jinfang, QIAN Cheng, WANG Zengping, et al. Network topology analysis algorithm based on generalized Kirchhoff current law[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 35(5): 43-49.
- [22] GULER T, GROSS G. Detection of island formation and identification of causal factors under multiple line outages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 505-513.
- [23] 郎燕生, 李静, 罗雅迪, 等. 基于图划分的大电网拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 108-115.
LANG Yansheng, LI Jing, LUO Yadi, et al. Large power grid topology analysis based on graph partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 108-115.
- [24] 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.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [25] 廖凡钦, 刘东, 闫红漫, 等. 基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 174-181.
LIAO Fanqin, LIN Dong, YAN Hongman, et al. An automatic electrical diagram generation method for distribution networks based on hierarchical topology model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 174-181.
- [26] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 44-64.
- [27] 魏战线. 线性代数与解析几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [28] BABAKMEHR M, SIMÕES M G, WAKIN M B, et al. Smart-grid topology identification using sparse recovery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4375-4384.
- [29] MONTENEGRO D, RAMOS G A, BACHA S. An iterative method for detecting and localizing islands within sparse matrixes using DSSim-RT[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 675-684.

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-01-15

作者简介:

唐伦(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统计算、分析与优化; E-mail: tlyy00788@163.com

丁理杰(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定控制;

史华勃(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析。

(编辑 许威)