

基于 N 线的拓扑感知技术研究

欧新¹, 韩鹏², 卢玉凤², 宁骞², 蓝世祥², 高春梅², 任旭²

(1. 贵州电网有限责任公司 贵阳供电局, 贵阳 550002;

2. 华立科技股份有限公司, 杭州 310023)

摘要: 随着科技革新与能源革命的深度融合, 国家电网作为世界流企业, 提出了“推进电网向能源互联网转型升级”的口号; 电网是由发电、输电、配电、用电等各类品种繁多的挂网设备组成的复杂系统, 明晰挂网产品的拓扑网络, 提高电网的智能化感知能力, 及时消除安全隐患, 确保电网健康、稳定运行成为当前最为迫切的任务; 在对电网拓扑结构的研究过程中, 提出了基于 N 线的拓扑感知技术, 依据电流沿阻抗最小回路传输原理, 采用现代微机处理与控制技术; 经实验测试实现了针对电力 N 线的特征电流信号注入、检测和识别, 降低了对挂网设备的影响; 可以方便、快捷地接入台区变压器及各级分支箱侧, 实现挂网设备的智能化拓扑识别, 方便故障点的锁定, 第一时间切断故障点电能供给, 及时维修故障, 确保电力正常、高效的供应。

关键词: 感知; 阻抗最小; 特征电流信号; 信号注入; 拓扑识别

Research on Topology Perceptive Technology Based on N—wire

OU Xin¹, HAN Peng², LU Yufeng², NING Qian², LAN Shixiang², GAO Chunmei², REN Xu²

(1. Guiyang Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Holley Technology Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: With the deep integration of scientific and technological innovation and energy revolution, as a world-class enterprise, State Grid put forward the slogan of "promoting the transformation and upgrading of power grid to energy Internet". Power grid is a complex system composed of a wide variety of grid connected equipment such as power generation, transmission, distribution and power consumption. It has become the most urgent task to clarify the topology network of grid connected products, improve the intelligent perception ability of power grid, eliminate potential safety hazards in time, and ensure the healthy and stable operation of power grid. In the research process of power grid topology, a topology sensing technology based on N—line is proposed. According to the principle of current transmission along the minimum impedance loop, modern microcomputer processing and control technology is adopted. Through the experimental test, the characteristic current signal injection, detection and recognition for power n—line are realized, which reduces the impact on the network equipment. It can be easily and quickly connected to the transformer in the station area and the side of branch boxes at all levels, realize the intelligent topology identification of network equipment, facilitate the locking of fault points, cut off the power supply at the fault point at the first time, repair the fault in time, and ensure the normal and efficient power supply.

Keywords: Perception; Minimum impedance; Characteristic current signal, Signal injection; Topology identification

0 引言

随着科技强国战略的实施, 智能制造、智能家居、智能电网^[1]等新理念、新技术大力推进。国家电网公

司提出了“三型两网、世界一流”的战略目标, “两网”指的是坚强智能电网和泛在电力物联网。泛在电力物联网围绕电力系统各环节, 充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术、先进通信技术, 实现电力

收稿日期:2021-10-27; 修回日期:2021-11-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(72001196)。

作者简介:欧新(1975-),男,重庆人,大专,工程师,主要从事电网设备的研究、操作和维护方向的研究。

通讯作者:韩鹏(1989-),男,陕西咸阳人,硕士,工程师,主要从事电能计量及智能传感融合技术方向的研究。

引用格式:欧新,韩鹏,卢玉凤,等. 基于 N 线的拓扑感知技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1):154-160.

系统各环节万物互联、人机交互, 具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活特征的智慧服务系统。

