

DOI: 10.7667/PSPC171001

基于拓扑片的智能分布式馈线拓扑分析

朱国防¹, 沈培锋², 王勇², 张海台³

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019;
3. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 馈线拓扑分析是实现馈线自动化的基础, 智能分布式馈线自动化(Distributed Intelligent Feeder Automation, DIFA)的馈线拓扑分析由配电终端自主实现面临着巨大的挑战。首先研究了 FA 应用的馈线拓扑模型, 把电源、线路、母线和负荷等电气元件抽象为节点, 以开关为边-电气元件为节点的多叉树表示的馈线拓扑作为 DIFA 馈线拓扑模型。提出了基于拓扑片的馈线拓扑分散配置方法, 把每个配电终端覆盖的区域定义为拓扑片, 每个配电终端配置存储拓扑片信息。把拓扑片的邻接关系用配电终端的邻接关系来定义, 并映射成开关邻接关系。在拓扑片的配置中显性配置开关邻接关系, 隐性包含线路节点、母线节点和负荷节点。最后提出了拓扑片拼接的馈线拓扑静态分析方法。所提出的基于拓扑片的馈线拓扑分析方法适用于 DIFA, 由配电终端自主实现, 具有分析速度快和配置简单的优势。

关键词: 智能分布式馈线自动化; 馈线拓扑; 多叉树; 邻接关系; 拓扑片

Dynamic identification method of feeder topology for distributed feeder automation based on topological slices

ZHU Guofang¹, SHEN Peifeng², WANG Yong², ZHANG Haitai³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China; 3. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: Feeder topology analysis is the basis of feeder automation. The feeder topology identification of Intelligent Distributed Feeder Automation (DIFA) is faced with great challenges by the distribution terminal. This paper firstly studies the feeder topology model of FA application, abstracts the electrical components such as power supply, line, bus and load into nodes, and takes feeder topology represented by multi-way tree whose edge is switch and node is electrical element as DIFA feeder topology model. A topology decentralized configuration method based on topological slices is proposed. The area covered by each distribution terminal is defined as a topology slice, and each distribution terminal is configured to store topology information. The adjacency of the topological slices is defined by the adjacency of the distribution terminal and mapped into the switch adjacency. In the configuration of the topology, it dominantly configures the switch adjacency and invisibly contains line nodes, bus nodes and load nodes. Finally, a topology analysis method of feeder topology is proposed. The feeder topology analysis method based on topological slices stitching is applied to DIFA, which is realized by the distribution terminal. It has the advantages of fast analysis and simple configuration.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Jiangsu Electric Power Company (No. J2016041).

Key words: distributed feeder automation; feeder topology; multi-way trees; adjacency relations; topological slices

0 引言

智能分布式馈线自动化(Distributed Intelligent Feeder Automation, DIFA)系统能够实现馈线的快速故障隔离与供电恢复, 是提高供电可靠性的有效手

段^[1-6]。该系统不依赖于主站, 避免了信息大量传递带来的延迟, 提高了响应速度, 是配电网故障快速自愈的支撑技术, 是当前配电自动化的研究热点。然而, 馈线自动化中供电恢复方案的生成是依赖于配电网的拓扑分析功能的, 所以如何在 DIFA 系统中实现拓扑分析功能是 DIFA 应用需要解决的关键技术问题^[7-12]。

基金项目: 国网江苏电力公司科技项目资助(J2016041)

配电网的网络拓扑分析是根据电力系统网络中的开关设备的状态及各个电气元件的物理连接模型, 建立数学模型进行连通图分析。其任务是实时处理开关状态信息的变化形成新的拓扑结构, 供潮流分析、状态估计或故障处理等应用程序使用。拓扑分析常用的模型是: 节点-支路模型和开关-节点模型。节点-支路模型主要面向网络分析应用如潮流计算和状态估计等; 开关-节点模型是更低层次上的网络拓扑模型, 当网络拓扑以搜索开关为主时, 该模型更便捷, 馈线自动化通常使用开关-节点模型。拓扑分析常用的方法是: 邻接矩阵法和树搜索法。邻接矩阵法的优点是结构性强, 分析过程清晰, 数据的组织比较简单, 适应性强, 矩阵法可以适用于任何复杂的接线方式。矩阵法的最大缺点是计算量太大, 计算速度比较慢, 不适于网络的实时分析。树搜索法是现在网络的拓扑分析中应用最广泛的一种拓扑分析方法。树搜索法是通过搜索节点的相邻节点的方法来进行网络的拓扑分析, 一般采用基于广度优先或深度优先的搜索策略^[13-18]。

