

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.016

## 中压配电网近邻交互式分布式拓扑辨识算法

陈沛东<sup>1</sup>, 曹华珍<sup>1</sup>, 何璇<sup>1</sup>, 杨一飞<sup>2</sup>, 林凌雪<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510699;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 分布式决策的智能保护控制是应对分布式电源广泛接入后中压配电网灵活性和安全性挑战的前瞻性技术。实现智能分布式决策的前提是每个智能终端(smart terminal unit, STU)均能快速辨识和跟踪所在线路的拓扑连接关系及其变化。对此,文中提出一种基于对等通信且具有高容错性的分布式拓扑辨识算法。配置在环网节点的STU无须预存馈线组静态拓扑,仅依靠本地量测以及与近邻终端的信息交换,通过规则判断的方式,就能实现对馈线组完整拓扑和开环方式的动态跟踪与辨识,减少算法对终端的配置要求。同时,算法仅须各STU交互基本的量测信息与判断信息,降低对通信条件的要求。算例表明该方法合理有效,且通过结合本地量测互校核和对侧连通性预判修正,可显著提高拓扑辨识对量测数据的容错能力。

**关键词:** 中压配电网;智能终端(STU);拓扑辨识;分布式决策;智能保护控制;近邻交互

**中图分类号:** TM76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)02-0139-08

### 0 引言

随着分布式电源的发展,中压配电网控制保护将向着智能化和分布式协同的方向发展<sup>[1-2]</sup>。为实现控制保护的灵活决策,通常要在关键配电环网节点配置具备状态感知和智能决策能力的配电终端,文中简称为智能终端(smart terminal unit, STU)。相邻STU之间具备交互式通信和信息交换能力,以分区自治和协同的方式,实现配电网在复杂多变的运行方式和各种扰动冲击下的弹性运行<sup>[3]</sup>。

STU进行故障恢复和调压等控制决策的前提之一是要知道所在馈线/馈线组的拓扑、自身在配电网中的位置及当前主供电源,这也是诸多配电网分布式控制策略设计的基础,如保护控制、无功控制、潮流控制<sup>[4]</sup>。以无功-电压控制为例<sup>[5-7]</sup>,其控制策略依据节点之间的上下游连接关系设计。实际配电网采用环网结构,开环运行,且转供电等操作频繁,因而运行时开环拓扑和上下游关系均处于变化中,而改变上下游关系须在终端处进行动态更新。

拓扑辨识有集中式与分布式2种实现路径。配电网调控主站端的集中式拓扑辨识要求主站已经存储了准确的配电网静态拓扑(环网接线模式)。集中式的拓扑辨识主要分为传统辨识和人工智能辨识两大类,传统辨识方法的核心是开关分合状态以及当前开环运行方式,算法主要分为邻接矩阵

与树搜索法2类<sup>[8-11]</sup>。文献[12]提出了一种基于支路有功功率的配电网拓扑辨识方法。在基于人工智能的配电网拓扑辨识方面,“数据+模型”混合驱动的方式也逐渐被运用于拓扑辨识算法中<sup>[13-18]</sup>。

与集中式方案相比,分布式拓扑辨识普遍不用预存馈线静态拓扑,且具备特有的高鲁棒性和抗扰动能力,更符合智能配电网的结构特点和运行要求<sup>[19]</sup>。文献[20]将拓扑信息分为静态信息和动态信息2类进行管理,结合拓扑信息改变的触发机制,能实时跟踪拓扑变化。文献[21]提出一种基于图分割的分布式拓扑处理方式,利用STU的相互通信实现配电网的拓扑识别。文献[22]在考虑STU预存了所在馈线组的静态拓扑基础上,设计终端间的动态信息交互和拓扑识别规则,实现了开环运行拓扑的动态识别。文献[23-24]则设计由主控STU负责发起和完成多级查询。主控STU先向其近邻开关处的STU发出拓扑查询请求,接受近邻STU的开关状态及其邻居开关的通信地址信息。继而,主控STU继续向其近邻的近邻发出拓扑查询请求,由此逐级查询直至获取所在开环线路的完整运行拓扑。上述分布式拓扑辨识方法仅通过开关状态判断终端间的拓扑连接关系,未能有效运用电流、功率等信息,且对于量测数据没有设置容错机制,通信误差对于辨识结果有较大影响。

针对以上问题,文中提出了一种基于对等通信、无主控STU且具有高容错性的分布式拓扑辨识算法。其特点包括:(1)除开关状态外,充分利用环网点的电流、功率等量测信息提高对量测数据的容

收稿日期:2022-09-21;修回日期:2022-12-19

基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2019B11110-9001);中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM202-00463)