在全面感知挂网设备分布的过程中提出了很多新技术。例如, 文献 [2] 定义了树节点类来动态地反映节点间的链接关系, 采用深度优先算法, 快速识别网络拓扑结构的变化。文献 [3] 结合变电站运检及管控工作的实际需求, 提出了基于机器感知和态势感知技术的变电站设备状态智能监测评估一体化平台的顶层设计理念, 通过人工神经网络^[4]、感知哈希算法^[5]等技术, 可实现设备状态及变电站环境自主感知、预测设备缺陷及风险、代替人工进行巡视决策, 从而大大提高运检效率与可靠性。文献 [6] 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法, 利用 Tanimoto 相似度系数计算各分组内配电变压器、分支箱、表箱、用户智能电能表之间相关性和非相关性, 从而实现低压配电网拓扑识别。文献 [7] 基于离散 Fréchet 距离和剪辑 K 近邻的配电网拓扑结构校验方法。文献 [8] 基于 LoRa 技术和 GPU 加速的台区拓扑辨识方法, 旨在利用 LoRa 通讯技术、高性能计算技术以及大数据方法, 对于大规模安装的智能电能表的数据进行获取和分析, 有效辨识台户之间的对应关系。文献 [9] 基于用电信息集抄系统的深化应用, 如台区区分, 相位识别和瞬时冻结等关键技术, 配合电力线测距等第三方设备, 提出一套新型的低压台区网络拓扑结构重建方案。文献 [10] 基于 T 型灰色关联度和 K-最近邻 (KNN, k-nearest neighbor) 算法实现低压配电网拓扑自动识别方法, 该方法能自动识别用户所属台区和馈线, 准确率高, 实用性好。

以上方法实现起来难度很大, 且由于电网工况的复杂性, 实际效果不太理想。文章提出一种基于 N 线的拓扑感知技术, 能够实现分级接收主站命令, 并能主动产生特征电流信号, 通过简单的 OOK (二进制振幅调制) 调制技术^[11]实现台区侧挂网设备的精准拓扑网络, 得出树状分布图。

1 基于 N 线的分布式拓扑识别模型

1.1 基于 N 线的定义

目前, 电网上实现拓扑识别的方式大致分为三类: 第一类是根据电流潮流量的大小由主到次逐次减小的特征, 通过对特定节点电流量的有效监测并聚类分析, 形成台区下分支模型, 这种方式容错率太差, 在电网大环境复杂的背景下, 很难实现全覆盖、精准

性的拓扑模型; 第二类是通过电力线载波通信的方式读取设备唯一 ID 号以明晰设备分布情况, 这种方式只能实现台区下所挂设备的数量及设备号, 再加上现阶段 HPLC 载波模块具有高频传输特性, 很容易将信号串到 A、B、C 线电压上, 从而扰乱信号的正常回路信息, 大大降低了分支识别的准确性; 第三类是通过智能终端^[12]下发拓扑识别命令, 挂网设备接收到拓扑识别命令, 产生特征电流信号并逐级被父节点接收到, 接收到特征电流信号的设备按照统一的编码方式向终端发送拓扑识别结果信息, 终端通过处理分析, 完成拓扑网络的生成, 形成台区下挂网设备的分支拓扑图。

文中所采用的方式是第三种方式的延伸, 第三种方式利用电阻、电容、电感元器件的物理特性, 通过编程实现特定时间间隔内元器件的导通与关断, 并将这种特征信号注入到电力线 N 线上, 完成特征信号的注入。

1.2 基于 N 线的分布式拓扑识别模型

基于 N 线的拓扑感知技术, 主要是利用 N 线来传递特征电流信号, 台区侧 N 线的分布式拓扑模型如图 1 所示。

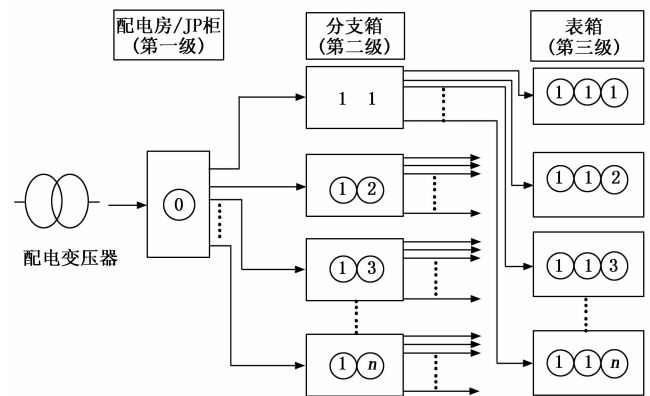


图 1 N 线分布式拓扑模型图

图 1 可以看出, 配电变压器出线侧分为三级, 依次是配电柜/JP 柜、分支箱、表箱^[13-14], 每一级出线侧都可以延伸出多个分支, N 线通过配电变压器的中性线接地后引出, 并逐级延伸到每只表箱。