配电网的网络拓扑分析应用主要集中在配电自动化主站系统中, 在主站系统中有着强大的计算能力支持。DIFA 采用分布计算的思路构建, 不依赖主站, 拓扑分析的执行主体一般是配电终端级别的, 存在计算能力差的约束。针对以上问题, 本文提出了一种适用于 DIFA 分布计算的拓扑分析模型及方法。

1 配电网中压馈线模型

与调度自动化系统不同, 馈线自动化(Feeder Automation, FA)系统面向的中压配电网电压等级单一, 没有连接不同电压等级的变压器, 电气设备主要是线路和各种开关设备。

根据 IEC61968 对馈线的定义, 本文中的馈线是指中压配电线路, 其电源点为变电站中压母线, 终点为负荷、分布式电源和常开的联络开关。馈线是中压配电网的基本单位, 呈辐射状结构。不同的馈线通过一个或多个联络开关相连, 所以配电网呈现出网状结构。当联络开关常开运行时, 即配电网开环运行时, 馈线呈现树状结构。并网运行的分布式电源对拓扑分析没有影响, 因此可以不用考虑。为了缩小故障影响范围, 一般馈线由分段开关分隔成多个馈线段, 馈线段是馈线工作时停电的最小线路范围。在 CIM 模型中, 馈线是开关与馈线段的集合。

常见的配电网线路的类型有架空线、电缆和架空线电缆混和三种。架空线的馈线段中往往 T 接配变(用户负荷), 电缆线路的馈线段上很少 T 接用户

负荷。但电缆线路一般采用环网柜的方式分段和接入用户负荷, 环网柜中存在母线元件。配电终端一般安装于架空线的柱上开关、电缆的环网柜及开闭所处。中压配电网馈线自动化网络拓扑分析时, 涉及到的设备类型有: 电源、线路、负荷、母线和各类开关设备。

在 CIM 的开关-节点模型中, 拓扑结构的连接模型由端点与连接节点定义。端点是导电设备的电气连接节点。每个端点可以连接于一个连接节点, 连接节点是导电设备的端点通过零阻抗连接在一起的点。一个导电设备包含几个端点。例如, 一个开关有两个端点、一个线路段有两个端点。如果几个端点指向的连接节点相同, 表示这些端点通过零阻抗连接在一起。这样, 端点和连接节点共同建立设备之间的电气连接关系。

网络拓扑的结果模型由拓扑节点和拓扑岛定义, 其中拓扑节点是通过闭合开关合并的一组连接节点, 拓扑岛是系统网络的一个电气连接的子系统, 本文中的正常运行的馈线就是一个拓扑岛; 故障隔离后供电恢复前, 原馈线范围的区域可能变成了多个拓扑岛, 每个拓扑岛内部是电气连通的。

在馈线自动化的故障处理过程中, 故障定位和故障隔离仅需要馈线段端口处的故障信息, 供电恢复需要馈线范围内拓扑岛连通信息、故障前的负荷信息和联络开关背后馈线的转供能力信息。所以馈线自动化中的拓扑分析仅仅关注连通关系, 采用开关-节点模型最为恰当。馈线拓扑示例如图 1。

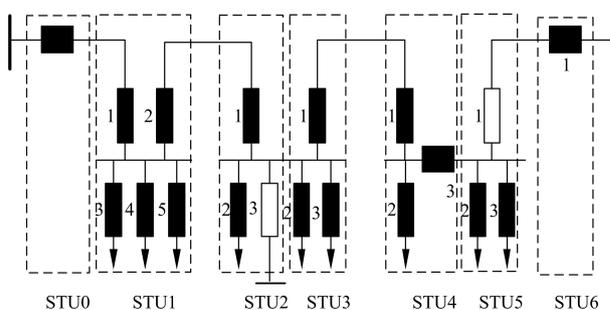


图 1 馈线拓扑示例

Fig. 1 Example of feeder topology

基于配电网放射状的结构, 本文将馈线中的电源、母线、线路和负荷分别表示为电源节点、母线节点、线路节点以及负荷节点, 以相邻节点之间的开关作为边, 连接馈线中各个节点生成多叉树, 可以直观地描述配电网的拓扑连接关系。本文采用的馈线模型可以认为是开关-节点模型, 其中的节点不是指 CIM 中的端点/连通节点, 也不是指 CIM 结果模型中的拓扑节点, 而是类似 CIM 模型中的连接