错能力;(2) 每个 STU 通过与对侧拓扑辨识结果的交换和对比进一步校核本地拓扑状态,提高量测容错能力;(3) 采用对等通信进行信息交换,每个 STU 始终仅与近邻 STU 通信;(4) 每个 STU 均可跟踪并获得整个馈线组的完整拓扑和开环点信息,且无须预存馈线组静态拓扑;(5) 拓扑辨识和上下游关系的识别不受配电网分布式电源接入和双向潮流的影响。文中详细介绍了拓扑辨识过程、容错判据以及拓扑校核设计方案,并通过含有分布式电源的有源配电网仿真算例验证了所提方法的有效性。

## 1 分布式拓扑辨识的应用场景和配置要求

### 1.1 分布式 STU 的配置

以图 1 所示的中压电缆单环网为例,以环网点为单位部署 STU。一个 STU 负责监测配电环网点的母线电压、所有支路电流和每条支路的本终端侧的开关状态。

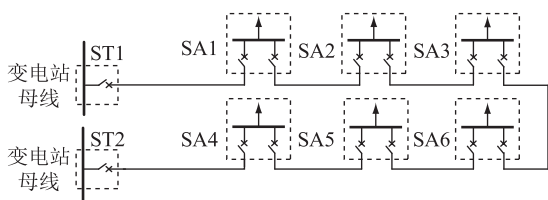


图 1 中压电缆配电网中的 STU 配置

Fig.1 STU deployment in the cable-based medium voltage distribution network

考虑到在开环运行的配电网中,高压变电站的中压母线作为配电网的主供电源,是判断上下游关系的依据,因此对变电站母线的第一级出线开关给出特殊标识。文中将变电站出线开关对应的智能终端标记为 ST,中压网的其他智能终端则标记为 SA,如图 1 所示,而不区分时,则统称为 STU。

无论有源还是无源配电网,开环运行时 STU 进出线支路中有且仅有一条支路在连接主供变电站和本终端所处节点的通路上,该支路的对端节点称为此节点的上游节点,与实际有功潮流方向无关。以图 1 为例,若开环点在 SA3 的右侧出线开关上,则 SA1、SA2 均为 SA3 的上游节点。显然开环点的变化会改变 SA 之间的上下游关系。

文中的拓扑辨识方案不要求每个 STU 预存完整环网的静态拓扑,只要求配置其近邻终端的通信标识信息。STU 所需配置的基本拓扑信息包括:各 STU 自身的通信地址与近邻 STU 通信地址;终端属性(SA/ST);连接近邻的开关对编号(包含本终端侧开关编号、近邻终端与其开关编号)。假设  $STU_j$  为  $STU_i$  的近邻终端,则连接  $STU_j$  与  $STU_i$  的支路不经

过其他 STU 监管的节点。

### 1.2 STU 的实时量测信息

STU 的任务是监控和保护配电网的运行,因此须对本环网节点的电气量和开关状态进行实时采集。文中的拓扑辨识功能工作于稳态运行阶段,其所用的本地实时监测信息见表 1。经过简单计算后可以得出 STU 周期性地采集环网点三相电压和进出线三相电流。

表 1 拓扑辨识需要的监测量

Table 1 Monitoring data required in topology identification

信息分类	名称	符号
模拟量	母线电压工频正序有效值	$V$
	支路电流工频正序有效值	$I$
	支路有功功率	$P$
	支路无功功率	$Q$
开关量	母线进出线开关状态	$g$

## 2 分布式拓扑辨识流程与方法

### 2.1 分布式拓扑辨识流程

文中每个 STU 独立地判断和存储所在配电网的拓扑关系。STU 与其近邻采用对等通信进行周期性的信息交换。一个辨识周期与采样周期相等,单个周期内 STU 完成一次本地量测、一次与近邻的信息交换以及多个信息分析和拓扑辨识逻辑。每个周期的拓扑辨识流程如图 2 所示。

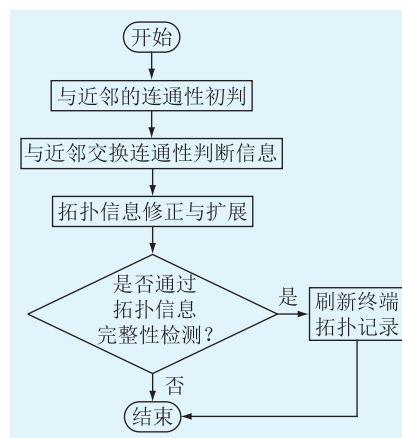


图 2 拓扑辨识算法流程

Fig.2 Flow chart of topology identification algorithm

### 2.2 考量量测容错的局部连通性初判

实时量测信息刷新后,STU 首先根据本地量测对每条支路的开关分合状态进行第一次预判。此外,对 STU 与每个近邻 STU 之间的支路连通性以及支路对侧开关状态进行一次初判,且经双方信息交换后,使得每个 STU 都可利用对侧的量测信息修正自身对通断状态的判断,从而增强整体拓扑辨识的准确性以及对量测数据的容错能力。