从图 1 中可以看出, 一根 N 线贯穿了台区下所有分支, 形成电流回流图谱。图 1 中圆圈内标示的序号代表不同层级的分支节点序号, 如果在每个节点处放置一款具有拓扑感知功能的设备, 便可以准确地实现台区下设备的拓扑图^[15], 避免了向 A、B、C 三相

线电压上分别注入特征信号而引起的混乱现象,同时降低了向 A、B、C 三相线电压上注入特征电流信号而引起的挂网设备计量偏差和故障率。

2 基于 N 线的特征信号注入研究

2.1 基于 N 线的拓扑感知设备功能描述

为了实现台区侧挂网设备的网络拓扑结构图,方便故障排查,第一时间锁定故障点,切断故障点电能供给,及时维修故障,确保电力正常、高效的供应。文中所论述的设备安装在台区下的每个 N 线的分支节点前端,本设备的整体框图如图 2 所示。

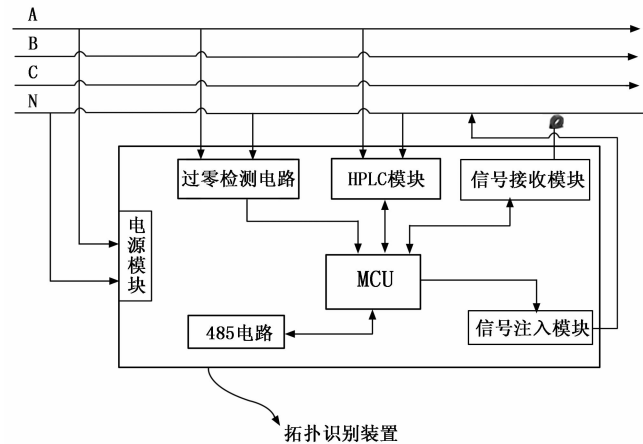


图 2 整体框图

如图 2 所示,本装置由 7 部分组成,包括电源模块、过零检测电路、HPLC 电路、特征电流信号发送电路、特征电流信号接收电路、485 电路、MCU 主控电路等部分组成^[16]。电源模块用来给各个功能模块提供电能;过零检测电路判断市电过零点时刻,该模块电路与 HPLC 模块配合完成通信功能,实现拓扑识别命令逐级下发给对象设备。HLPC 模块称为宽带载波模块,通过 HPLC 模块可以完成主站下发命令的接收与发送。特征信号发送电路用来发送拓扑识别特征电流信号;特征信号接收电路用来接收特征电流信号;485 电路用来与同一分支箱内的电能表进行通信,抄读表号信息及对应的电量等参数。

为了简化器件,图中所标的拓扑识别装置的取电方式是从 A 线和 N 线之间取电,也可以分别从 B 线和 N 线、C 线和 N 线上取电,但特征电流注入的对象一致,都是从 N 线上注入的。

实际工作过程简单描述为:当主站下发拓扑识别命令给集中器后,集中器分时段向电力线发送拓扑识

别命令给对应的分支箱(每个分支箱都有对应的唯一 ID 识别号),HPLC^[17] 模块接收到电力线发来的信息,通过解调传送给 MCU 进行进一步解析,当 MCU 响应该指令并解析得到该指令为拓扑识别指令时,MCU 先进行 485 供电电路电源的切换,当切换完成后,跳转到中断服务子程序中,监测电力线过零点信号,当 MCU 监测到过零点信号后,触发特征电流信号发送模块工作,完成特征电流信号注入,该线路的上级分支箱 N 线均有特征电流流过,上级电路的特征电流接收模块均可接收到该信号,如此分级完成各级信号的发送与其上级信号的接收,如此整合确定不同分支箱之间的网络拓扑图,知道了分支箱的网络拓扑图,即可得出同一台区每块电能表的拓扑图。

2.2 特征信号注入机理研究

特征信号注入模块的原理图如图 3 所示。

如图 3 所示,特征信号注入电路由四部分组成:电源隔离模块、逻辑判断模块、光耦控制模块、继电器控制模块^[18]。

电源隔离模块用来为后级传输能量,同时实现前级和后级强弱电隔离;逻辑判断模块上拉电阻 R₁、R₂ 和 U₂ 组成,R₁、R₂ 确保常态下线路的电平维持在高电平,避免线路波动引起误动作。