器。节点可以看作不可分割的带一个或多个端口的电气元件，节点与几个开关相连就存在几个端口。

图 1 中若选用变电站母线所抽象的电源节点作为树的根节点，其多叉树拓扑结构如图 2 所示。

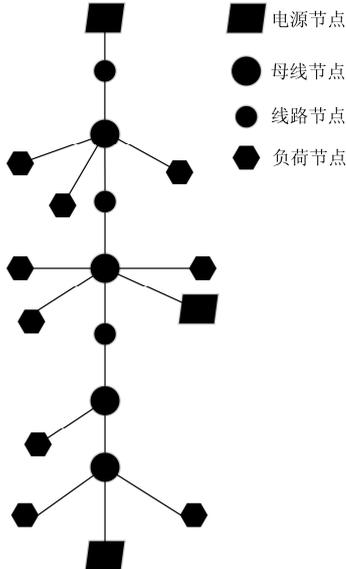


图 2 馈线拓扑树结构示例

Fig. 2 Example of feeder topology multi-way tree

2 馈线拓扑信息的配置

当前，配电主站的高级应用如状态估计、潮流分析、动态着色等同样需要拓扑信息。配电主站的拓扑信息一般采用图库一体化的方式输入，形成拓扑信息配置库。配电主站的拓扑信息是全局拓扑，涉及面广。馈线自动化故障处理所需要的拓扑信息只是涉及故障关联区域，一般来讲，馈线故障关联区域一般只涉及一条或两三条馈线，拓扑信息库比较小。DIFA 系统的优势是故障自愈速度快，宜采用动态收集相关拓扑信息的方式以保证算法的实时性。DIFA 系统所需拓扑信息的配置方法的易用性将大大影响 DIFA 系统的推广。

本文提出一种基于开关邻接关系的馈线拓扑分散配置方法，通过配电终端之间的信息交互实现馈线拓扑结构的建立，具有维护效率高、搜集速度快、涉及范围小的优点。

基于开关邻接关系的馈线拓扑分散配置方法具体为：定义以每个配电终端所覆盖的开关/开关组为基本单元分散储存的拓扑信息为拓扑片信息，拓扑信息采用邻接 IP 方式表示的开关邻接关系进行配置，拓扑结构中线路节点、母线节点、电源节点和负荷节点作为隐含信息存在于拓扑片配置信息中。

如图 1 所示，存在 7 个拓扑片，7 个拓扑片之间存在 6 个 IP 邻接关系，隐含着有 4 条馈线段和 2

个母线段连接。考虑到拓扑片是等效的多端口元件，开关是双端口元件，开关邻接关系比拓扑片邻接关系简单明了，所以把 IP 邻接关系映射到开关邻接关系上。

拓扑片配置信息中包含区域内开关数量、开关邻接关系、开关类型、拓扑片类型等描述信息。

区域内开关数量指的是：本配电终端所覆盖的同一馈线的开关组的开关数量。开关邻接关系指每个开关记录两侧所对应的配电终端 IP 地址，以此来表示开关拓扑关系，通过每个开关记录的 IP 信息，构建整个拓扑片的开关拓扑信息。

线路节点一般为双端口节点，隐含在开关邻接关系(邻接 IP)中，若两个配电终端内开关邻接关系匹配，说明存在一条馈线段。

电源节点和负荷节点作为单端口节点，连接一个开关，可以由开关类型进行定义，隐含在开关类型信息里。

开关类型包括普通分段开关、联络开关、负荷分支开关、母联开关和电源开关五种，其中：普通分段开关是指馈线中用于连接母线段的开关；联络开关是指联络两个馈线且状态为分的开关；负荷分支开关是指开关一侧与负荷相连的开关；母联开关是指同一母线上用于母线分段的开关；电源开关是指一侧与电源相连的开关。

母线节点是多端口元件，在中压配电网内常出现在环网柜或开闭所中。这两种应用场合通常都采用单台或两台配电终端监控。拓扑片类型是指每一个配电终端所管理范围内的拓扑片的开关连接结构。当前配电自动化中配电终端工程配置实际，以下四种类型可以基本涵盖：单开关、单终端同母线开关组、双终端同母线开关组和双终端分段母线开关组。后三种拓扑片类型中隐含着母线节点。拓扑单元类型如图 3 所示。