记本环网点 STU 为  $x$ , 正在进行连通性判断的支路为  $k$ , 则本侧开关号为  $(x, k)$ ; 记支路对侧的近邻 STU 为  $y$ , 则  $y$  侧开关号为  $(y, k)$ 。连通性初判结果包括  $\{S'_{x,k}, c_{x,k}\}$  和  $\{S'_{y,k}, c_{y,k}\}$ , 其中  $S'_{x,k}$ 、 $S'_{y,k}$  分别为本侧、对侧开关状态;  $c_{x,k}$ 、 $c_{y,k}$  分别为本侧、对侧开关状态判断的置信度。STU 连通性初判结果见表 2, 其中置信度  $c$  分为 3 档取值: 0 为不可信, 0.5 为猜测, 1 为确信; 开关通断状态  $S'$  的判断也有 3 个可行值: 0 为开关断开, 1 为开关闭合, Null 为状态未知。

表 2 STU 连通性初判结果

Table 2 STU connectivity preliminary judgment results

参量	本侧	对侧
开关状态 $S'$	0/1	0/1/Null
状态判断的置信度 $c$	0/0.5/1	0/1

图 3 为 STU 依据本地量测完成连通性初判的规则设计, 其中  $g_{x,k}$  为开关  $(x, k)$  的开合状态;  $I_{x,k}$  为流经开关  $(x, k)$  的支路电流;  $P_{x,k}$  为开关  $(x, k)$  所在支路的支路功率;  $\varepsilon$  为阈值, 取略大于正常量测误差的小正整数。符号的详细含义也可见表 1。须指出的是, 整个规则树均采用电流和有功功率的绝对值构造判据, 不受其方向影响, 因此对含分布式电源的有源配电网与单向潮流的无源配电网均适用。

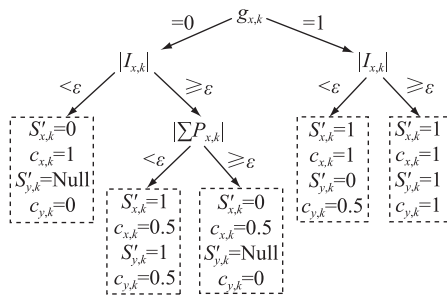


图 3 连通性初判的规则树

Fig.3 Decision tree for connectivity preliminary judgment

首先依据开关状态量测量, 即图 3 中的根节点对开关状态进行判断。考虑到量测错误的存在, 文中设计了模拟量的互校核逻辑, 增加连通性判断的容错性, 说明如下:

(1) 若支路电流量测与开关状态量测逻辑一致, 则本侧开关连通性判断的置信度为 1。假设开关闭合且支路有电流, 则可预判对侧开关也是闭合; 若开关断开且支路无电流, 则无法预判对侧开关状态。

(2) 若开关状态量测为断开, 但支路有电流, 则通过判断所有支路流入母线的有功功率之和是否为 0 (功率平衡) 来辅助判断支路量测是否存在错

误。若功率与电流判据逻辑一致, 则以置信度 0.5 修改开关连通性判断, 改为连通。否则, 以置信度 0.5 判断开关断开。

(3) 若开关状态量测为闭合, 但支路电流为 0, 这可能是由于支路对侧开关是断开的, 没有逻辑冲突。因此以置信度 1 判断本侧开关闭合, 同时以置信度 0.5 判断对侧开关断开。

### 2.3 与近邻的连通性判断信息交换

完成连通性初判后, STU 根据 2.2 节对两侧开关状态的判断, 得出对其与近邻 STU 之间支路连通性的判断, 规则如下。

规则 1: 若两侧开关状态均为 1, 则通道状态为 1 (连通), 置信度取 2 个开关状态  $c$  值中的最小值。

规则 2: 若两侧开关状态分别为 1 和 0, 则通道状态为 0 (断开), 置信度取开关状态为 0 者对应的置信度。

规则 3: 若对侧开关状态为 Null, 则通道状态和置信度由本侧开关状态决定, 即通道通断状态及置信度与本侧开关状态和置信度一致。

STU 在完成对本节点所有与近邻连接支路的状态判断后, 刷新馈线组拓扑关系记录中的相关支路状态。STU 记录的状态判断信息包含: 通道名、通道状态、两侧开关状态、信息来源标签。其中, 通道名记录支路名; 通道状态记录通道的通断状态以及置信度; 两侧开关状态记录通道两侧的开关名; 开关状态以及置信度; 标签记录本条状态记录的信息来源, 即提供信息的 STU 编号。

STU 完成记录刷新后, 将该判断信息按约定的记录格式发送给所有近邻 STU, 同时等待接收近邻 STU 发来的交换信息。

### 2.4 基于近邻信息的拓扑信息修正与扩展

STU 收到近邻 STU 发来的拓扑信息后, 可根据其提供的支路对侧开关状态判断以及其对本侧开关状态的预判, 修正对支路连通性的判断。仅交换双方的状态判断结果, 而不是量测记录, 是因为前者不仅信息短、占用通信资源少, 而且已按图 3 通过了多量测之间的容错校核, 因而更加准确。