光耦控制模块是为了将强、弱电隔离,同时将弱电端的控制信号作用到强电端控制强电电路动作。光耦控制模块由 R₃、R₄、R₅、R₆、R_{s1}、R_{s2}、C₅、C₆、C₇、Q₁、N₁、U₃、D₁、D₂、D₃、D₄ 组成。其中,R₃、R₄、R₆ 为限流电阻,R₅ 为下拉电阻,确保常态下,Q₁ 的集电极为低电平,N₁ 为大功率 MOS 管,在本电路中用作开关,当 Q₁ 的集电极为低电平时,N₁ 处于导通状态,此时无电流经 R_{s1}、R_{s2} 流入 N 线;当 U₃ 的 3 脚为低电平时,U₃ 的 1 和 3 脚导通,5 脚输出低电平,Q₁ 导通,N₁ 的 1 脚变为高电平,N₁ 导通,这时有电流经过 R_{s1}、R_{s2} 流入 N 线,从而实现特性信号的注入。D₁、D₂、D₃、D₄ 为单相导通二极管,可以控制电压的单相导通特性,阻止 220 V 市电流入 24 V 电压侧。R₆、C₇ 形成 RC 串联滤波电路,由于吸收开关尖峰,降低尖峰电压对 MOS 管的冲击,R_{s1}、R_{s2} 选用大功率水泥电阻,增大通流能力。

继电器控制电路控制强电侧的共用地,当 MCU 检测到终端发来的拓扑识别命令后,通过发出控制命

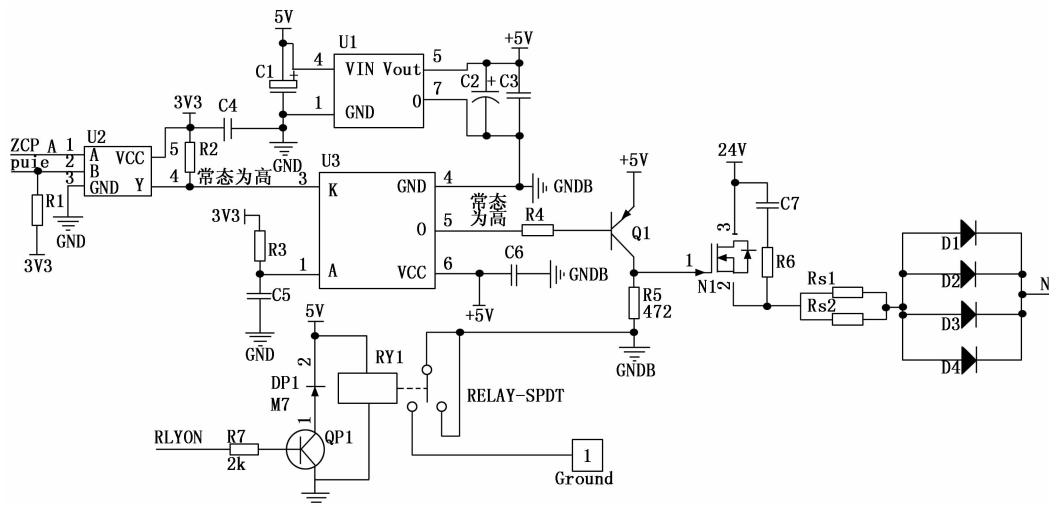


图 3 特征信号注入电路

令作用于继电器电路, 即 R7 的左侧, 电气连接标号为 RLYON。当 RLYON 为高电平时, QP1 导通, 此时继电器 RY1 动作, 使得大地端 Ground 作为强电侧共用的地。此外, 需要注意的是 24V 电压也是通过隔离变压器过来的, 具有大的输出功率, 它的地通过继电器 RY1 来控制, 与强电侧地同步切换。通过对 N1 开关频率的控制, 有效的将特征电流信号注入到电网的 N 线中, 每级节点前端安装具有该功能的设备或装置, 配合特征信号接收电路完成信号的接收与有效处理, 既安全又能够有效地实现拓扑识别功能, 为泛在电力物联网建设提供创造性引领技术。

2.3 基于 OOK 调制技术的拓扑感知方式研究

幅移键控 (ASK) 是一种常用的信号调制技术^[18], 该方法在众多低频 RF 数字通信系统中非常普及。当需要发射“1”时, 发射源发送较高的载波幅度; 发射“0”时, 采用最简单的方式发送出较低的载波幅度。通一断键控 (OOK) 调制是一种更简单的 ASK 方式, 发射“0”时, 无任何载波信号输出。