单开关拓扑片：配电终端所覆盖区域中仅包含一个开关，其信息配置方法为：记录开关两侧邻接 IP，配置开关类型。此时开关所记录的两侧 IP 将均为其他相邻配电终端区域 IP，表示与其他配电终端所覆盖区域相连。

单终端同母线开关组拓扑片：配电终端所覆盖区域包含一条母线，且母线上的所有开关均由一个配电终端管理。信息配置方法为：记录所有的开关的一侧邻接 IP 为本地 IP，表示所有的开关的一侧连接于母线；开关的另一侧若存在邻接开关，记录邻接 IP，表示与对应 IP 的配电区域相连；并分别配置开关类型。

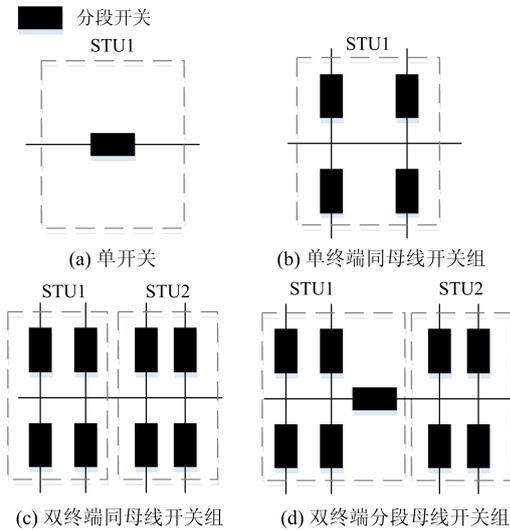


图 3 拓扑单元类型

Fig. 3 Types of the topological slices

双终端同母线开关组拓扑片：由两个配电终端管理同一条母线上的开关组，根据每个开关所属的配电终端，将开关分为两个拓扑片区域。信息配置方法为：每个配电终端所覆盖的开关组为一个拓扑片

片，分别存储在两个配电终端中。两个拓扑片通过母线相连，采用拓扑片中每个开关一侧邻接 IP 记录为另一个拓扑片所对应配电终端 IP 的方法表示；拓扑片中每个开关的另一侧若存在邻接开关，记录邻接开关所对应的配电终端 IP。

双终端分段母线开关组拓扑片：由两个配电终端共同管理一条分段母线，根据每个开关所属的配电终端，将开关分为两个拓扑片区域，且其中一个区域中包含母联开关。信息配置方法为：每个 DTU 所覆盖的开关组为一个拓扑片，分别存储在两个配电终端中。两个拓扑片通过母联开关相连，母联开关由开关类型标示，母联开关的一侧邻接 IP 配置为本地 IP，另一侧邻接 IP 配置为相邻拓扑片对应的 IP。含母联开关的拓扑片的其他开关的一侧邻接 IP 同为本地 IP；不含母联开关的拓扑片内的开关组的一侧邻接 IP 同为相邻拓扑片对应的 IP。拓扑片中每个开关的另一侧若存在邻接开关，记录其邻接 IP。

图 1 所示馈线拓扑信息中的邻接 IP 配置信息如图 4 所示。

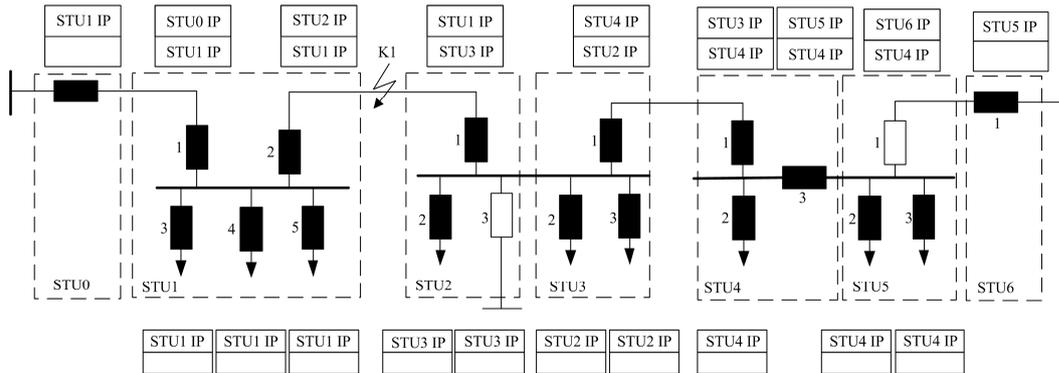


图 4 邻接 IP 配置信息示例

Fig. 4 Example of adjacency IP configuration

3 馈线拓扑动态分析

主控终端馈线拓扑多叉树的生成采取两个步骤来实现：1) 通过对等通信获取相关配电终端的拓扑片配置信息，并生成拓扑片多叉树；2) 把拓扑片多叉树拼接生成整个拓扑多叉树。