STU 按照以下规则, 利用对侧状态判断对自身的拓扑信息记录进行修正与扩展。

规则 1: 若近邻记录中某条通道记录不在本 STU 的记录表中, 则扩展记录表, 增加该条记录行; 否则按规则 2—规则 4 更新本条记录。

规则 2: 若 STU 对本侧开关状态判断的置信度为 1, 则忽略对侧的判断, 不更新本侧开关状态和置信度。



规则 3:若近邻 STU 对支路对侧开关状态判断的置信度为 1,则采用近邻 STU 的判断和置信度更新对侧开关记录。

规则 4:若近邻 STU 对本侧开关状态的初判与本 STU 不同,且置信度高于本 STU 的判断,则采用对侧 STU 的开关状态判断,并取 2 个置信度的最小值作为该开关状态判定的置信度。

规则 5:若本 STU 对对侧开关状态的判断与对侧 STU 不同,且置信度高于对侧 STU,则采用本 STU 对对侧开关状态的判断,并取 2 个置信度的最小值作为该状态判定的置信度。

按照上述规则完成对开关状态的更新后,再次应用 2.3 节支路连通性规则进行通道状态的更新。

在这一设计中,每个 STU 均可通过将近邻 STU 发来的包含更多支路信息的拓扑记录复制到本 STU 的拓扑记录中,不断拓展观测范围,直至获得覆盖整个馈线组的拓扑关系辨识。

### 2.5 拓扑信息完整性检测与拓扑记录刷新

在拓扑完整性检测环节,判断 STU 是否完成了以变电站为源端,包含本节点所有支路的一个或多个开环拓扑树的识别。一旦判断拓扑完整,则将拓扑信息输出到 STU 的共享拓扑存储区,作为决策所需的线路拓扑和上下游关系基础数据,供自愈控制、调压控制等不同分布式控制保护模块查询。如此,即使 STU 与近邻 STU 出现短期通信中断,影响到辨识模块的内部记录更新速度,也不影响 STU 的控制模块使用共享拓扑记录工作。

拓扑完整性检测方式为:从信息来源标签为本 STU 的记录开始进行广度优先搜索。如果通道状态为连通,则将通道对侧 STU 加入下一级待搜索的标签节点,直至完成一颗无向图拓扑树的搜索。然后任选另一条未纳入拓扑树的记录,以其信息来源标签为新树的起点进行搜索,直至完成所有树的搜索。

若一颗拓扑树有且仅有一个类型为 ST 的节点,则该拓扑树通过了完整性检测;否则视为未通过完整性检测。拓扑树未通过完整性检测存在 2 种可能,其一,拓扑树中没有 ST 节点,此时认为拓扑辨识尚未完成,保留已有记录并等待下一个周期进行记录扩展;其二,拓扑树中有多个 ST 节点,此时认为拓扑辨识出现错误,删除该拓扑树中信息来源标签不是本 STU 的所有记录后,继续拓扑辨识。

对通过完整性检测的无向图拓扑树,以 ST 节点为根节点,可产生带有上下游关系的有向拓扑树。其中,有连通关系的通道中上级节点为下级节点的上游节点。

## 3 算例测试与结果分析

以图 4 所示三回馈线互联的 10 节点配电网为例,检验所提拓扑辨识算法的有效性,其中节点 5、7、8、9、10 均接入了分布式电源。在 Matlab 中进行配电网潮流计算和辨识算法测试。首先,设置开环运行的方式为断开开关  $K_{SA1-2}$ 、 $K_{SA2-1}$ ,通过拓扑辨识各环节的输出介绍算法应用过程。该运行方式下各 STU 采集的开关状态、支路电流、支路有功功率总和等特征量见表 3。之后,分别设计开环方式调整和本地单一量测错误 2 种场景验证方法的拓扑跟踪能力和容错性。