应用 OOK 调制技术产生的特征电流信号波形图如图 4 所示。发送信号频率为 783.3 Hz 和 883.3 Hz, 具体为 16 位二进制编码: 1010101011101001。其中, 码位 0 时, 无特征电流线发送, 码位 1 时, 有特征电流发送。

为了提高软件的容错性, 降低电网噪声对信号的干扰, 文章在采用 OOK 调制技术的同时, 优化了控制方式, 通过将单次发送时间设置为 9.6 s, 即每位编码发送时间长度为 0.6 s, 其中每位由规定个数的 OOK 码组成, 单次发送总体时间偏差为 ±40 ms, 每位编码

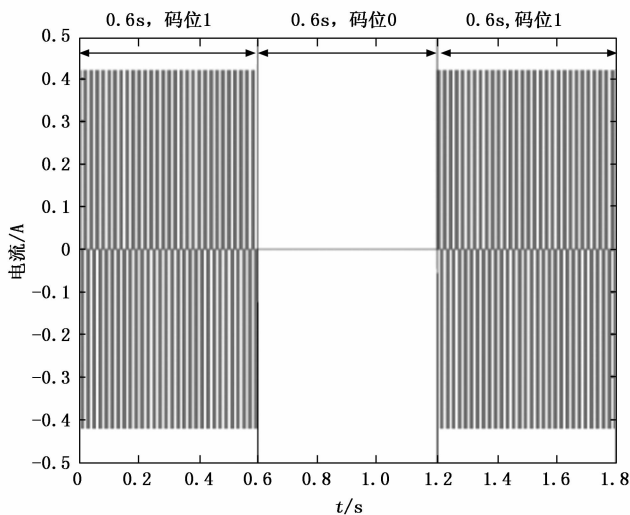


图 4 特征电流波形图

允许发送时间偏差为 ±15 ms。通过这样的方式, 大大增强了特征信号的抗干扰性, 提高了准确率。

3 拓扑感知方式研究

3.1 拓扑感知层级描述

挂网设备由主干线向分支侧不断延伸, 形成逐级网状分布式分布模式。针对这种分布式架构, 软件在设计时, 为更好地感知每一层级所挂设备的分支信息, 采用的流程图如图 5 所示。

实际工作过程简单描述为: 主站下发拓扑识别命令给集中器, 集中器分时段向电力线发送拓扑识别命令, 对应分支箱 (每个分支箱都有对应的唯一 ID 识别号) 设备的 HPLC 模块接收到电力线发来的命令, 解调后的信号传送给 MCU 进行进一步解析, MCU 响应该指令并解析得到该指令为拓扑识别指令并使能