拓扑信息获取的流程图，如图 5 所示。

基于开关邻接关系的拓扑片多叉树建立时的主要工作为把拓扑配置信息中隐含拓扑节点显性化。隐含节点显性化方法如下。

(1) 电源节点的显性化方法为：开关类型为电源开关或联络开关时，生成一个电源节点。

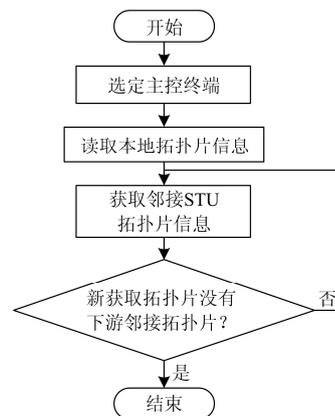


图 5 拓扑信息获取流程图

Fig. 5 Flow chart of topological information acquisition

- isolation and supply restoration algorithm based on local topology[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, 25: 1113-1129.
- [5] 王照, 马文晓, 高飞. 基于多代理技术的分布式馈线自动化实现方法[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(6): 54-57.
WANG Zhao, MA Wenxiao, GAO Fei. A multi-agent based approach to the distributed feeder automation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(6): 54-57.
- [6] GHORBANI M J, M A CHOUDHRY, FELIACHI A. A multiagent design for power distribution systems automation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 329-339.
- [7] KASHYAP N, YANG C W, SIERLA S, et al. Automated fault location and isolation in distribution grids with distributed control and unreliable communication[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4): 2612-2619.
- [8] 刘海涛, 沐连顺, 苏剑. 馈线自动化系统的集中智能控制模式[J]. *电网技术*, 2007, 31(23): 17-21.
LIU Haitao, MU Lianshun, SU Jian. Centralized and intelligent control mode of feeder automation[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(23): 17-21.
- [9] 刘健, 负保记, 崔琪, 等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(10): 62-66.
LIU Jian, YUN Baoji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent feeder automation system with fast self-healing performance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(10): 62-66.
- [10] 周文俊, 李春建, 王良, 等. 分层分区的馈线自动化配置方案研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(17): 71-76.
ZHOU Wenjun, LI Chunjian, WANG Liang, et al. Study on hierarchical and divisional configuration scheme of feeder automation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(17): 71-76.
- [11] 凌万水, 刘东, 路一鸣, 等. 基于 IEC 61850 的智能分布式馈线自动化模型[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(6): 90-95.
LING Wanshui, LIU Dong, LU Yiming, et al. Model of intelligent distributed feeder automation based on IEC 61850[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(6): 90-95.
- [12] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于 GOOSE 的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 183-190.
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 183-190.
- [13] HE Y, YU D, DENG Y, et al. An efficient topology processor for distribution systems[C] // *Power Engineering Society Winter Meeting*, January 28 - February 1, 2001, Columbus, USA: 824-829.
- [14] 陆一鸣, 刘东, 黄玉辉, 等. 基于 CIM 的馈线建模和应用[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(28): 157-163.
LU Yiming, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Feeder modeling and application based on CIM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(28): 157-163.
- [15] 王增平, 张晋芳, 张亚刚. 基于开关路径函数集的新型厂站内馈线拓扑方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(1): 137-145.
WANG Zengping, ZHANG Jinfang, ZHANG Yagang. A novel substation configuration identification algorithm based on the set of breaker-path functions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(1): 137-145.
- [16] 范开俊, 徐丙垠, 董俊, 等. 基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(11): 180-186.
FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Identification method for feeder topology based on successive polling of smart terminal unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(11): 180-186.
- [17] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [18] 高孟友, 徐丙垠, 范开俊, 等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 127-131.
GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of feeder topology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 127-131.

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-09-01

作者简介:

朱国防(1975—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能配电网保护与自动化; E-mail: zgf@sdu.edu.cn

沈培锋(1971—), 男, 研究员级高工, 长期从事配电网相关研究与管理工作;

王勇(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为调度自动化、配电自动化。

(编辑 葛艳娜)