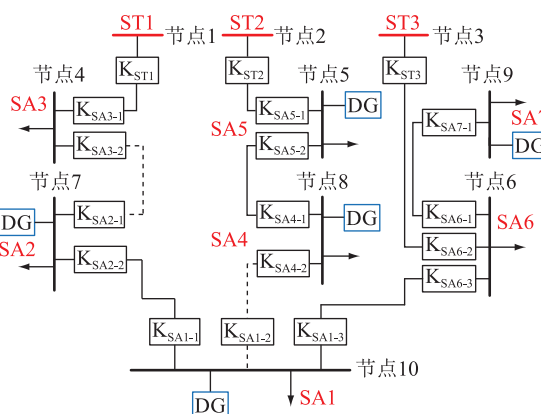


图 4 10 节点配电网及其 STU

Fig.4 10-node distribution network and its STU

表 3 STU 本地量测信息

Table 3 Local measurement information of STU

终端名	开关名	开关电流/A	开关状态	支路有功功率总和/MW
SA1	$K_{SA1-1}$	10.19	1	
	$K_{SA1-2}$	0	0	0
	$K_{SA1-3}$	30.97	1	
SA2	$K_{SA2-1}$	0	0	0
	$K_{SA2-1}$	10.19	1	
SA3	$K_{SA3-1}$	115.01	1	0
	$K_{SA3-2}$	0	1	
SA4	$K_{SA4-1}$	9.65	1	0
	$K_{SA4-2}$	0	1	
SA5	$K_{SA5-1}$	37.26	1	0
	$K_{SA5-2}$	9.65	1	
SA6	$K_{SA6-1}$	30.61	1	
	$K_{SA6-2}$	108.78	1	0
	$K_{SA6-3}$	30.97	1	
SA7	$K_{SA7-1}$	30.61	1	0
ST1	$K_{ST1-1}$	115.01	1	1.81
ST2	$K_{ST2-1}$	37.26	1	0.25
ST3	$K_{ST3-1}$	108.78	1	1.18

### 3.1 拓扑辨识过程

以 SA1 为例说明拓扑辨识过程。在第一轮 SA1 根据本地两侧获得的与邻近通道的连通性初判结果如表 4 所示。

表 4 SA1 的第一轮连通性初判信息  
Table 4 Preliminary judgement information of SA1 in round 1

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA1-1}-K_{SA2-2}$	(1,1)	$(K_{SA1-1}, 1, 1), (K_{SA2-2}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA1-2}-K_{SA4-2}$	(0,1)	$(K_{SA1-2}, 0, 1), (K_{SA4-2}, \text{Null}, 0)$	SA1
$K_{SA1-3}-K_{SA6-3}$	(1,1)	$(K_{SA1-3}, 1, 1), (K_{SA6-3}, 1, 1)$	SA1

随后, SA1 与近邻终端 SA2、SA4、SA6 交换判断信息。SA1 接收到的来自 SA2、SA4、SA6 的拓扑信息分别如表 5—表 7 所示。

表 5 来自 SA2 的交换信息  
Table 5 Exchange information from SA2

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA2-1}-K_{SA3-2}$	(0,1)	$(K_{SA2-1}, 0, 1), (K_{SA3-2}, \text{Null}, 0)$	SA2
$K_{SA2-2}-K_{SA1-1}$	(1,1)	$(K_{SA2-2}, 1, 1), (K_{SA1-1}, 1, 1)$	SA2

表 6 来自 SA4 的交换信息  
Table 6 Exchange information from SA4

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA4-1}-K_{SA5-2}$	(1,1)	$(K_{SA4-1}, 1, 1), (K_{SA5-2}, 1, 1)$	SA4
$K_{SA4-2}-K_{SA1-2}$	(0,0.5)	$(K_{SA4-2}, 1, 1), (K_{SA1-2}, 0, 0.5)$	SA4

表 7 来自 SA6 的交换信息  
Table 7 Exchange information from SA6

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA6-1}-K_{SA7-1}$	(1,1)	$(K_{SA6-1}, 1, 1), (K_{SA7-1}, 1, 1)$	SA6
$K_{SA6-2}-K_{ST3}$	(1,1)	$(K_{SA6-2}, 1, 1), (K_{ST3}, 1, 1)$	SA6
$K_{SA6-3}-K_{SA1-3}$	(1,1)	$(K_{SA6-3}, 1, 1), (K_{SA1-3}, 1, 1)$	SA6

结合近邻终端的信息, SA1 拓展了自身的拓扑记录, 结果如表 8 所示。

表 8 第一轮中 SA1 的拓扑信息

Table 8 Topology information of SA1 in round 1

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA1-1}-K_{SA2-2}$	(1,1)	$(K_{SA1-1}, 1, 1), (K_{SA2-2}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA1-2}-K_{SA4-2}$	(0,1)	$(K_{SA1-2}, 0, 1), (K_{SA4-2}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA1-3}-K_{SA6-3}$	(1,1)	$(K_{SA1-3}, 1, 1), (K_{SA6-3}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA2-1}-K_{SA3-2}$	(0,1)	$(K_{SA2-1}, 0, 1), (K_{SA3-2}, \text{Null}, 0)$	SA2
$K_{SA4-1}-K_{SA5-2}$	(1,1)	$(K_{SA4-1}, 1, 1), (K_{SA5-2}, 1, 1)$	SA4
$K_{SA6-1}-K_{SA7-1}$	(1,1)	$(K_{SA6-1}, 1, 1), (K_{SA7-1}, 1, 1)$	SA6
$K_{SA6-2}-K_{ST3}$	(1,1)	$(K_{SA6-2}, 1, 1), (K_{ST3}, 1, 1)$	SA6