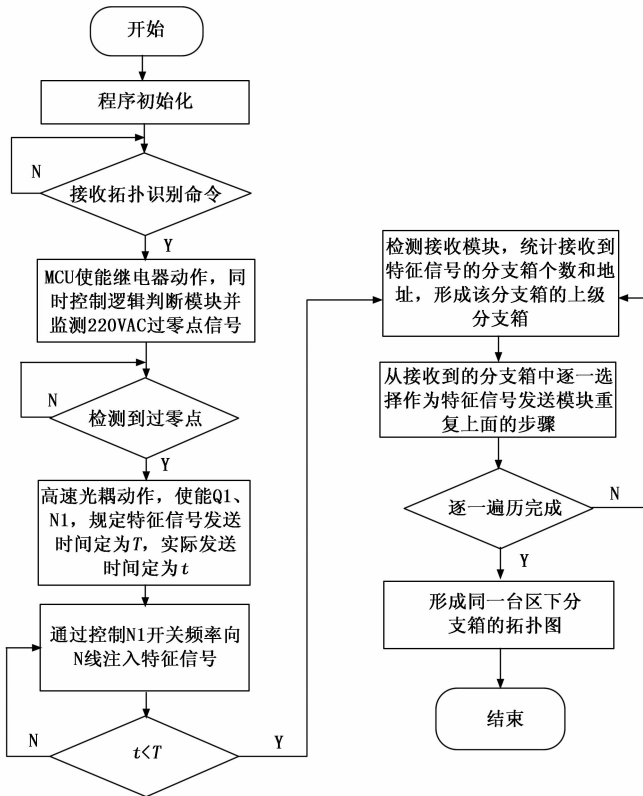


图 5 拓扑感知流程图

继电器 RY1 动作, 同时使能 U2 的 1 脚 (即输出低电平作用到 U2 的 1 脚), 随后跳转到中断服务子程序中, 监测电力线过零点信号, 当 MCU 监测到过零点信号后, U2 的 2 脚输入变为低电平, 此时 U2 的 4 脚输出低电平使得 U3 的 5 脚输出低电平, Q1 导通, 紧接着 N1 导通, 触发特征电流信号发送模块工作, 完成特征电流信号注入, 该线路上的上级分支箱 N 线均有特征电流流过, 上级电路的特征电流接收模块均可接收到该信号, 如此分级完成各级信号的发送与其上级信号的接收, 整合确定不同分支箱之间的网络拓扑图, 知道了分支箱的网络拓扑图, 即可得出同一台区每块电能表的分布网络。

3.2 拓扑感知决策算法研究

3.2.1 拓扑感知决策矩阵研究

配电变压器下挂的集中器作为主站与计量设备之间的桥梁, 完成命令的转发、电量信息的采集、对时、监测等功能, 在拓扑感知技术研究中, 集中器又增加了新的功能, 完成拓扑识别特征电流信号的接收与处理。

采用拓扑矩阵 R_x 来简单描述拓扑层级^[19], 针对

拓扑网络的每一个层级都有相应的矩阵与之对应, 以四层拓扑网络为例, 可以表示为: $R_0=[X_1]$;

$$R_1=[Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n];$$

$$R_2=[Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n];$$

$$R_3=[H_1, H_2, H_3, \dots, H_n];$$

假设四层拓扑网络图如图 6 所示。

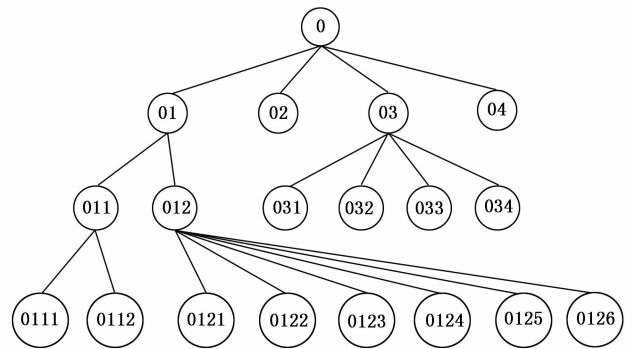


图 6 拓扑网络图

则可得:

$$R_0=[0];$$

$$R_1=[01, 02, 03, 04];$$

$$R_2=[011, 012, 031, 032, 033, 034];$$

$$R_3=[0111, 0112, 0121, 0122, 0123, 0124, 0125, 0126];$$

每一层级矩阵所包含的元素个数即为该层级的挂网设备数, 要将这些看似杂乱无章的数据整合成规律性的集合体, 就需要结合特征电流注入技术, 即上文阐述的技术, 基于电流沿最短路径传输原理, 通过特征电流信号的注入实现每一层级的父节点都能够感知到其子孙节点携带的特征信息。由此对图 X 所列举的四层网络拓扑矩阵做进一步的构建, 得到如下矩阵:

$$R_0=[0];$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 01 & 03 \\ 02 & 04 \end{bmatrix};$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} [011, 012] & [031 & 033] \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} [0111, 0112] & [0121 & 0123 & 0125] \\ [0122 & 0124 & 0126] & 0 \\ & 0 & & 0 \end{bmatrix};$$

观察主次结构矩阵就可以得到四层网络拓扑图。

3.2.2 拓扑感知决策矩阵的封装与解封

N 层分支网络拓扑图以 N 层结构矩阵为基础, 每一层级矩阵中的元素, 不应作为孤立的元素对待, 本层各不相同的元素, 有可能组成其父层级矩阵中元

素的结构矩阵。

内嵌式的决策矩阵结构特性也可以表述为: 由底层向高层逐层打包, 层层整合, 最终将拓扑图压缩为矩阵 R (其中只包含有一个元素, 即为拓扑图的最顶端) 的方式称为决策矩阵的封装; 由上层向下看, R 矩阵中的一个元素又可以牵引出许多个子矩阵, 层层展开得到网络分支拓扑图的方式称为决策矩阵的解封, 决策矩阵的封装与解封互为逆过程。