SA1 根据表 8 进行拓扑树搜索和完整性检测, 结论为拓扑树中没有 ST 节点, 未通过完整性检验, 故判断拓扑辨识尚未完成, 保留记录进入下一个周期的拓扑辨识。经过 3 个周期后, SA1 获得完整的拓扑。此时, SA1 存储的拓扑信息如表 9 所示。

表 9 第三轮中 SA1 的拓扑信息

Table 9 Topology information of SA1 in round 3

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA1-1}-K_{SA2-2}$	(1,1)	$(K_{SA1-1}, 1, 1), (K_{SA2-2}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA1-2}-K_{SA4-2}$	(0,1)	$(K_{SA1-2}, 0, 1), (K_{SA4-2}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA1-3}-K_{SA6-3}$	(1,1)	$(K_{SA1-3}, 1, 1), (K_{SA6-3}, 1, 1)$	SA1
$K_{SA2-1}-K_{SA3-2}$	(0,1)	$(K_{SA2-1}, 0, 1), (K_{SA3-2}, 1, 1)$	SA2
$K_{SA4-1}-K_{SA5-2}$	(1,1)	$(K_{SA4-1}, 1, 1), (K_{SA5-2}, 1, 1)$	SA4
$K_{SA6-1}-K_{SA7-1}$	(1,1)	$(K_{SA6-1}, 1, 1), (K_{SA7-1}, 1, 1)$	SA6
$K_{SA6-2}-K_{ST3}$	(1,1)	$(K_{SA6-2}, 1, 1), (K_{ST3}, 1, 1)$	SA6
$K_{SA3-1}-K_{ST1}$	(1,1)	$(K_{SA3-1}, 1, 1), (K_{ST1}, 1, 1)$	SA3
$K_{SA5-1}-K_{ST2}$	(1,1)	$(K_{SA5-1}, 1, 1), (K_{ST2}, 1, 1)$	SA5

根据表 9 生成的系统有向拓扑树如图 5 所示。

通过算例可以看出, 方案中所有 STU 均可获得整个馈线组的完整拓扑, 并不仅仅局限于当前开环运行方式下自身所在馈线的拓扑树, 这可以为分布式自愈策略的设计提供有力的信息支持。

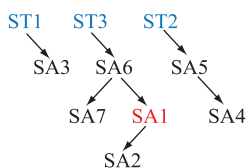


图5 SA1获得的有向拓扑树

Fig.5 The directed topology tree obtained by SA1

此外,每个STU均通过近邻之间的消息传递逐步扩大感受域,因而处于电网不同位置的STU获得自身所在馈线完整拓扑以及馈线组其他线路拓扑的时间有先后。对于任意STU,实现一次完整拓扑更新的时间是2个参数的乘积,其一为辨识周期 $T_s$ ,其二为馈线组中不同ST至STU通路经过的STU个数的最大值 $n_{max}$ 。由于第2章的辨识过程以逻辑判断为主,计算资源占用少,且消息传递均为状态交换,通信资源占用少,辨识周期主要取决于采样速率和通信方式。考虑到文中的目的为跟踪电网拓扑和正常运行方式的变化,辨识周期不宜太小,可取 $T_s = 100\text{ ms}$ 。通常,电缆配电网中单回馈线的主干环网节点个数典型值为6,两回馈线互联主通道上的STU总数为12个。若取 $n_{max} = 12$ ,则馈线组中不同STU获得完整拓扑的辨识周期为 $0.6\text{ s} \sim 1.2\text{ s}$ ,可满足自愈控制在内的分布式控制的拓扑刷新要求。

### 3.2 运行方式发生变化时拓扑辨识案例

当系统开环运行方式调整,闭合 $K_{SA1-2}$ 和 $K_{SA2-1}$ ,断开 $K_{SA1-1}$ 和 $K_{SA6-3}$ 。由于发生开关变位的环网节点SA2和SA6均为SA1的近邻,因此SA1在运行方式调整后的第一个周期就实现了拓扑关系的正确辨识和更新。但其他SA尚不能在第一个信息交换周期获得非近邻环网节点的拓扑变位信息,从而不能通过完整性检验。之后,SA2、SA4和SA6在第二个周期获得新运行方式的完整拓扑信息。SA3、SA5和SA7则在第三个周期完成拓扑信息更新。各SA更新后的有向拓扑树如图6所示。

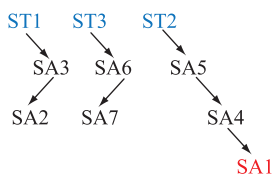


图6 更新后的有向拓扑树

Fig.6 The updated directed topology tree

### 3.3 量测数据存在错误时拓扑辨识案例

文中设计的置信度和交互验证规则提高了STU对量测数据的容错能力。设SA1的3个支路电流量测均出现较大误差,其中 $K_{SA1-1}$ 、 $K_{SA1-3}$ 的电流量测

偏低, $K_{SA1-2}$ 的电流量测偏高。此时,SA1本地通道状态判断信息如表10所示。

表10 SA1初判结果

Table 10 Preliminary judgment results of SA1

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA1-1} - K_{SA2-2}$	(0, 0.5)	( $K_{SA1-1}, 1, 1$ ), ( $K_{SA2-2}, 0, 0.5$ )	SA1
$K_{SA1-2} - K_{SA4-2}$	(1, 0.5)	( $K_{SA1-2}, 1, 0.5$ ), ( $K_{SA4-2}, 1, 0.5$ )	SA1
$K_{SA1-3} - K_{SA6-3}$	(0, 0.5)	( $K_{SA1-3}, 1, 1$ ), ( $K_{SA6-3}, 0, 0.5$ )	SA1

SA1对本侧开关状态和通道状态的判断均出现了错误,但与近邻SA2信息交换后,SA2中置信度较高的判断信息替换了SA1中置信度较低的信息,实现了拓扑判别的修正,使得SA1形成了正确的拓扑判别。此时,SA1从SA2获得的交换信息如表11所示。

表11 从SA2获得的交换信息

Table 11 Information exchange from SA2

通道	(通断, 置信度)	(开关名, 开关状态, 置信度)	标签
$K_{SA2-1} - K_{SA3-2}$	(0, 1)	( $K_{SA2-1}, 0, 1$ ), ( $K_{SA3-2}, \text{Null}, 0$ )	SA2
$K_{SA2-2} - K_{SA1-1}$	(1, 1)	( $K_{SA2-2}, 1, 1$ ), ( $K_{SA1-1}, 1, 1$ )	SA2

如果部分STU之间出现通信故障,受影响的STU将无法校核对侧信息,对连通性判断的置信度下降,同时对应通信故障区段的上游或下游拓扑状态将难以更新。尽管2.5节中分析得到短时通信中断仅影响拓扑的更新,不影响共享拓扑记录以及STU控制功能的实现,但若通信中断持续时间长,则建议闭锁需要准确上下游关系判据的部分配电网分布式保护逻辑,以避免保护误动作。

## 4 结语

文中提出了一种基于分布式控制架构的高容错拓扑辨识算法,充分发挥了STU基于规则进行灵活判断的能力,以及通过与近邻进行判断信息的交换实现观测范围扩展和相互校核的优势。文中所提算法无须预存配电网静态拓扑,即可实现快速地运行拓扑辨识和更新。设计中考虑了对量测数据的容错能力,且适用于含分布式电源的有源配电网。STU依靠与近邻终端的信息交换可以获得全网拓扑关系并动态跟踪拓扑变化。所提算法为配电

网分布式运行控制和保护等应用功能的实现提供了拓扑信息支撑。

#### 参考文献:

- [1] 林志超. 自适应配电网拓扑与开关配置的智能分布式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 149-156.  
LIN Zhichao. Intelligent-distributed distribution network protection strategy for self-adaptive topology and different switch configurations[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 149-156.
- [2] ANILKUMAR R, DEVRIESE G, SRIVASTAVA A K. Voltage and reactive power control to maximize the energy savings in power distribution system with wind energy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 656-664.
- [3] 王日宁, 武一, 魏浩铭, 等. 基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 83-89.  
WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83-89.
- [4] 裘鹏, 唐爱红, 徐华, 等. 分布式潮流控制器控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 130-138.  
QIU Peng, TANG Aihong, XU Hua, et al. A control and protection strategy for a distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 130-138.
- [5] 钟令枢. 考虑调度需求的主动配电网分散协调无功电压控制模型与算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
ZHONG Lingshu. Distributed and coordinated volt-VAR control model and algorithm for active distribution networks considering dispatch requirements[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [6] 李克强, 韩学山, 李华东, 等. 配网中光伏逆变器最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 711-720, 950.  
LI Keqiang, HAN Xueshan, LI Huadong, et al. Distributed algorithm for optimal power flow pursuit by photovoltaic inverters in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 711-720, 950.
- [7] 陈斌, 王俊江, 王敬华, 等. 基于电压补偿的定直流电压及无功控制的光伏系统[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 134-142.  
CHEN Bin, WANG Junjiang, WANG Jinghua, et al. Research on photovoltaic system of constant DC voltage and reactive power control based on voltage compensation[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 134-142.
- [8] 王献志, 李铁成, 郭少飞, 等. 基于 $\mu$ PMU电压相位数据的配电网拓扑辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 54-63.  
WANG Xianzhi, LI Tiecheng, GUO Shaofei, et al. Identification of distribution network topology based on  $\mu$ PMU voltage phase data[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 54-63.
- [9] 刘道伟, 章锐, 李柏青, 等. 基于状态量测的电网拓扑结构反向识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7107-7117, 7484.  
LIU Daowei, ZHANG Rui, LI Baiqing, et al. Research on reverse recognition method of power system topological structure based on state measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7107-7117, 7484.
- [10] 梅睿, 余昆, 陈星莺. 基于节点注入功率的配电网运行拓扑辨识[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 41-47.  
MEI Rui, YU Kun, CHEN Xingying. Topology identification of distribution network based on nodal power injection[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 41-47.
- [11] 梁洪. 配电网拓扑分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.  
LIANG Hong. Research on topology analysis method of distribution network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [12] 刘迪, 张强, 吕干云, 等. 基于支路有功功率的配电网拓扑辨识方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 92-98.  
LIU Di, ZHANG Qiang, LYU Ganyun, et al. Distribution network topology identification method based on branch active power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 92-98.
- [13] 杨秀, 蒋家富, 刘方, 等. 基于注意力机制和卷积神经网络的配电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1672-1682.  
YANG Xiu, JIANG Jiafu, LIU Fang, et al. Distribution network topology identification based on attention mechanism and convolutional neural network[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1672-1682.
- [14] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14.  
YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14.
- [15] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.  
GAO Zepu, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [16] 裴宇婷, 秦超, 余贻鑫. 基于LightGBM和DNN的智能配电网在线拓扑辨识[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(9): 939-950.  
PEI Yuting, QIN Chao, YU Yixin. Online topology identification for smart distribution grids based on LightGBM and deep neural networks[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(9): 939-950.
- [17] 孙伟, 朱世睿, 杨建平, 等. 基于图卷积网络的微电网拓扑辨识[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 71-81.  
SUN Wei, ZHU Shirui, YANG Jianping, et al. Topology identification of microgrid based on graph convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 71-81.