决策矩阵的封装采用边缘计算理念^[20], 将算力下沉, 大大节省上层算力, 各级下辖的子孙节点注入的特征电流信号都能被其上级父节点接收到, 父节点接收到特征信号后, 将其代表的不同设备 ID 层层打包, 组成结构矩阵, 存储在每一层级的父节点中, 当主站或集中器下发拓扑识别命令, 依次抄读各个父节点拓扑信息。当父节点接收并识别到主站下发的拓扑抄读命令时, 会将拓扑识别结果矩阵回传给主站或集中器。集中器通过各个父节点拓扑识别结果矩阵图, 可以清晰的描绘出台区侧网络拓扑图。

4 实验分析

4.1 拓扑信号的发送与检测

拓扑识别信号^[21]是通过电力线逐级传输到台区侧的, 既要确保拓扑信号能够被很好的识别, 又要保证引入的特征电流信号不会对电网构成污染, 对特征电流信号的强度及可靠性有严格的规定。

特征信号强度是表征强弱的物理量, 当信号太弱时, 容易淹没在噪声里, 很难被提取、检测; 当信号太强时, 对检测电路的要求大大题高, 无形中增加了检测成本及技术难度, 所以设计合理的电路保证特征信号在合理的强度范围内很重要; 信噪比^[22]是一个比较重要的参数, 表征信号与噪声的比值关系, 信噪比数值越高, 噪音越小, 说明信号越容易被捕捉到; 识别时间在严格意义上规定了完成拓扑识别所需要花费的实时时间的最大范围, 超出这个时间范围即使识别到了也视作无效数据, 进一步确保拓扑识别的实时性、可靠性。

经过反复的实验论证, 规定了特征信号注入强度、信噪比、识别时间等值的参考范围。规定信号强度范围在 0.050 到 10.000 A; 信噪比要大于 4 dB; 信号识别时间要小于 30 s。

在规定的检测要求下, 测试拓扑识别信号的强度及抗干扰能力如图 7 所示。

检测项	测试值	检测结果	参考值
000000000008		合格	
000000002101		合格	
000000002102		合格	
节点数量	2	合格	2
识别表位	000000000012	合格	
信号识别时间	2021-08-02 16:45:51	合格	2021-08-02 16:45:35 - 2021-08-02 16:46:05
信号强度和	1.800	合格	0.050 - 10.000
信噪比	270.000	合格	大于4.000
识别表位	000000000011	合格	
信号识别时间	2021-08-02 16:45:09	合格	2021-08-02 16:44:54 - 2021-08-02 16:45:24
信号强度和	1.760	合格	0.050 - 10.000
信噪比	132.000	合格	大于4.000

图 7 识别结果图

从图中可以看出清楚的看出特征信号强度和为 1.8 A, 在规定的范围内; 信号噪声比 (即信噪比) 为 270 dB; 信号识别时间为 2021-08-02 16: 45: 51, 信号识别时间实时范围为 2021-08-02 16: 45: 35-16: 46: 05, 均满足合理范围要求, 实际测试结果表明能够成功实现拓扑功能且满足测试准则。

4.2 拓扑识别结果

在实验搭建测试环境, 含有两个节点: 节点 1 为最上面的父节点为集中器 (地址为 000000000008) 与断路器 (地址为 000000002102) 之间的节点; 节点 2 为断路器 (地址为 000000002102) 与电能表之间的节点, 两个电能表的地址分别为 000000000011 和 000000000012, 这些设备都带有拓扑功能, 通过集中器依次给下辖的设备发送拓扑识别命令, 拓扑识别结果如图 8。

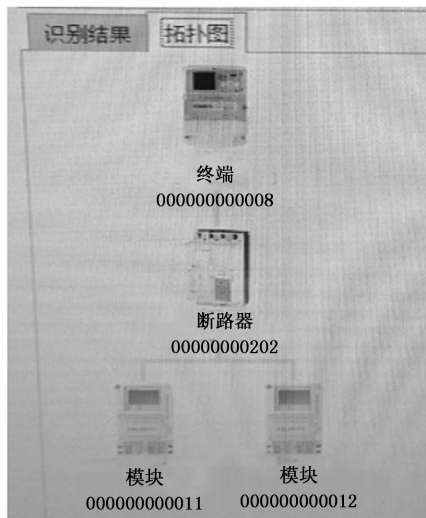


图 8 拓扑图

实测结果表明, 该技术能够准确、可靠地识别出挂网设备的层次结构图, 清晰、直观地反映出挂网产品在电力线上所处的分布情况。

每个挂网设备都有唯一的身份识别号, 一旦电网

中某个环节出现短路、过电压、过载等危险情况,利用挂网设备的拓扑识别功能构建的拓扑图,再结合设备唯一的身份识别号,就可以做到第一时间锁定故障源,及时切断故障源,并通知维护人员精准定位故障源,迅速处理故障原因,解除故障隐患,确保电能高效供应。

5 结束语

户变及分支关系是台区内各个用电客户与台区供电变压器的供电归属关系,其准确性在电力营销业务运行中十分重要,作为台区配电服务的基础,户变关系的明晰是配电方案规划和台区线损计算的依据。

台区作为智能电网发展建设的末端层级,涉及营销、运检等多个专业,是电网管理工作的重点和难点,也是服务“最后一公里”落地实施的关键所在。户变及分支关系不明确,会造成台区及分相线损分析数据误差大,业扩新增负荷安排不合理、影响负载均衡,降低远程费控及远程充值成功率等问题,影响这些基础业务的开展实施,也进一步制约了深化应用业务的开展。

文中所提出的技术很好地解决了挂网产品分布混乱的问题,明晰挂网产品路由信息,提高了电网设备的故障定位效率,优化电网结构,降低电网线损率,提高配用电效率,为泛在电力能源互联网的建设提供技术保证。

参考文献:

- [1] 鞠平,周孝信,陈维江,等. "智能电网+" 研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38 (5): 2-11.
- [2] 刘莉,姚玉斌,陈学允,等. 10 kV 配电网拓扑结构的识别及实用潮流计算 [J]. 继电器, 2000, 28 (2): 17-19.
- [3] 郭锐刘,文林. 110 kv 变电站一次设备运维状态智能感知与态势感知技术 [J]. 电声技术, 2019, 43 (3): 71-73.
- [4] 向德军,王彬,郭文鑫,等. 基于人工神经网络的电力系统精细化安全运行规则 [J]. 电力系统保护与控制, 2017 (18): 32-37.
- [5] 文振,高金花,朱映映,等. 融合时空域变化信息的视频感知哈希算法研究 [J]. 电子学报, 2014 (6): 1163-1167.
- [6] 杨志淳,沈煜,杨帆,等. 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (18): 5-11, 35.
- [7] 耿俊成,张小斐,郭志民,等. 基于离散 Fréchet 距离和剪辑近邻法的低压配电网拓扑结构校验方法 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (5): 50-55.
- [8] 李国昌. 基于 LoRa 技术和 GPU 加速的台区拓扑辨识方法 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (5): 50-55.
- [9] 夏水斌,余鹤,董重重,等. 基于集抄系统深化应用的低压台区电网拓扑重构方案 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (5): 50-55.
- [10] 陈招安,黄纯,张志丹,等. 基于 T 型灰色关联度和 KNN 算法的低压配电网台区拓扑识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (1): 163-169.
- [11] 蒋美菊. 基于 OOK 调制的太赫兹通信系统基带研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [12] 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.
- [13] 梁得亮,柳轶彬,寇鹏,等. 智能配电变压器发展趋势分析 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (7): 1-14.
- [14] 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.
- [15] 王虹富,穆世霞,陶向红,等. 基于拓扑图动力学模型的电网图自动布局研究 [J]. 电网技术, 2014, 38 (11): 3140-3145.
- [16] 华立科技股份有限公司. 基于 N 线的信号注入拓扑识别装置及方法: 202010906601.4 [P]. 2020-11-13.
- [17] 王鸿玺,唐如意,吴一敌,等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (3): 92-98.
- [18] 周祺,沈海斌. 基于电流模式的 ASK 解调器 [J]. 半导体技术, 2011, 36 (1): 55-58.
- [19] 王新生,王丽芹,孙链. 一种基于分支节点的源特定组播路由算法 [J]. 计算机研究与发展, 2008 (S1): 405-408.
- [20] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望 [J]. 自动化学报, 2020, 46 (3): 397-410.
- [21] 张滇,明仲,刘刚,等. 基于传感器节点的无线接收信号强度研究 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2014, 31 (1): 8.
- [22] 李晓锋. 沙特沙漠地区提高信噪比方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2017.