- [18] 胡丽娟,刁赢龙,刘科研,等. 基于大数据技术的配电网运行可靠性分析[J]. 电网技术,2017,41(1):265-271.  
HU Lijuan,DIAO Yinglong,LIU Keyan,et al. Operational reliability analysis of distribution network based on big data technology[J]. Power System Technology,2017,41(1):265-271.
- [19] 王宗晖,陈羽,徐丙垠,等. 基于逻辑节点的分布式馈线自动化拓扑识别[J]. 电力系统自动化,2020,44(12):124-130.  
WANG Zonghui,CHEN Yu,XU Bingyin,et al. Logical node based topology identification of distributed feeder automation [J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(12):124-130.
- [20] 丛伟,郑熠,张子衿,等. 智能配电网拓扑信息的分布式存储和管理方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):111-118.  
CONG Wei,ZHENG Yi,ZHANG Zijin,et al. Distributed storage and management method for topology information of smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(13):111-118.
- [21] ZHU Z Y,XU B Y,BRUNNER C,et al. Distributed topology processing solution for distributed controls in distribution automation systems[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2017,11(3):776-784.
- [22] 武奕彤. 智能配电网分布式拓扑识别与应用方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):136-142.  
WU Yitong. Distributed topology identification and application method of smart distribution network[J]. Power System Protection and Control,2019,47(16):136-142.
- [23] 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.
- [24] 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 real-time feeder topology [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):127-131.

作者简介:



陈沛东

陈沛东(1991),男,硕士,高级工程师,从事配电网规划和新能源接入工作(E-mail:workpd24@163.com);

曹华珍(1974),女,硕士,高级工程师,从事配电网规划工作;

何璇(1990),女,硕士,高级工程师,从事新能源接入对配电网规划影响等相关工作。

## Distributed topology identification algorithm of medium-voltage distribution network based on neighboring interaction

CHEN Peidong<sup>1</sup>, CAO Huazhen<sup>1</sup>, HE Xuan<sup>1</sup>, YANG Yifei<sup>2</sup>, LIN Lingxue<sup>2</sup>

(1. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., 510699, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Intelligent distributed protection and control is a promising route towards flexible and safe operation of the medium-voltage distribution network with widespread access to distributed energy resources. A fundamental premise of distributed decision-making is that each smart terminal unit (STU) can identify the topology of the feeder and track its changes. A distributed topology identification algorithm with high fault tolerance based on peer-to-peer communication is proposed in this paper. The STU configured at the looped network node requires no pre-set static topology of the feeder group, but only relies on local measurement and information exchange with neighboring STUs. Through rule judgment, it can realize the dynamic tracking and monitoring of the complete topology and open-loop mode of the feeder group, which reduces the configuration requirements of the algorithm on the terminal. Meanwhile, the method only needs each STU to exchange the local measurement and judgment information, which reduces the requirement of communication. Test examples show that the proposed method is reasonable and effective, and it can significantly improve the tolerance of topological identification to measurement errors by combining local measurement mutual checking and contralateral connectivity predictive correction.

**Keywords:** medium-voltage distribution network; smart terminal unit (STU); topology identification; distributed decision-making; intelligent protection and control; neighboring interaction

(编辑 陆海霞)